

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ

Практикум для лабораторных и практических занятий

Витебск
2020

УДК 539.3(075.8)

Составители:

В. Н. Сакевич, Г. Н. Федосеев

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом УО «ВГТУ», протокол № 9 от 27.11.2019 г.

Механика деформирования и разрушения : практикум для лабораторных и практических занятий / В. Н. Сакевич, Г. Н. Федосеев. – Витебск : УО «ВГТУ», 2020. – 177 с.

В лабораторном практикуме представлены лабораторные работы по определению механических характеристик и влияния опасных дефектов на безопасную эксплуатацию деталей, узлов, конструкций, сооружений и механизмов, изготовленных из конструкционных материалов различной природы.

В разделе для практических занятий приведены вопросы, возникающие в практической деятельности инженера, с несколькими вариантами ответов, среди которых один правильный. Эти тесты предполагают наличие у читателя определенной интуиции не столько конкретно в механике разрушения, сколько вообще в вопросах конструкционной прочности. Как и любой тест, он полезен, главным образом, для самоконтроля и, помимо этого, позволяет получить дополнительную информацию. Все тесты снабжены ответами с краткими пояснениями.

УДК 539.3/6 (075.8)

© УО «ВГТУ», 2020

Содержание

ВВЕДЕНИЕ	5
I МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ В ИСПЫТАНИЯХ НА РАСТЯЖЕНИЕ.....	7
Лабораторная работа 1. Введение в лабораторный практикум.....	7
Лабораторная работа 2. Испытание на растяжение стального образца.....	15
Лабораторная работа 3. Испытание на разрыв стального образца	20
Лабораторная работа 4. Определение коэффициента концентрации напряжений в полосе с отверстием.....	27
Лабораторная работа 5. Исследование зависимости коэффициента концентрации напряжений от размеров концентраторов.....	32
II ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ	37
Лабораторная работа 6. Общие положения при испытаниях на трещиностойкость.....	37
Лабораторная работа 7. Определение характеристик трещиностойкости металлов при однократном статическом нагружении.....	42
Лабораторная работа 8. Определение предела трещиностойкости	52
Лабораторная работа 9. Определение характеристик трещиностойкости при циклическом нагружении.....	54
Лабораторная работа 10. Определение характеристик трещиностойкости металлов при температурной ползучести.....	59
Лабораторная работа 11. Определение удельной поверхностной энергии разрушения материала твердого тела.....	63
III ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ.....	66
Лабораторная работа 12. Обнаружение опасных дефектов в конструкционных материалах.....	67
Лабораторная работа 13. Определение напряжений и деформаций в вершине трещины.....	70
Лабораторная работа 14. Определение коэффициента интенсивности напряжений.....	73
Лабораторная работа 15. Определение пластических напряжений и деформаций.....	77
Лабораторная работа 16. Определение характеристик хрупкого разрушения.....	81
Лабораторная работа 17. Изучение влияния температуры и времени на характер разрушения.....	84
Лабораторная работа 18. Исследование влияния масштабного фактора на характер разрушения.....	87

Лабораторная работа 19. Исследование влияния смешанного нагружения на характер разрушения.....	90
Лабораторная работа 20. Изучение методов предотвращения разрушений.....	94
Лабораторная работа 21. Анализ разрушений.....	98
IV МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ.....	102
Лабораторная работа 22. Изучение докритического роста трещины в полимерном материале.....	102
Лабораторная работа 23. Определение характеристик зоны предразрушения трещины в полимерном материале.....	104
Лабораторная работа 24. Определение критического значения коэффициента интенсивности напряжений для трещины в полимерном материале.....	106
Лабораторная работа 25. Экспериментальная проверка формулы Гриффитса.....	108
V МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТОВ.....	111
Лабораторная работа 26. Определение характеристик трещиностойкости стеклопластика при циклических нагрузках.....	111
Лабораторная работа 27. Методика испытания фибробетона (фб) на растяжение при изгибе.....	123
Лабораторная работа 28. Определение остаточной прочности фибробетона на растяжение при изгибе.....	127
VI ТЕСТЫ ПО КУРСУ «МЕХАНИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ».....	135
Ответы к тестам.....	162
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	175

ВВЕДЕНИЕ

В изучении механики разрушения предполагается, что слушатели умеют прилагать теоретические знания в решении конкретных задач.

Но, для закрепления знаний, полученных в лекциях по этой дисциплине, и для приобретения навыков решения практических задач необходимо обучение методам проведения экспериментов и обработки результатов, полученных в определении механических свойств конкретных материалов, которые в дальнейшем используются в практических расчетах. Лабораторные работы – важный этап в обучении будущего специалиста. Они необходимы студенту для наглядного представления о процедуре получения механических характеристик материалов, учат умению наблюдать физические явления и при этом производить измерения различных физических величин, представляемых в процессе работы в виде таблиц или графиков.

Предлагаемые лабораторные работы посвящены определению механических характеристик, имеющих отношение к механике разрушения. Цикл лабораторных работ по механике разрушения металлов состоит из четырех разделов.

Первый раздел включает лабораторные работы традиционных курсов сопротивления материалов (определение основных механических характеристик упругости и прочности). Но в связи с тем, что эти характеристики используются в расчетах элементов конструкций на трещиностойкость, их определение рассмотрено в данном пособии.

Второй раздел включает лабораторные работы по определению характеристик трещиностойкости металлов при однократном статическом и циклическом нагружениях, при температурной ползучести и по определению удельной поверхностной энергии в разрушении твердого тела.

Третий раздел включает лабораторные работы по закреплению навыков, полученных в теоретической и практической подготовке: в решении инженерных задач о влиянии различного вида дефектов на безопасную эксплуатацию деталей, узлов, конструкций, сооружений и механизмов.

Четвертый раздел включает общие сведения и особенности разрушения композитов при наличии трещин (в связи с отличием свойств композитов от свойств металлов).

Пятый раздел включает лабораторные работы по определению характеристик докритического роста зоны предразрушения, критического значения коэффициента интенсивности напряжений для трещин в полимерной матрице.

В пособии представлено не пошаговое описание последовательности действий при выполнении работы (указаний типа «измерить», «закрепить», «установить», «нажать», «включить», «проверить», «записать» и т. п.), а как делают или как можно сделать. Конкретные действия при выполнении лабораторных работ определяются наличием имеющегося в данной лаборатории стандартного оборудования и доступных материалов для образцов, оснасткой, опытом персонала. Все вместе взятое формирует порядок поэтапного выполнения лабораторной работы исходя из местных возможностей, применительно к имеющимся условиям.

Заключительная стадия проведения экспериментов – обработка полученных результатов, на их основе выявляют закономерности и объясняют полученные результаты.

Шестой раздел включает вопросы, возникающие в практической деятельности инженера, с несколькими вариантами ответов, среди которых один правильный. Все тесты снабжены ответами с краткими пояснениями.

I МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ В ИСПЫТАНИЯХ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Лабораторная работа 1 Введение в лабораторный практикум

Цель работы: ознакомление с приборами, способами измерения деформаций, перемещений, методикой проведения лабораторных работ и обработки результатов испытаний.

1.1 Измерение деформаций

Существует много способов измерения деформаций и напряжений: оптические (на прозрачных моделях), электрические с применением индуктивных и ёмкостных датчиков, методы хрупких покрытий и муаровых полос и др. [1–3]; непосредственно измерять механические напряжения можно термоупругим, магнитоупругим, ультразвуковым и фотоупругим методами.

Наиболее широкое применение в различных областях техники получили измерения деформаций проволочными и фольговыми тензорезисторами. Тензорезисторы наклеиваются на элементы строительных конструкций, деталей машин и других объектов различных устройств, подверженных действию статических, динамических, циклических и других видов нагрузок [3]. Для приклеивания тензорезисторов на металлические объекты используются ацетоновые клеи или клеи на основе цианоакрилата [3].

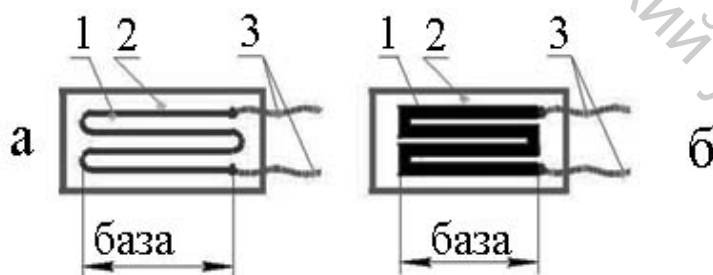


Рисунок 1.1 – Тензорезистор: а – проволочный; б – фольговый:
1 – проволока (фольга) тонкая; 2 – подложка бумажная (плёночная);
3 – проволочные отводы для соединения с измерительным прибором

Тензорезистор проволочный (рис. 1.1 а) состоит из тонкой константановой (сплава меди и никеля) проволоки 1 диаметром

(0.02...0.03мм) (в виде нескольких петель), приклеенной к тонкой бумажной подложке 2. Сверху для защиты проволоки наклеивается тонкая бумага. База проволочных тензорезисторов может быть равной 5, 10, 20, 50 мм, номинальное электрическое сопротивление у них 50, 100, 200 Ом.

Тензорезистор фольговый (рис. 1.1 б) устроен так же, как и проволочный, но вместо проволоки – тонкая плоская фольга толщиной 0,01 мм, нанесенная на тонкую синтетическую плёнку. Этот тензорезистор не имеет петель закруглений, в связи с чем получаются более точные замеры деформаций, кроме того они обладают минимальной базой 0,8...2 мм, что позволяет использовать их в зонах концентрации напряжений. Омическое сопротивление таких датчиков 50...200 Ом.

Различные виды тензорезисторов показаны на рисунке 1.2.

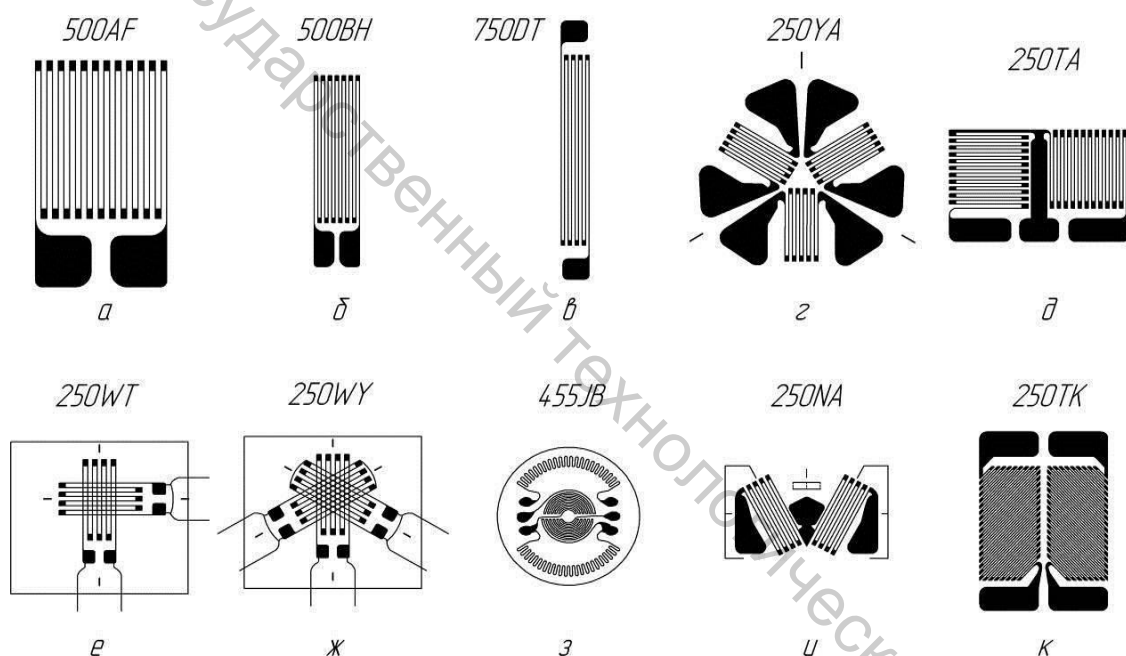


Рисунок 1.2 – Виды тензорезисторов

В процессе нагружения вместе с удлинением материала образца изменяется длина проволоки (фольги), в результате чего изменяется электрическое сопротивление тензорезистора. На основе опыта установлена линейная зависимость в пределах упругих деформаций между относительным удлинением ϵ и относительным сопротивлением $R_\epsilon = \beta\epsilon$, β – коэффициент тензочувствительности тензорезистора. Его обычная величина 2.0...2.2.

Абсолютное изменение сопротивления крайне мало и может быть измерено специальным электрическим прибором, включающим в себя мостик Уитстона (рис. 1.3), с помощью которого измеряется сопротивление активного (ТА) тензорезистора R_3 перед нагружением и

после нагружения. Тензометрический мост состоит из элементов R1, R2, R3, R4 – сопротивлений омических, μA – миллиамперметра (гальванометра), ТА, ТК – тензорезисторов активного и компенсационного в мосте (сопротивлений R3, R4), клемм А, О, К для подключения тензорезисторов к тензометру. В устройстве «Тензометрический мост» должно быть четыре тензорезистора: два из них внутри прибора R1 и R2 (внутренний полумост) и два снаружи R3 и R4 (внешний полумост). Внешний полумост состоит из тензорезистора активного ТА, наклеенного на образец, и тензорезистора компенсационного ТК.

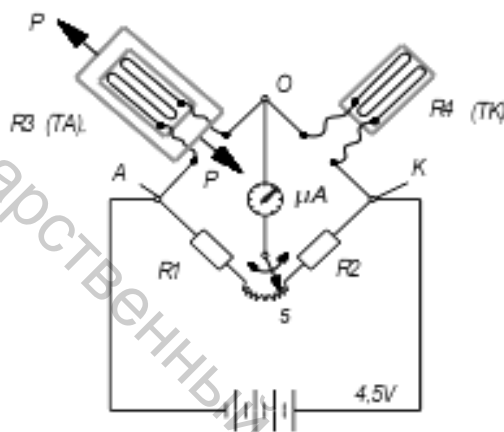


Рисунок 1.3 – Тензометрический мост

Компенсационный тензорезистор не нагружается, но должен находиться с ТА в одинаковых температурных условиях. Особенность мостика – близкие величины сопротивлений R3, R4, что достигается при условии, что берутся они из одной и той же партии (упаковки).

Перед испытанием производится балансировка моста регулированием сопротивлений R1 и R2 реохордом 5 – стрелку гальванометра устанавливают на ноль. Это означает, что ток через диагональ моста не протекает, мост сбалансирован. Условие баланса моста равенство $R1 \cdot R4 = R2 \cdot R3$.

Деформация, полученная активным (рабочим) тензорезистором R3 в ходе испытания, приведет к изменению его сопротивления R3 и, следовательно, к нарушению баланса, вследствие чего стрелка миллиамперметра (гальванометра) отклонится от нуля. Вращением регулятора реохорда 5 следует сбалансировать тензометрический мост. В тензометрах ИД-70, ЦТМ-100 и других, имеющих цифровое табло, процесс балансировки происходит автоматически.

Тензометрический измерительный комплекс (тензометр) имеет три контактные клеммы (рис. 1.4): А – клемма для одного вывода тензорезистора активного (ТА); К – клемма для одного вывода

тензорезистора компенсационного (ТК); О – общая клемма для оставшихся выводов обоих тензорезисторов (ТА и ТК). Подключение рабочих (активных) тензорезисторов к одному компенсационному тензорезистору может быть групповым, если активных тензорезисторов в опыте несколько. Проволочные отводы тензорезисторов подсоединяются к клеммам (А, О, К) приборов типов ИД (измеритель деформаций (ИД-70) со шкалой часового типа), ИСД (измеритель статических деформаций со шкалой часового типа), ЦТМ (цифровой тензометрический мост (ЦТМ-100) с цифровым табло).

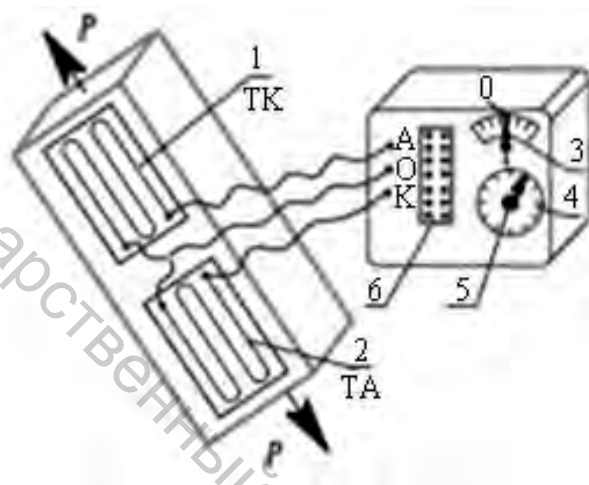


Рисунок 1.4 – Тензометрический измерительный комплекс на базе ИСД-3: 1 – тензорезистор активный (наклеенный на образец); 2 – тензорезистор компенсационный (свободно соприкасается с образцом); 3 – шкала гальванометра; 4 – шкала тензометра; 5 – регулятор реохорда; 6 – розетка группового подключения тензорезисторов (до 10 штук)

В процессе испытания проводятся две балансировки моста, которым отвечает два отсчета ТН и ТК на шкале тензометра. Соответствующее приращение показаний $\Delta T = TK - TH$.

Шкала 4 приборов проградуирована в относительных деформациях ЕОД: 1ЕОД – единица относительной деформации, $1\text{ЕОД} = \varepsilon_0 = 1 \cdot 10^{-5}$. Измеренная относительная деформация

$$\varepsilon = (\Delta T)\varepsilon_0. \quad (1.1)$$

Пусть показание прибора перед началом нагружения равнялось 1937, после нагружения – 1954, тогда $\Delta T = 17$, и, следовательно, относительное удлинение в месте расположения тензорезистора $\varepsilon = 17 \cdot 10^{-5}$.

1.2 Вычисление опытных напряжений на основе тензометрических измерений

По закону Гука для линейного напряженного состояния напряжение

$$\sigma = E\varepsilon = E(\Delta T)\varepsilon_0, \quad (1.2)$$

где E – модуль продольной упругости материала (модуль Юнга), например, у стали он равен $2 \cdot 10^5$ МПа; ΔT – приращение показаний тензометрических приборов в процессе испытания; ε_0 – цена деления в единицах относительной деформации. Для рычажного тензометра она равна $5 \cdot 10^{-5}$, для проволочного (фольгового) тензорезистора – $1 \cdot 10^{-5}$. В приведенном ранее примере величина опытных напряжений $\sigma = 2 \cdot 10^5 \cdot 17 \cdot 1 \cdot 10^{-5} = 34$ МПа.

Для упрощения вычислений можно ввести градуировку шкалы тензометра не в относительных единицах деформации, а сразу в напряжениях. Назовём эту единицу ценой деления шкалы тензометра (ЦДТ). В примере $\text{ЦДТ} = E\varepsilon_0 = 2 \cdot 10^5 \cdot 1 \cdot 10^{-5} = 2$ МПа. Следовательно, те же напряжения $\sigma = (\Delta T) \cdot (\text{ЦДТ}) = 17 \cdot 2 = 34$ МПа.

За пределами упругости переход от деформаций к напряжениям не возможен, если не известна функциональная зависимость между напряжениями и деформациями.

1.3 Приборы для измерения линейных перемещений

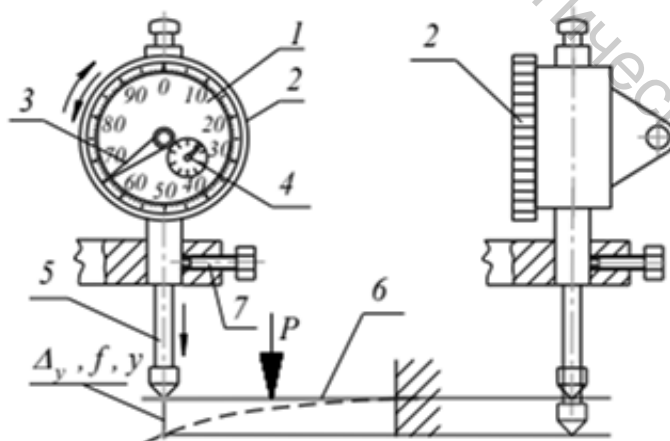


Рисунок 1.5 – Индикатор часового типа: 1 – шкала циферблата (с красными и чёрными цифрами); 2 – опора циферблата поворотная для установки нуля под большой стрелкой; 3 – стрелка большая; 4 – циферблат малый (для отсчёта оборотов большой стрелки); 5 – шток; 6 – балка; 7 – винт прижимной; Δy , f , y – прогибы

Процесс деформирования сопровождается не только изменением длины некоторого отрезка стержня, а также изменением положения точек тела после нагружения, они называются перемещениями. Для их измерения используются приборы – индикаторы с циферблатами стрелочного часового типа (рис. 1.5). Индикатор закрепляется в корпусе неподвижно, как и испытываемая деталь. Перед нагружением поворотом оправы 2 нулевое деление шкалы подводится под большую стрелку. После нагружения считывают показания по шкалам 1 и 4. Шкала 4 дает число полных оборотов большой стрелки 3. Обычно его определяют визуально – по числу переходов большой стрелки через ноль шкалы. Индикаторы часового типа изготавливаются с ценой деления шкалы 0,1; 0,01; 0,001 мм. Различные виды индикаторов показаны на рисунке 1.6.



Рисунок 1.6 – Виды индикаторов часового типа

1.4 Методика проведения лабораторных работ

Теоретические положения сопротивления материалов основаны на законе Гука, согласно которому существует прямая пропорциональная зависимость между нагрузками и деформациями,

нагрузками и перемещениями. Поэтому можно повторять опыты (рис. 1.7), увеличивая силу $P_{СТ}$ ступенчато 3-4 раза, что фактически соответствует проведению трех четырех опытов нагружением силой P от нуля до конечного значения, равного P . Это позволит ускорить опыты и повысить точность измерения. Для этого перед началом опыта установить небольшую начальную нагрузку P_0 – для устранения зазоров (люфтов) в механических элементах измерительного комплекса и включения электрических измерительных приборов (тензометров) в процесс измерения. В процессе нагружения испытуемого образца напряжения не должны превысить предел пропорциональности. Ниже приводится образец таблицы испытаний (табл. 1.1). Для каждой лабораторной работы таблица составляется подобно, но в соответствии с необходимым количеством тензорезисторов и индикаторов [4].

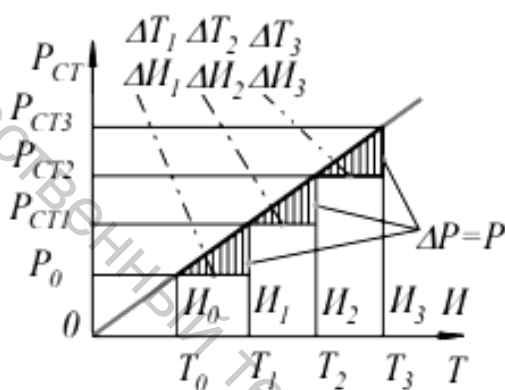


Рисунок 1.7 – Порядок проведения опытов: $P_{СТ}$ – значения силы в процессе нагружения; I, T – показания индикатора, тензометра; $\Delta P = P$ – ступень нагружения (величина силы в отдельном опыте); $\Delta I, \Delta T$ – приращение показаний индикатора, тензометра (в отдельном опыте)

Таблица 1.1 – Образец таблицы лабораторных работ

№	$P_{СТ}$ (кН)	Показания тензометров, индикаторов					$\Delta P=P$ (кН)	Приращения показаний тензометров, индикаторов						
		T1	T2	I1	I2	I3		$\Delta T1$	$\Delta T2$	$\Delta I1$	$\Delta I2$	$\Delta I3$		
0	5	1937		0										
1	16	1954		45			11	17		45				
2	27	1977		92			11	23		47				
3	38	2005		132			11	28		40				
Средние значения ВО							11	22,6		44				

Одна из главных целей лабораторного практикума – проверка соответствия теоретических положений курса «Сопротивление материалов» опытными данными.

Погрешность опыта в процентах

$$\text{ПОГ}(\%) = \frac{|\text{ВТ} - \text{ВО}|}{\text{ВТ}} 100 \%, \quad (1.3)$$

где ПОГ (%) – погрешность опыта в процентах; ВО – величина, измеренная в опыте; ВТ – величина, вычисленная теоретически.

Погрешность в пределах до 10 % – свидетельство хорошо проведенного эксперимента. Удовлетворителен эксперимент при погрешности до 15 %. Если погрешность окажется более 15 %, следует проделать опыт повторно, предварительно проанализировав причины возникновения большой погрешности. Рекомендуется производить теоретические расчёты особенно тщательно.

Вычисления проводить с точностью, не превышающей точность привлекаемых величин.

1.5 Требования к оформлению отчета о лабораторной работе

Отчет о лабораторной работе должен содержать (в кратком изложении) следующие разделы [4]:

1. Цель лабораторной работы.
2. Оборудование (наименования и характеристики испытательной машины, лабораторной установки, измерительных приборов, объекта испытания).
3. Схему опыта (допускаются упрощённые схемы по согласованию с преподавателем).
4. Содержание опыта (порядок проведения опыта).
5. Таблицу результатов испытания и их обработку.
6. Теоретический расчет измеряемых величин.
7. Оценку погрешности опыта.
8. Выводы (например, объяснение погрешности опыта и др.).

Текст лабораторной работы помещается с одной стороны листа. Отчёты о выполненных лабораторных работах собираются в журнал и предъявляются преподавателю перед защитой.

1.6 Защита лабораторной работы

Для защиты работы предлагается ответить на вопросы теста (рис. 1.8).

1.7 Оформление отчета о выполнении лабораторной работы

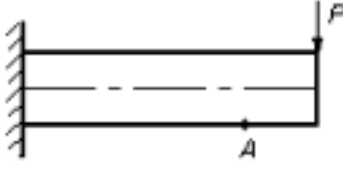
	<p>Необходимо измерить вертикальное перемещение в точке А. Какой прибор следует использовать?</p> <p>1) Рычажный тензомер. 2) Торсиомер. 3) Инклинометр. 4) Стрелочный индикатор.</p>
<p>По шкале рычажного тензомера с базой $a = 100$ мм и ценой деления, равной $0,001$ мм, начальный отсчет составил 20, после приложения нагрузки отсчет стал равным 29. Чему равна величина измеренной линейной деформации?</p> <p>1) $4,5 \cdot 10^{-4}$. 2) $9 \cdot 10^{-5}$. 3) $29 \cdot 10^{-4}$. 4) $9 \cdot 10^{-2}$.</p>	
<p>Абсолютное удлинение стержня равно $0,03$ мм, его длина равна 150 мм. Чему равно относительное удлинение стержня?</p> <p>1) $3 \cdot 10^{-3}$. 2) $2 \cdot 10^{-3}$. 3) $2 \cdot 10^{-4}$. 4) $3 \cdot 10^{-4}$.</p>	
<p>Цена деления стрелочного индикатора (малая шкала) составляет:</p> <p>1) $0,01$ мм. 2) $0,001$ мм. 3) $0,1$ мм. 4) 1 мм.</p>	
<p>Начальная длина образца 200 мм. После деформирования его длина стала равной $199,4$ мм. Чему равна деформация стержня?</p> <p>1) $1,5 \cdot 10^{-3}$. 2) $3 \cdot 10^{-3}$. 3) $-3 \cdot 10^{-3}$. 4) $-6 \cdot 10^{-3}$.</p>	

Рисунок 1.8 – Примерный вариант тестирования

После правильных ответов на вопросы, предложенные тестирующей программой, формируется отчет о тестировании. Форма отчёта о выполнении лабораторной работы и тестировании включает в себя отчёт о выполнении лабораторной работы; отчёт о тестировании прилагается студентом после контрольной защиты на кафедре.

Лабораторная работа 2 Испытание на растяжение стального образца

Цель работы: экспериментальное определение модуля продольной упругости E и коэффициента Пуассона μ стали, проверка закона Гука [4, 5].

2.1 Постановка опыта

Опыт проводится на разрывной машине УМ-5 (рис. 2.1), развивающей наибольшее усилие $5 \text{ тс} = 50 \text{ кН}$. Машина имеет ручной привод. Образец для испытаний (рис. 2.2) имеет прямоугольное сечение ($b = 30 \text{ мм}$, $h = 11 \text{ мм}$). Для измерения удлинения в продольном направлении на базе $a = 100 \text{ мм}$ применяются индикаторы И1 и И2, а для измерения сужения в поперечном направлении на базе $b = 30 \text{ мм}$ применяется индикатор И3.

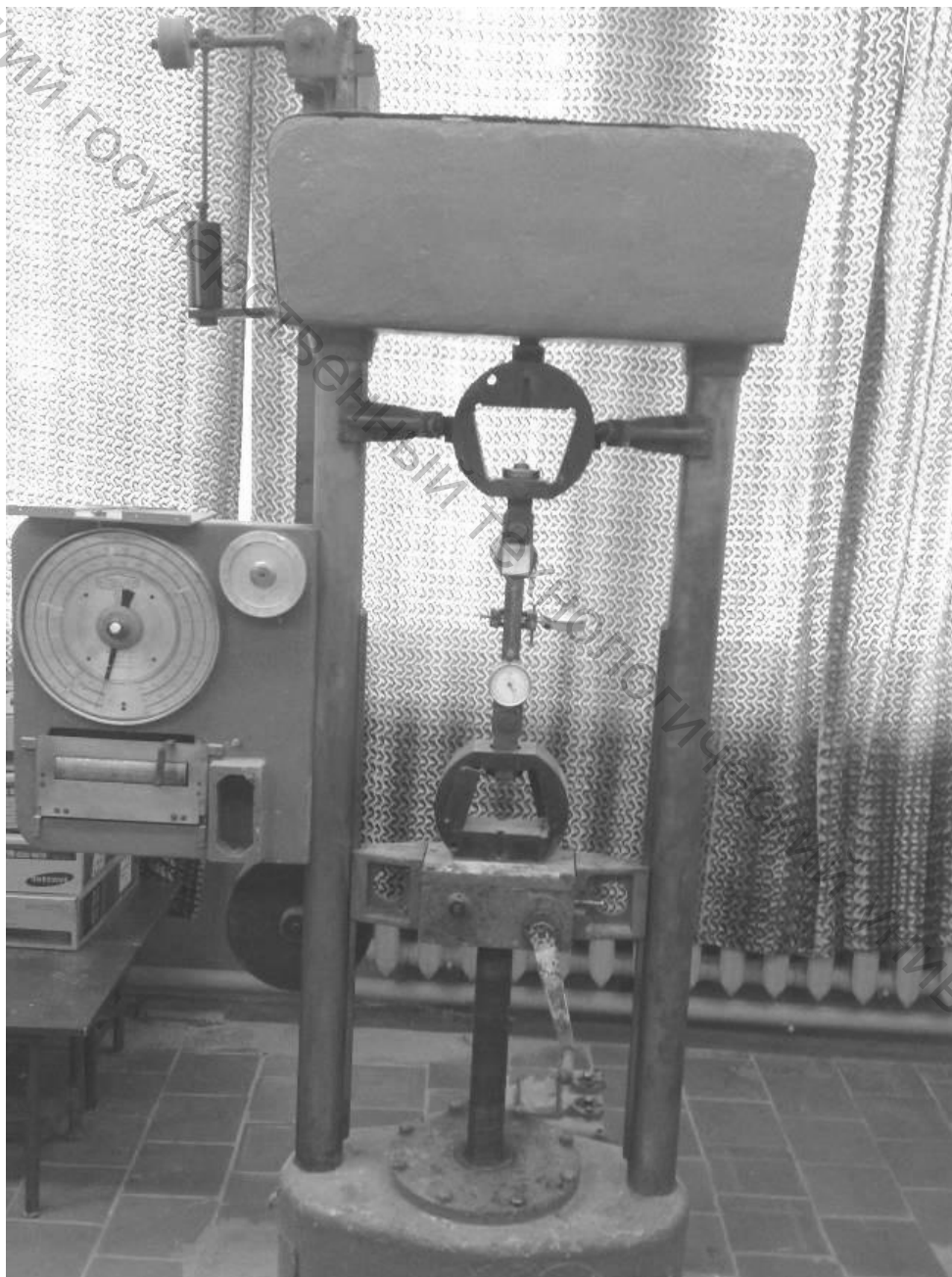


Рисунок 2.1 – Машина УМ-5

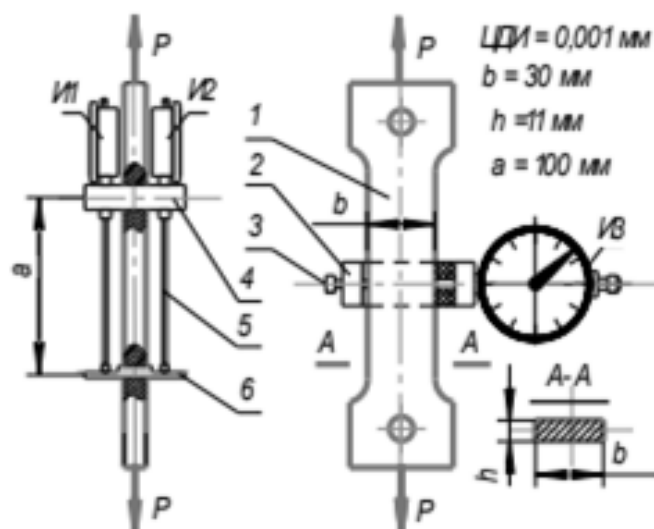


Рисунок 2.2 – Тензометрическая установка на основе индикаторов:
 1 – образец для испытаний; 2 – скоба-струбцина; 3 – винт прижимной;
 4 – штифт верхний; 5 – шток индикатора; 6 – штифт нижний

Индикаторы И1, И2 закреплены на штифтах, запрессованных в образец, индикатор И3 закреплен в специальной скобе-струбцине, охватывающей образец поперек. Образец и индикаторы представляют собой специальное тензометрическое устройство.

Цена деления шкалы индикаторов (ЦДИ) = 0,001 мм = 10^{-3} мм. Поскольку нельзя гарантировать приложение нагрузок точно вдоль продольной оси, обязательно случится то или иное смещение от оси, поэтому образец будет наряду с растяжением подвергаться изгибу. С целью исключения влияния изгибной деформации необходимо измерять удлинение с двух сторон. Средняя величина показаний индикаторов И1 и И2 будет соответствовать удлинению при растяжении.

2.2 Порядок проведения опыта

Для исключения влияния зазоров на замеры в измерительном комплексе машина – образец перед началом опыта необходимо нагрузить образец небольшой силой $P_0 = (4...5)$ кН. После этого стрелки индикаторов надо установить поворотом шкал на ноль. Далее принимают величину ступени нагружения P . Нагрузку ступенчато увеличивают. На каждой ступени нагружения записывают величину растягивающей силы и показания индикаторов, занося их в таблицу испытаний. Форму таблицы испытаний следует создавать по образцу таблицы 1.1. В ней должны быть колонки для значений силы и показаний индикаторов И1, И2, И3, а также столько же колонок для их приращений $\Delta И1$, $\Delta И2$, $\Delta И3$.

Внимание! Ввиду того, что база для индикатора $I3$ значительно меньше, чем для индикаторов $I1$, $I2$, к тому же поперечная деформация существенно меньше, следует особенно тщательно производить замеры по индикатору $I3$ – вплоть до части деления шкалы.

2.3 Теоретическая часть работы

В упругой стадии деформации образца справедлив закон Гука

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (2.1)$$

следовательно, модуль продольной упругости (модуль Юнга)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}. \quad (2.2)$$

Нормальное напряжение в опытах

$$\sigma = \frac{N}{A}, \quad (2.3)$$

где $N = \Delta P = P$ – продольная сила в опытах; $A = bh$ – площадь поперечного сечения образца.

Коэффициент Пуассона

$$\mu = \varepsilon^*/\varepsilon, \quad (2.4)$$

где

$$\varepsilon = \Delta a/a \quad (2.5)$$

– продольная относительная деформация образца;

$$\varepsilon^* = \Delta b/b \quad (2.6)$$

– поперечная относительная деформация образца.

2.4 Обработка результатов испытаний с использованием Microsoft Excel

Продольная сила в опытах $N = \Delta P = P$. Площадь поперечного сечения образца $A = bh$.

Далее вычисляются абсолютное удлинение Δa и абсолютное сужение Δb (приняв ЦДИ = 10^{-3} мм):

$$\Delta a = \frac{(\Delta l_{1cp} + \Delta l_{2cp})}{2} * (\text{ЦДИ}), \Delta b = (\Delta l_{3cp}) * (\text{ЦДИ}).$$

По формулам (2.5) и (2.6) находим относительные деформации ε , ε^* , используя базы $a = 100$ мм и $b = 30$ мм. После этого по формулам (2.2), (2.4), найдём упругие постоянные E и μ .

Для оценки результатов опыта привлечем справочные данные: $E = (1,87...2,16) \cdot 10^5$ МПа, $\mu = (0,25...0,33)$. Результаты удовлетворительны, если значения E и μ находятся в указанных пределах.

Один из вариантов определения модуля продольной упругости по результатам соответствующего эксперимента с использованием среды Microsoft Excel приведен на рисунке 2.3.



Рисунок 2.3 – Определение модуля продольной упругости E из диаграммы растяжения

2.5 Подготовка отчёта

В отчет о работе включить ответы на все пункты (особое внимание п. 5 лабораторной работы 1) и дополнительно построить график в координатах $P-\Delta l$ (подтверждающий закон Гука).

2.6 Контрольные вопросы

1. Какие свойства материалов отображает модуль продольной упругости E , какова его размерность?
2. Напишите формулу закона Гука. Дайте его словесную формулировку.
3. Что представляет собой коэффициент Пуассона, и как его можно определить?
4. Напишите формулу для нормальных напряжений в поперечном сечении бруса и изобразите соответствующую эпюру.
5. Как определяются продольные и поперечные относительные деформации, как они вычисляются по показаниям индикаторов?
6. Чем вызвана необходимость использования в опыте двух индикаторов для измерения продольной деформации?
7. С какой целью задается предварительная нагрузка на образец?
8. Что необходимо проделать на индикаторах в начале опыта?
9. Приведите значения модулей продольной упругости E для стали, чугуна, резины.
10. Приведите значения коэффициента Пуассона μ для стали, чугуна, резины.
11. Во сколько раз резина податливее стали или, наоборот, сталь жёстче резины?
12. Во сколько раз чугун податливее стали или, наоборот, сталь жёстче чугуна?

Лабораторная работа 3

Испытание на разрыв стального образца

Цель работы: определение механических характеристик стали (предела текучести, предела прочности, относительных удлинений и сужений после разрыва).

3.1 Постановка опыта

Заметим, что эти испытания – основные в исследовании прочностных и пластических свойств материалов, положенных в основу курса «Соппротивление материалов».

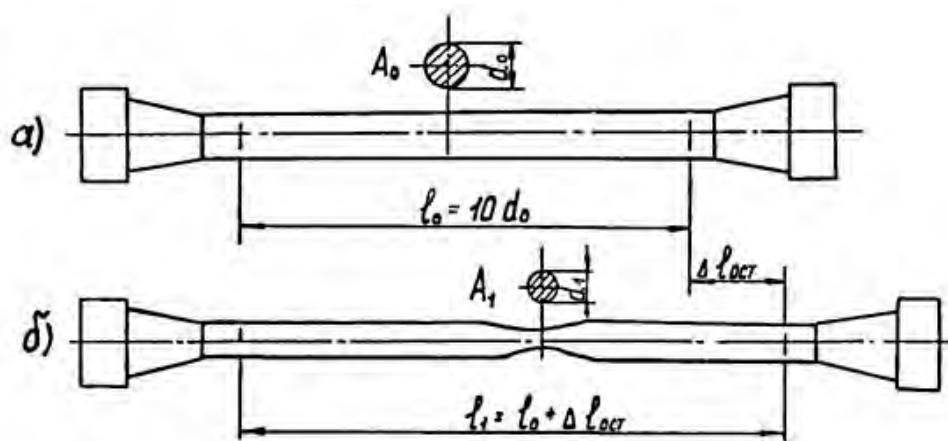


Рисунок 3.1 – Образец для испытаний на разрыв: а – до испытаний, б – после испытания на разрыв; d_0 – диаметр образца до испытания (обычно 10 мм); d_1 – диаметр шейки (после разрыва); l_0 – длина базовой части образца; l_1 – длина базовой части после разрыва

Испытания проводятся на разрывной машине УМ-5 (рис. 2.1), развивающей наибольшее усилие $5mc = 50 \text{ кН}$ [4]. Перед испытаниями измеряют диаметр образца (обычно $d_0 = 10 \text{ мм}$), наносят риски (отметки) на цилиндрическую поверхность через каждый сантиметр на длине $l_0 = 10d_0$. Риски не должны повреждать материал образца.

Образец цилиндрической формы снабжен на концах головками для установки его в верхнем и нижнем захватах машины. Форма, размеры образца (рис. 3.1) должны быть стандартными (ГОСТ 1497-73).

Образец вставляют в захваты машины и производят нагружение с медленным нарастанием усилия (статически) вплоть до разрыва. На рис. 3.2 показаны образцы до испытания и после испытания на разрыв.

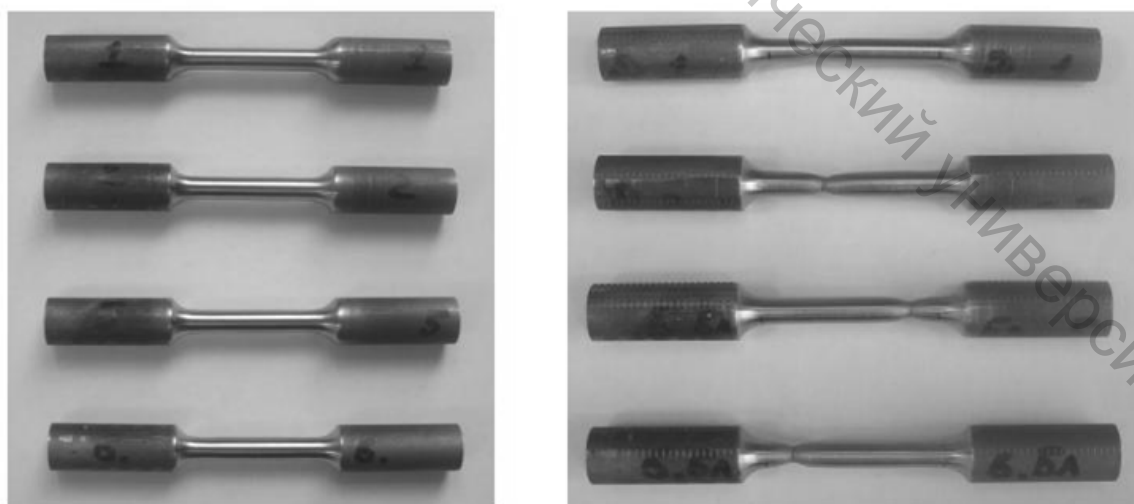


Рисунок 3.2 – Образцы до испытания и после испытания на разрыв

Диаграммный аппарат машины вычерчивает кривую деформации образца в координатах $P-\Delta l$. Низкоуглеродистые стали с явно выраженной площадкой текучести получают диаграмму, изображенную на рисунке 3.3.

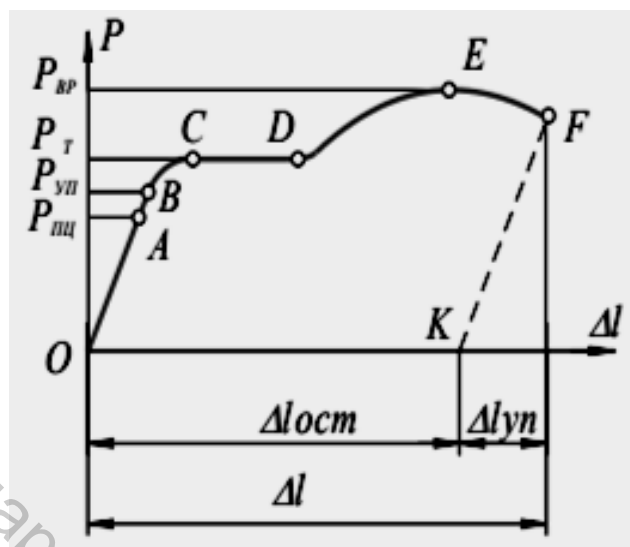


Рисунок 3.3 – Диаграмма растяжения $P-\Delta l$ малоуглеродистой стали Ст 3

В процессе испытания рекомендуется внимательно наблюдать за появлением изображения диаграммы и положением стрелки силоизмерительного устройства, дающим значение силы, растягивающей образец в данный момент испытания. Особо рекомендуется обратить внимание на образование площадки текучести и шейки на образце в момент достижения максимального значения силы. В процессе испытаний фиксируют значения силы P_T (соответствует площадке текучести CD) и P_{BR} (максимальное значение силы в точке E диаграммы).

3.2 Характерные особенности диаграммы

1. Прямолинейный участок OA прямопропорциональной зависимости между силой и удлинением отвечает закону Гука.
2. Горизонтальная площадка CD (площадка текучести), изображает нарастание удлинения образца при почти постоянной силе.
3. По достижении максимальной силы P_{BR} , выдерживаемой образцом (точка E), на образце появляется шейка (местное сужение), она становится все тоньше вплоть до разрушения в точке F .
4. До нагрузки $P_{уп}$ (точка B) деформации только упругие. У сталей точки A ($P_{пц}$) и B ($P_{уп}$) разнятся мало.

3.3 Теоретическая часть работы

Характеристики прочности:

– предел текучести

$$\sigma_T = \frac{P_T}{A_0}; \quad (3.1)$$

– предел прочности

$$\sigma_{BP} = \frac{P_{BP}}{A_0}, \quad (3.2)$$

где P_T и P_{BP} – силы, замеренные в процессе испытания; A_0 – площадь поперечного сечения образца до испытания.

Характеристики пластичности:

– остаточное относительное удлинение после разрыва образца

$$\delta(\%) = \frac{\Delta l_{ост}}{l_0} 100; \quad (3.3)$$

– остаточное относительное сужение шейки после разрыва образца

$$\Psi(\%) = \frac{\Delta A}{A_0} 100. \quad (3.4)$$

В формулах (3.3), (3.4) остаточное удлинение образца $\Delta l_{ост} = l_0 - l_1$, остаточное сужение шейки $\Delta A = A_0 - A_{ш}$, где $A_{ш}$ – площадь поперечного сечения шейки; A_0 – площадь поперечного сечения образца до испытания.

3.4 Обработка результата опыта

После разрыва образца, соединив две его части, замеряются штангенциркулем диаметр шейки $d_{ш}$ и длину l_1 между базовыми точками. Как правило, шейка в образце не совпадает с серединой образца. Результаты измерений представляются в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Результаты испытаний на разрыв

Величины	До опыта	После опыта
Диаметр образца (мм)	$d_0 =$	$d_{ш} =$
Начальная длина (мм)	$l_0 =$	$l_1 =$
Сила P_T (кН)		$P_T =$
Сила P_{BP} (кН)		$P_{BP} =$

Значения механических характеристик занесём в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Механические характеристики стали

σ_T , (МПа)	$\sigma_{ВР}$, (МПа)	δ (%)	Ψ (%)

3.5 Подготовка отчёта

В отчет о работе включить ответы на все пункты (особое внимание п. 5 лабораторной работы №1) и дополнительно представить копию диаграммы ($P-\Delta l$), эскизы образца до и после испытания со всеми размерами. На диаграмме ($P-\Delta l$) указать значения сил, отвечающих площадке текучести и моменту начала образования шейки, а также остаточное удлинение после разрыва образца. Нанести на диаграмму все характерные точки.

Пример построения диаграммы растяжения образца с использованием среды Microsoft Excel приведен на рисунке 3.4.

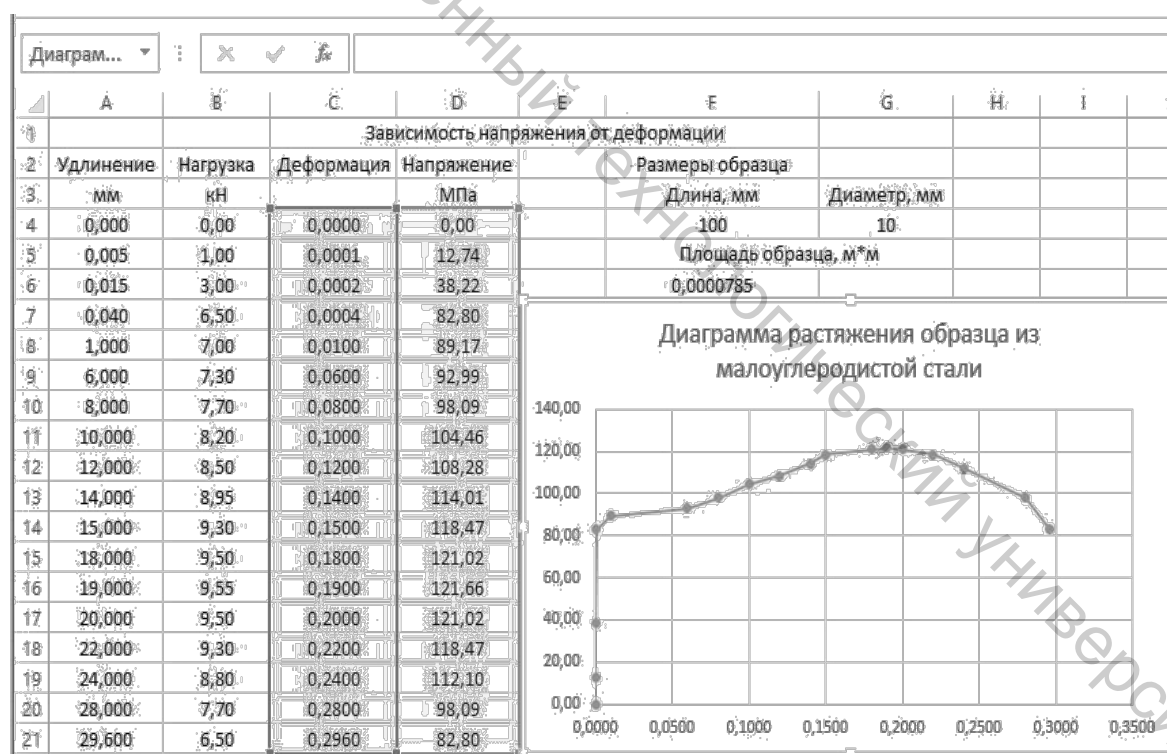


Рисунок 3.4 – Построение диаграммы растяжения образца из малоуглеродистой стали

3.6 Контрольные вопросы

1. Какие величины относят к характеристикам прочности?

2. Как отличают истинное разрушающее напряжение от условного?
3. Для какого участка диаграммы справедлив закон Гука?
4. Какое напряжение называется пределом пропорциональности?
5. Какое напряжение называется пределом упругости?
6. Какое напряжение называется пределом текучести?
7. Какой участок называется площадкой текучести, при испытании каких материалов она появляется на диаграмме растяжения?
8. Покажите на диаграмме растяжения зону упругости и объясните ее суть.
9. Какое напряжение называется пределом прочности?
10. Как определить параметры, характеризующие пластичность материала?
11. Какое напряжение называется истинным?
12. Объясните, почему образец разрушается при нагрузке меньшей максимальной.
13. Из каких частей состоит полная деформация?
14. Для каких материалов определяют условный предел текучести? Как его найти?
15. Какие деформации называют упругими, и какие остаточными (пластическими)? Как их определить на диаграмме растяжения?
16. Как отличаются друг от друга диаграммы растяжения при пластичном и хрупком разрушении материалов?
17. Что называют наклёпом? Как изменяются механические свойства материала после наклёпа?
18. Как используют в технике явление наклёпа? Приведите примеры.
19. Когда появляется шейка на образце?
20. На какой машине проводятся испытания? Опишите её конструкцию.
21. Как работают силоизмерительное и записывающее устройство?
22. Какие формы поперечных сечений образцов предусматривает ГОСТ?
23. Каково соотношение между диаметром и длиной рабочей зоны образца, предусмотренное ГОСТом?
24. Для чего нужна диаграмма растяжения материала, в каких координатах она строится?
25. Почему за ось абсцисс при построении диаграммы растяжения принимают абсолютное удлинение?
26. С какой целью обращают функциональную зависимость нагрузки от удлинения?

27. Какой вид имеет диаграмма растяжения малоуглеродистой стали?

28. Сколько характерных зон деформирования имеет диаграмма растяжения?

29. Как называют зоны деформирования диаграммы растяжения?

30. Как проходит процесс деформирования на различных участках диаграммы?

31. Почему диаграмма растяжения, полученная на испытательной машине, имеет начальный криволинейный участок O_1A ?

32. Что характеризует диаграмма растяжения, построенная в координатах $P-\Delta l$: свойства образца данных размеров или свойства материала?

33. Как определяется начало координат машинной диаграммы $P-\Delta l$?

34. От каких факторов зависят механические характеристики материалов?

35. На какие группы делят механические характеристики?

36. Какой точке диаграммы растяжения соответствует момент зарождения шейки образца?

37. Чем характеризуется удельная работа разрыва и как её определяют?

38. На основании каких результатов испытаний определяют марку стали?

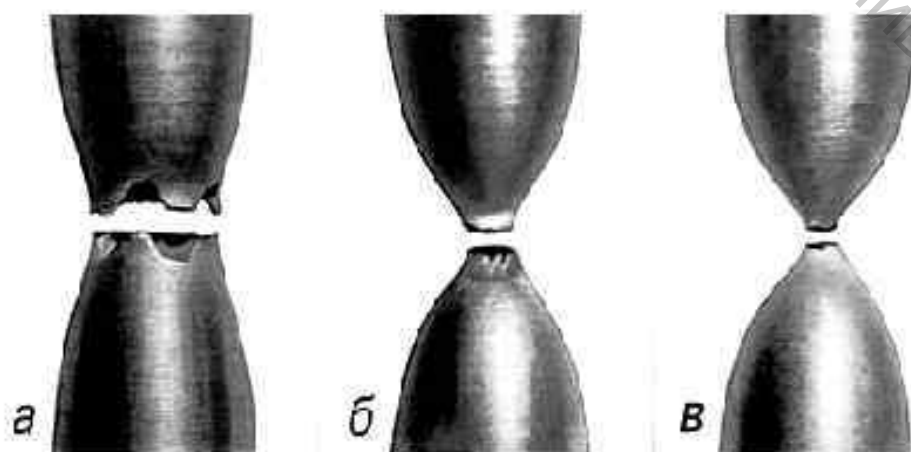
39. Какую способность твёрдых тел измеряют характеристикой вязкости?

40. Что является количественным показателем вязкости материала?

41. Какими размерами характеризуют пропорциональный образец?

42. На какую величину восстанавливаются размеры образца после его разрыва?

43. Какой образец наиболее пластичный?



Лабораторная работа 4

Определение коэффициента концентрации напряжений в полосе с отверстием

Цель работы: определение коэффициента концентрации напряжений в зоне распространения повышенных напряжений вблизи концентратора напряжений.

4.1 Содержание работы

Основными источниками повреждений стальных строительных конструкций, в частности, предназначенных для транспортирования и хранения нефте-, газо- и других экологически опасных продуктов, являются зоны концентрации напряжений, где развиваются дефекты и наиболее интенсивно протекают неблагоприятные для сооружения процессы (нарушения сплошности, коррозия, пластические деформации и др.). В связи с этим деталям следует, по возможности, придавать гладкие очертания, без нарушения непрерывности сечения отверстиями, без нарушения плавности контура выточками или резкими переходами к другой толщине [1, 2, 5, 6, 7, 8].

Отклонения от монотонности формы становятся зонами резкого повышения напряжений. Примером может служить растяжение полосы с отверстием, в котором равномерное распределение нормальных напряжений в поперечном сечении становится вблизи отверстия не равномерным – у краев отверстия возникают пики напряжений (рис. 4.1). В теории упругости показано, что напряженное состояние в зоне отверстия является двухосным, а на контуре отверстия – одноосным.

Растягивающие напряжения в точке В (рис. 4.1) равны $3\sigma_x$, в точке С возникают сжимающие напряжения, равные приложенному напряжению σ_x . При сжатии полосы картина распределения напряжений сохраняется, только изменяются знаки напряжений. В точке В будут сжимающие напряжения, равные $3\sigma_x$, в точке С – растягивающие напряжения σ_x (рис. 4.1). Зона распространения повышенных напряжений ограничивается областью, непосредственно прилегающей к отверстию, в связи с этим их называют местными. Аналогичные явления наблюдаются при изгибе и кручении.

Рост напряжений, связанный с формой упругого тела, называется концентрацией напряжений, а область тела с резким изменением формы называется концентратором напряжений (иногда надрезом).

Концентрация напряжения особенно опасна в деталях, изготовленных из малопластичных материалов и в особенности при

переменных нагрузках. Задачи о распределении напряжений в зонах концентрации напряжения решаются методами теории упругости или исследуются экспериментально.

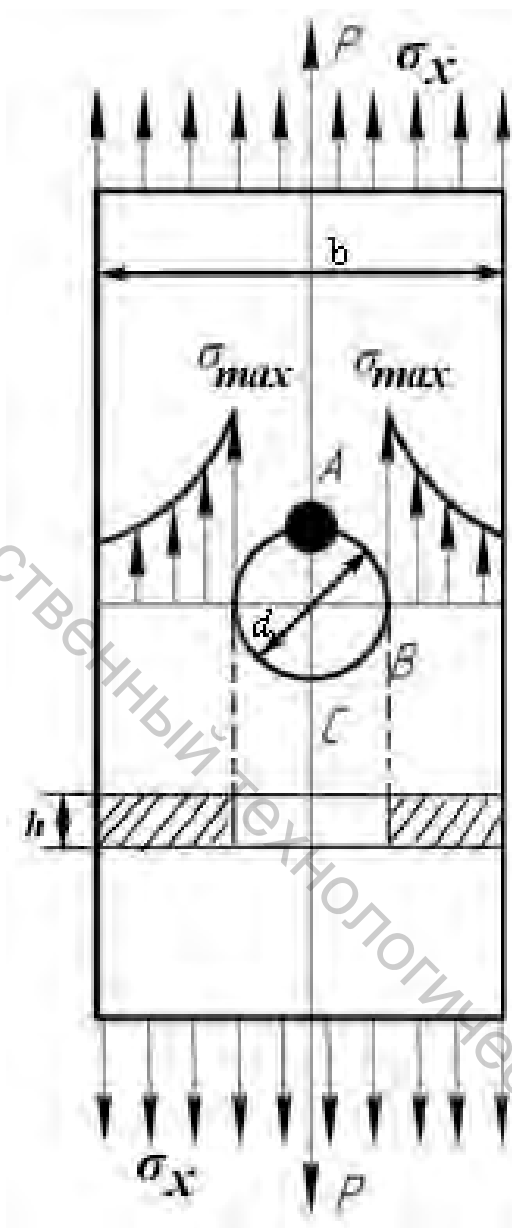


Рисунок 4.1 – Эпюры напряжений в растяжении полосы с отверстием

Для практических расчетов вводится теоретический коэффициент концентрации напряжений α_σ , представляющий собой отношение максимальных σ_{max} к номинальным σ_{nom} напряжениям: $\alpha_\sigma = \sigma_{max} / \sigma_{nom}$, номинальные напряжения $\sigma_{nom} = N / A_{net}$ определяются здесь без учета концентрации напряжений. N – продольная сила в сечении; A_{net} – площадь поперечного сечения полосы, уменьшенная за

счет отверстия («нетто-сечение»): $A_{net} = (b-d)h$. В этой формуле b – ширина полосы; h – толщина полосы; d – диаметр отверстия.

Однако, как показывают эксперименты и точные решения задач теории упругости, местные напряжения, вызванные концентратором, быстро затухают по мере удаления от концентратора и на расстояниях порядка ширины сечения распределение напряжений в нем можно считать, практически, равномерным. Отмеченное свойство – частный случай известного принципа Сен-Венана.

Распределение местных (локальных) напряжений у поверхности концентратора напряжений находится с помощью электротензометров.

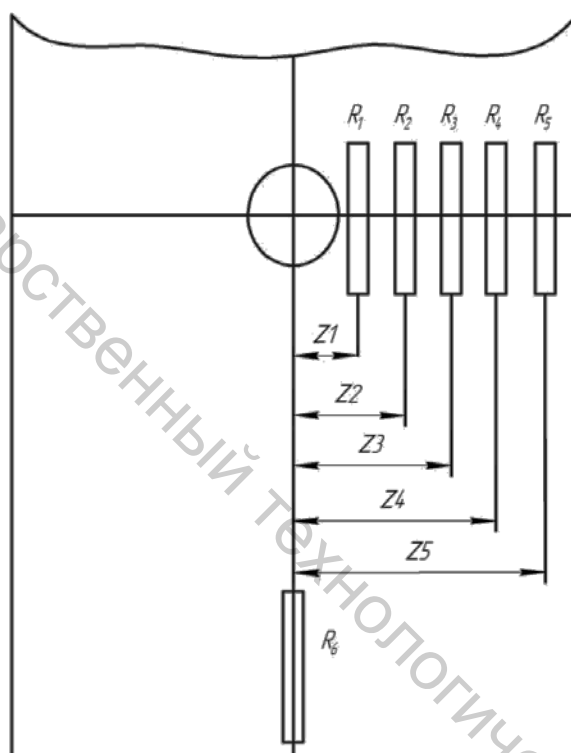


Рисунок 4.2 – Тензорезисторы на образце с отверстием

В захватах машины закрепляется образец – стальная полоса с отверстием и наклеенными на нее с некоторым шагом тензорезисторами (рис. 4.2). Все тензорезисторы (далее тензометры) – с малой базой и одинаковым сопротивлением. Для тарировки один тензометр R_6 наклеивается вдоль оси полосы на значительном расстоянии от отверстия. Для регистрации показаний тензометров используют соответствующую измерительную систему. Заметим, что перед испытанием измеряют образец и определяют допускаемую нагрузку по формуле

$$[P] = A_{net} \frac{\sigma_T}{n_T \alpha_\sigma},$$

где n_T – коэффициент безопасности; α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений; σ_T – предел текучести материала. Величины n_T и σ_T задаются преподавателем, принимается $\alpha_\sigma = 3$. Нагружают полосу предварительной нагрузкой P_0 , составляющей 10–12 % от $[P]$, и записывают показания тензометров в таблицу 4.1, набранную в Microsoft Excel. После этого догружают полосу до нагрузки P_{90} , составляющей 90–100 % от допустимой нагрузки $[P]$. Превышать эту нагрузку нельзя. Соответствующие показания тензометров записываются в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Показания тензометров (рис. 4.2)

Показания табло измерительной системы	Тензометры					
	1	2	3	4	5	6
Начальные показания n_0 $\sigma_0 = \dots$ усл. ед						
Конечные показания n_i						
$n = n_i - n_0$						

4.2 Результаты испытаний

1. Полученные данные (табл. 4.2) обрабатывают следующим образом.

2. Подсчитывают приращения показаний каждого тензометра при соответствующих приращениях нагрузки.

Вычисляют тарировочный коэффициент прибора в единицах напряжения $\sigma_0 = \sigma_n^0 / n_6$, где напряжение в поперечном сечении полосы с тензометром $R_6 - \sigma_n^0 = (P_i - P_0) / (b \cdot h)$, $n_6 = n_{i6} - n_{06}$, b и h – ширина и толщина пластины.

3. Вычисляют нормальные напряжения $\sigma_i = n_i \sigma_0$ в точках 1, 2, 3, 4, 5 опасного сечения пластины и результаты расчетов записывают в таблицу 4.2, набранную в Microsoft Excel.

Таблица 4.2 – Нормальные напряжения в опасном сечении

Параметры	Точки опасного сечения					
	1	2	3	4	5	6
Расстояние тензометра z от оси полосы, мм						
Нормальные напряжения σ в точках опасного сечения, МПа						

По вычисленным напряжениям строят эпюру напряжений в сечении, ослабленном отверстием, $\sigma = f(z)$. Коэффициент концентрации напряжений

$$\alpha_{\sigma} = \frac{\sigma_1}{\sigma_{nom}},$$

где σ_1 – напряжение у края отверстия (в точке 1 опасного сечения), полученное в эксперименте.

4.3 Выводы

Если в пластине имеется отверстие, то вблизи него произойдет перераспределение напряжений. Действительно, пустота не может нести нагрузку, напряжение внутри отверстия равно нулю. Зато участки материала около краев отверстия будут перегружены, напряжения в них будут больше среднего σ (среднее напряжение в сечении должно остаться прежним, иначе нарушится равновесие). Такие отверстия, пустоты, уменьшающие площадь сечения, – **концентраторы напряжений**. У острых краев концентратора напряжение возрастает до величины $\sigma_{конц} = \alpha_{\sigma} \cdot \sigma$, где σ – напряжение, создаваемое внешней силой вдали от отверстия. Таким образом, коэффициент α_{σ} играет роль поправочного коэффициента.

Картину напряженного состояния можно представить, используя силовые линии, густота которых пропорциональна напряженности материала (рис. 4.3). Эти линии обходят концентратор, сгущаясь у его краев. Чем меньше радиус в вершине надреза, тем ярче проявляется концентрация напряжений.

Если концентратор напряжений – трещина, положение резко обостряется, поскольку радиус кривизны вершины трещины крайне мал – порядка межатомного расстояния $((2-3) \cdot 10^{-4}$ мкм). Трещина длиной 1 мкм способна понизить прочность тела во много десятков раз.

Иными словами, «сконцентрированное» напряжение у вершины трещины может достигать теоретической прочности на разрыв, приводя к росту трещины.

Разрыв межатомных связей у вершины трещины приводит к увеличению ее длины, и, как следствие, к росту коэффициента концентрации напряжений. Дальнейшая судьба тела с трещиной требует специального исследования. Трещины в теории хрупкого разрушения в определенном смысле аналогичны дислокациям в теории пластической деформации. Они обеспечивают последовательный разрыв межатомных

связей при таких значениях приложенного напряжения, которые на порядок меньше «теоретической» прочности.

Представление о присутствии в твердом теле трещин, сильно снижающих его сопротивление разрыву, было сформулировано английским инженером и ученым А. Гриффитсом еще в 1920 г., задолго до зарождения теории дислокаций.

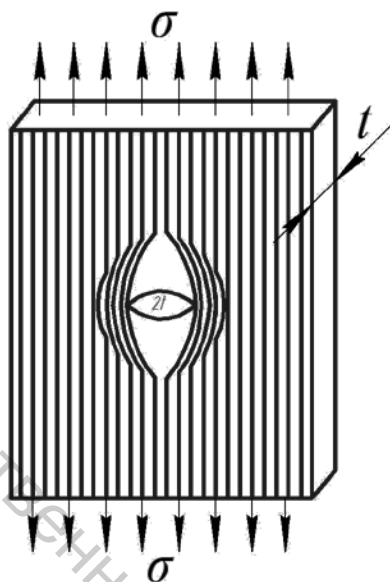


Рисунок 4.3 – Распределение «силовых» линий в растяжении полосы с отверстием

Лабораторная работа 5

Исследование зависимости коэффициента концентрации напряжений от размеров концентраторов

Цель работы: изучение явления концентрации напряжений; определение коэффициента концентрации напряжений; установление зависимости коэффициента концентрации напряжений от размеров концентраторов.

5.1 Постановка опыта

Для испытаний может использоваться любая разрывная машина: УМ-5 (рис. 2.1), P-10, P-20 [4]. Используется стальная полоса прямоугольного сечения (рис. 5.1) с тремя отверстиями d_1 , d_2 , d_3 и четырьмя вырезами радиусами r_1 , r_2 , r_3 , r_4 , которые являются концентраторами напряжений.

Явление концентрации напряжений состоит в резком росте напряжений у края концентратора. Для его изучения следует использовать малогабаритные тензорезисторы, так как вблизи концентратора напряжения изменяются крайне быстро. В опыте используются уникальные фольговые тензорезисторы $T1...T9$ с базой a , равной 1 мм, и омическим сопротивлением, примерно, 80 Ом.

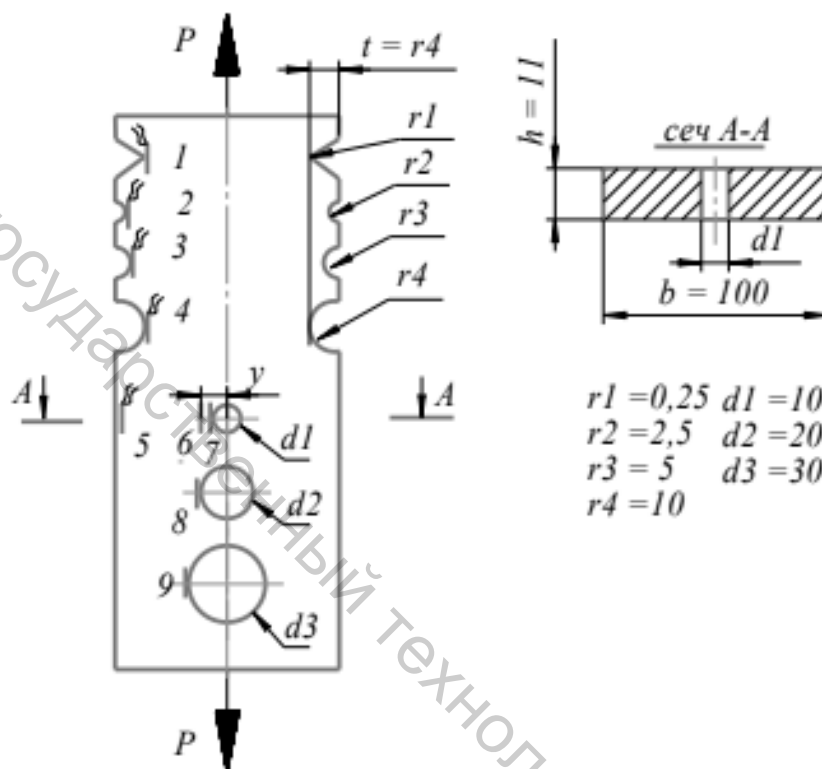


Рисунок 5.1 – Растяжение пластины с концентраторами напряжений

Тензорезисторы $T1...T4$ предназначены для сравнения теоретического коэффициента концентрации в зависимости от вида и размеров концентратора – выреза, тензорезисторы $T5...T7$ – для определения распределения напряжений (эпюры σ) в сечении с концентратором – отверстием $d1$, тензорезисторы $T7...T9$ – для установления зависимости коэффициента концентрации напряжений от размеров концентратора ($d1, d2, d3$). Съём показаний тензорезисторов осуществляется на тензометрической аппаратуре типов ИСД-3, ИД-70, ЦТМ-100. Цены делений шкал приборов в ЕОД $\varepsilon_0 = 1 \cdot 10^{-5}$, в ЦДТ $\varepsilon_0 = 2$ МПа.

5.2 Порядок проведения опыта

Предварительно нагружаем образец нагрузкой $P_0 = (4...5) \text{ кН} = (400...500) \text{ кгс}$ и записываем показания всех тензорезисторов. Величина ступени нагрузки $P = (7...12) \text{ кН} = (700...1200) \text{ кгс}$. Нагружаем принятой ступенью нагрузки 3–4 раза. На каждой ступени нагружения записываем показания тензорезисторов и заносим их в таблицу испытаний, содержащей колонку для нагрузок и девять колонок для показаний тензорезисторов и, соответственно, столько же колонок для их приращений. Рекомендуется расположить таблицу на листе альбомной ориентации.

5.3 Обработка результатов опыта

Вычисляются средние приращения показаний (ΔT) каждого тензорезистора. Используя их, вычисляем напряжения по закону Гука

$$\sigma = E\varepsilon = E(\Delta T)\varepsilon_0, \quad (5.1)$$

где ε_0 – цена деления шкалы тензометрической установки.

5.4 Теоретическая часть работы

Эффект концентрации напряжений оценивается теоретическим коэффициентом концентрации напряжений

$$\alpha_\sigma = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\text{ном}}}, \quad (5.2)$$

где σ_{\max} – наибольшее напряжение у края концентратора; $\sigma_{\text{ном}}$ – расчетное напряжение, определяемое по формулам сопротивления материалов. В нашем случае номинальные напряжения

$$\sigma_{\text{ном}} = \frac{N}{A_{\text{нетто}}}, \quad (5.3)$$

где $A_{\text{нетто}}$ – фактическая площадь поперечного сечения; $N = \Delta P = P$ – принятое значение ступени нагрузки.

Явлению концентрации напряжений не дано физического обоснования, оно проявляется в опытах. Главная цель этой

лабораторной работы – установить факт концентрации напряжений. Большинство концентраторов не описано теоретически. Однако для случая отверстия в пластине при соотношении

$$B/2r \geq 10, \quad (5.4)$$

B – ширина пластины, r – радиус отверстия, имеется решение теории упругости: теоретический коэффициент концентрации напряжений

$$\alpha_{\sigma} = \frac{1}{2} \left(1 + 2 \frac{r^2}{y^2} + 3 \frac{r^4}{y^4} \right), \quad (5.5)$$

где y – расстояние от центра отверстия до точки, в которой определяется напряжение. Из трёх отверстий лабораторной работы это условие применимо только для отверстия диаметром $d1 = 10$ мм (в этом случае $B/2r = 100/10$).

Используя формулу (5.5) вычислите теоретические напряжения σ_{max} в точках наклейки $T5...T7$. Для отверстий диаметром $d2, d3$ значения α_{σ} взять из учебника [1] (табл.5.1).

Таблица 5.1 – Сравнительная оценка эффекта концентрации напряжений для отверстий разного диаметра по результатам опыта

Диаметр отверстия	d1 = 10 мм	d2 = 20 мм	d3 = 30 мм
σ_{nom} , МПа			
σ_{max} , МПа			
α_{σ} – опыт.			
α_{σ} – теор.	3,03	3,14	3,36

5.5 Подготовка отчета

В отчет о работе включить ответы на все вопросы пункта 6. Дополнительно изобразить эпюру нормальных напряжений σ в сечении с первым концентратором $d1$ (для правой половины сечения принять форму эпюры, согласно симметрии, такой же, как для левой половины сечения). Для сравнительной оценки и анализа результатов опыта рекомендуется составить таблицы 5.1 и 5.2.

Таблица 5.2 – Сравнительная оценка концентраторов вырезов разного вида и размеров по результатам опыта

Вид концентратора	r1 = 0,25	r2 = 5	r3 = 10	r4 = 20
α_{σ}				
σ_{nom} , МПа				
σ_{max} , МПа				

5.6 Контрольные вопросы

1. Что называется концентратором напряжений?
2. Приведите несколько примеров концентраторов напряжений в деталях машин (болт, вал и др.).
3. В чем заключается явление концентрации напряжений?
4. В чем отличие между теоретическим α_σ и эффективным коэффициентом K_σ концентрации напряжений?
5. Какое напряжение называют номинальным? По каким формулам оно рассчитывается при растяжении, изгибе, кручении?
6. Каким образом можно уменьшить концентрацию напряжений?
7. Следует ли учитывать влияние на прочность концентрации напряжений в пластичных материалах (в стали, например, малоуглеродистой) в нормальных условиях и при сравнительно низких температурах?
8. Следует ли учитывать влияние на прочность концентрации напряжений в нормальных условиях и при сравнительно низких температурах в случае хрупких материалов, например, в случае чугуна?
9. Как выглядит эпюра напряжений в сечении с учетом концентрации напряжений, в чем ее отличие от эпюры напряжений в отсутствие концентратора напряжений?
10. Какие способы снижения влияния концентрации напряжений на прочность вам известны?
11. Зависит ли теоретический коэффициент концентрации напряжений для одного и того же концентратора от вида нагружения (при изгибе, растяжении, кручении)?
12. Какой вид нагружения (изгиб, растяжение, кручение) сильнее сказывается на эффекте концентрации напряжений?

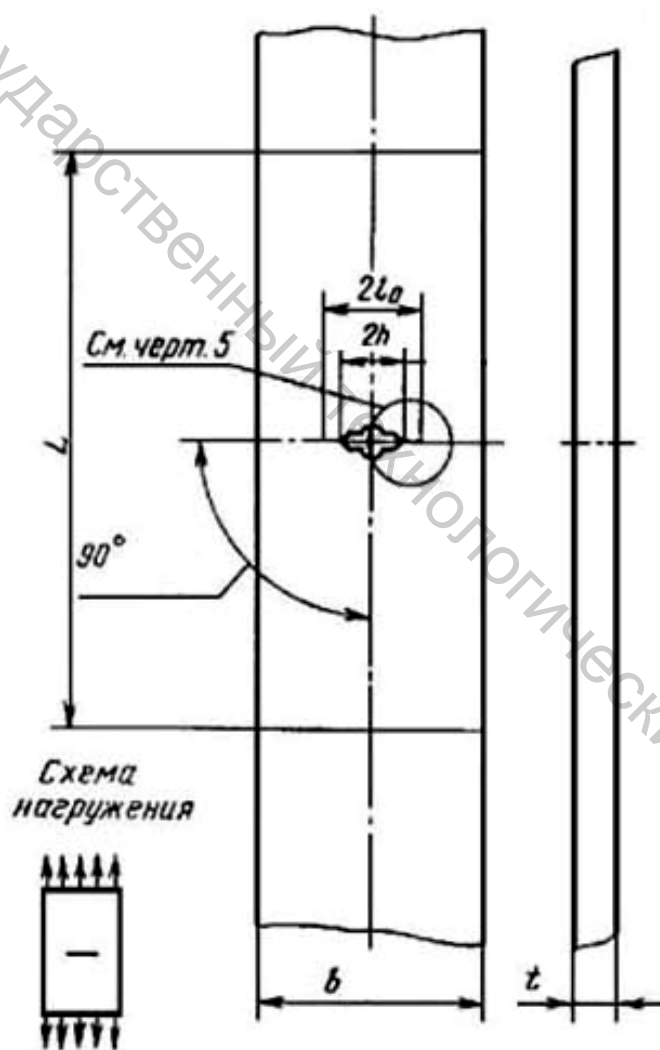
II ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ

Лабораторная работа 6

Общие положения при испытаниях на трещиностойкость

Цель работы: ознакомление с образцами, способами измерения смещений и прогибов.

6.1 Испытательное оборудование



L - расстояние между частями образца, служащими для крепления в захватах;
 $b > 8t$; $2h \approx (0,25 - 0,35)b$; $L > 2b$; $2La \approx (0,3 - 0,5)b$.

Рисунок 6.1 – Образец типа 1 для определения характеристик трещиностойкости

Для определения характеристик трещиностойкости используют машины с механическим, гидравлическим или электрогидравлическим приводом, метрологические параметры которых соответствуют ГОСТ 7855-84.

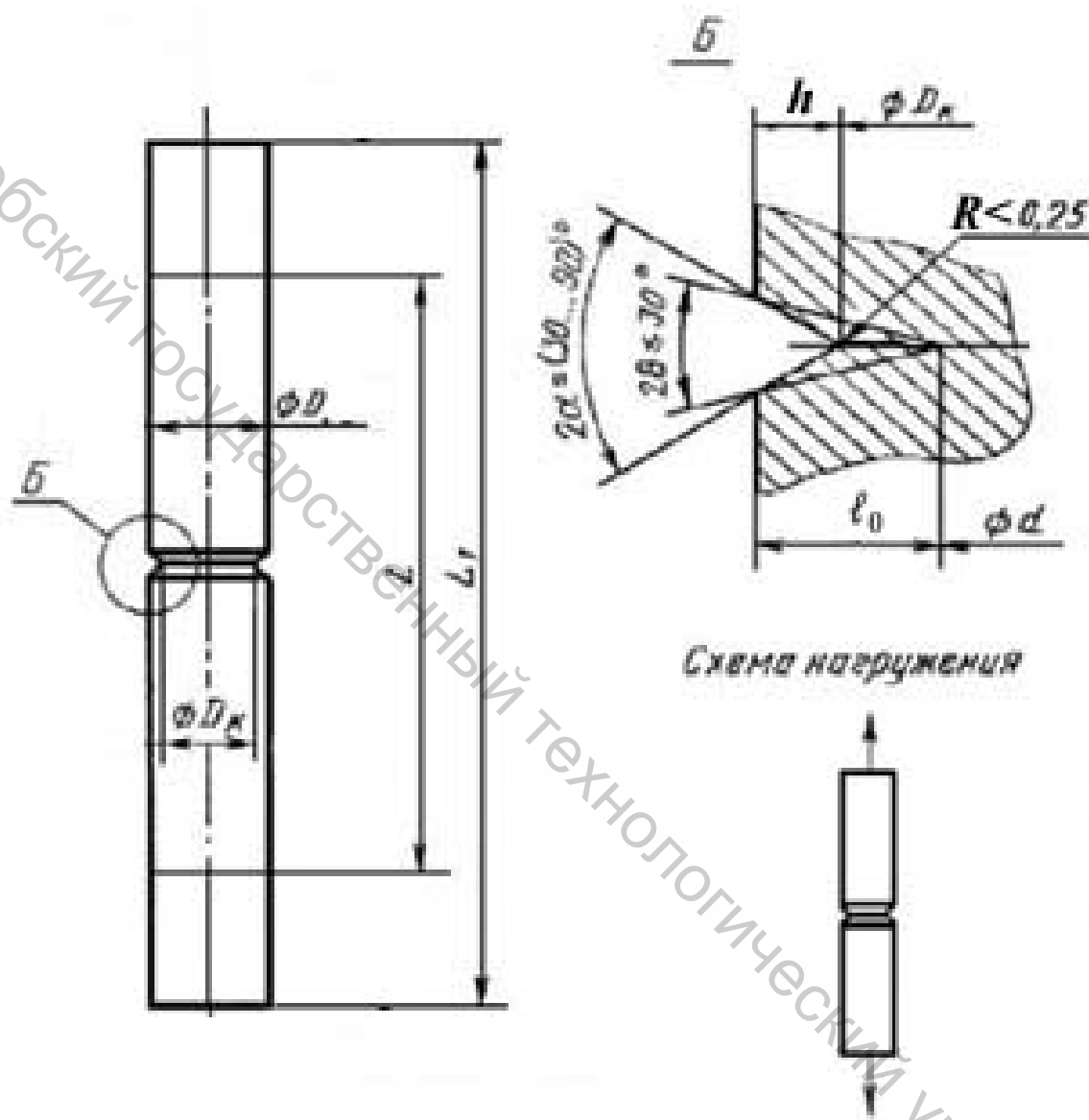


Рисунок 6.2 – Образец типа 2 для определения характеристик трещиностойкости

Необходимое наибольшее усилие, развиваемое испытательной машиной, находится по формулам, взятым из ГОСТ 25.506-85 и книги [9]: 1) для образцов типа 1 – $P_{max} \geq 0,5(b - 2l)t(\sigma_{0.2} + \sigma_B)$; 2) для образцов типа 2 – $P_{max} \geq 0,4d^2 (\sigma_{0.2} + \sigma_B)$; 3) для образцов типа 3 – $P_{max} \geq 0,2 (b - l)t(\sigma_{0.2} + \sigma_B)$; 4) для образцов типа 4 – $P_{max} \geq 0,1(b - l)^2 t(\sigma_{0.2} + \sigma_B)/b$.

Витебский государственный технологический университет

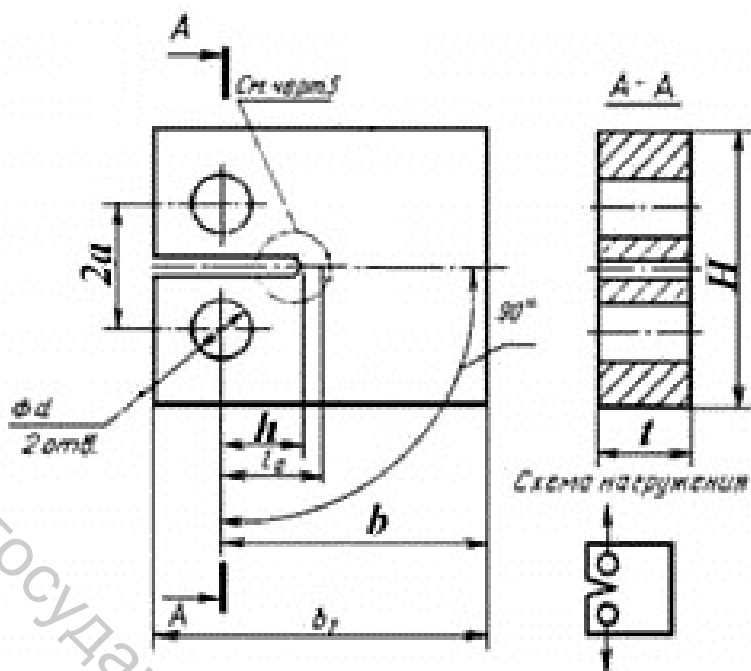


Рисунок 6.3 – Образец типа 3 для определения характеристик трещиностойкости

6.2 Геометрия образцов

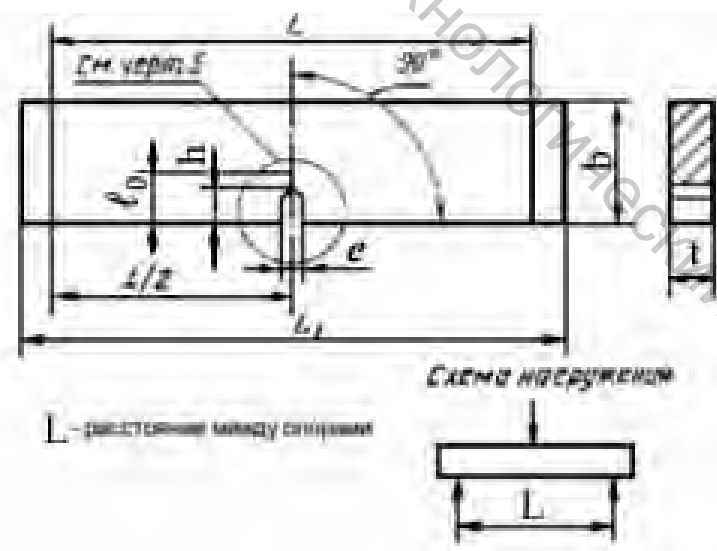


Рисунок 6.4 – Образец типа 4 для определения характеристик трещиностойкости

Для определения характеристик трещиностойкости применяют, согласно ГОСТ 25.506-85 [9], следующие образцы:

1) **типа 1** – плоский прямоугольный с центральной трещиной для испытаний на осевое растяжение (рис. 6.1);

2) **типа 2** – цилиндрический с кольцевой трещиной для испытаний на осевое растяжение (рис. 6.2);

3) **типа 3** – прямоугольный компактный образец с краевой трещиной для испытаний на внецентренное растяжение (рис. 6.3);

4) **типа 4** – плоский прямоугольный образец с краевой трещиной для испытаний на трехточечный изгиб (рис. 6.4).

На рисунках 6.1–6.4 показаны соотношения размеров образцов и схемы нагружения. Рекомендуются следующие размеры образцов: типа 1 – ширина b не менее 50 мм; типа 2 – диаметр D не менее 12 мм; типа 3 – толщина t не менее 20 мм; типа 4 – толщина t не менее 10 мм.

В образцах типов 1 и 2 форму и размеры частей, служащих для крепления и нагружения, определяют после выбора конструкции захватов. Размер h назначают в зависимости от способа изготовления надреза и крепления образца, так чтобы он не разрушился в захватах.

Иницирующие надрезы в образцах различных типов показаны на рисунке 6.5. Образцы типа 1 снабжаются надрезами вида 1а, 2а, 3, образцы типов 3 и 4 надрезами вида 1б, 2б.

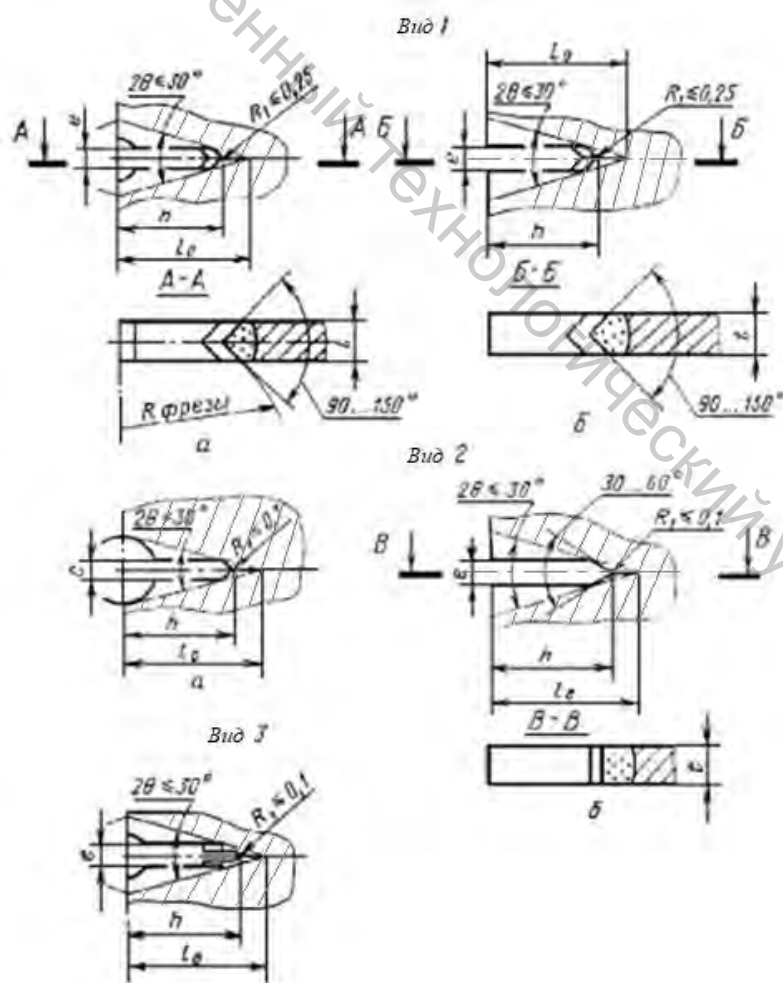


Рисунок 6.5 – Схемы надрезов образцов

Усталостную трещину наносят таким образом, чтобы контур надреза находился между прямыми, пересекающимися под углом 20–30° в вершине трещины (рис. 6.5), а разность ($l_0 - h$) была не меньше 1,5 мм. Усталостные трещины в плоских образцах типов 1, 3 и 4 наносят при переменном растяжении с коэффициентом асимметрии цикла $R = 0,1-0,2$, в образцах типа 2 – при круговом изгибе $R = -1$. При этом регистрируют минимальные и максимальные усилия цикла и число циклов.

Номинальные напряжения σ_0 при максимальном усилии цикла должны быть не больше $0,5 \sigma_{0,2}$ ($\sigma_{0,2}$ определяют при температуре, при которой наносят усталостные трещины). Рекомендуемое число циклов нагружения при нанесении усталостной трещины – не меньше $5 \cdot 10^4$.

6.3 Измерения смещений и прогибов

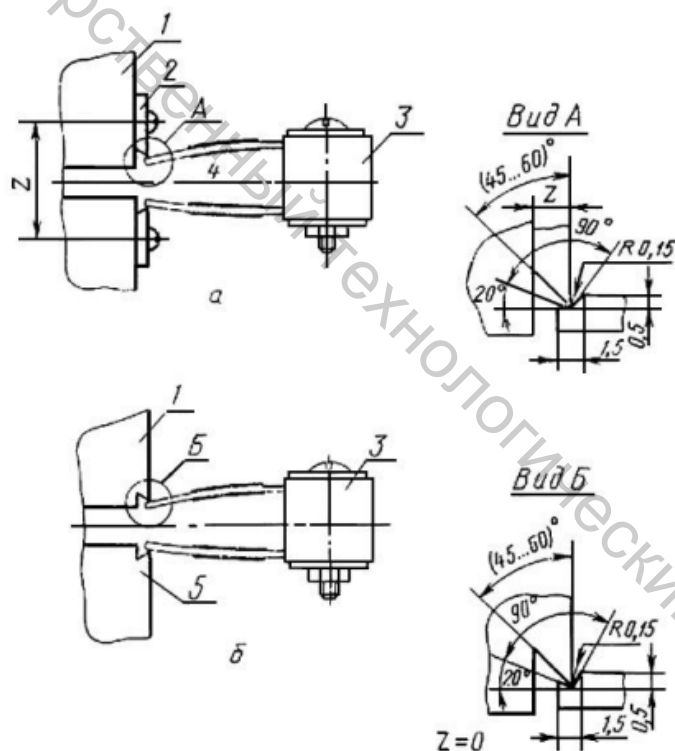


Рисунок 6.6 – Установка консольных датчиков на образцах:

- 1 – образец; 2 – накладные опорные призмы; 3 – датчик смещения;
4 – плоскость надреза; 5 – призматические отступы

Для измерения смещений v или прогибов f применяют двухконсольные датчики тензорезисторного типа. Захватные части датчиков, способы их установки на образцах и размеры элементов датчиков в зоне их крепления приведены на рисунке 6.6. Установку датчиков смещения на образцах типов 1–4 осуществляют с помощью

накладных опорных призм (рис. 6.6 а) или на призматических выступах, изготовленных на торцах образцов (рис. 6.6 б). Двухконсольный датчик прогиба f для образцов типа 4 устанавливается на опорных призмах, одна из которых жестко закреплена на нагружающем ноже, а другая на траверсе испытательной машины. Датчики смещений v или прогибов f , а также устройства для записи диаграмм $P-v$ и $P-f$ должны обеспечивать тангенс угла наклона линейного участка диаграмм $P-v$ и $P-f$ к оси v или f в пределах 1-3; масштаб диаграммы по оси v и f не менее 25:1.

При испытаниях по определению характеристик K_{IC} (см. Лабораторную работу 7) масштаб по оси v увеличивают не менее чем в два раза по сравнению с приведенным выше. При испытании образцов типа 4 номинальные диаметры опорных роликов и центрального нагружающего ножа должны быть равны $b/3$.

Лабораторная работа 7

Определение характеристик трещиностойкости металлов при однократном статическом нагружении

Цель работы: оценка трещиностойкости металлов при однократном статическом кратковременном нагружении на образцах толщиной не менее 1 мм при температуре от минус 269 °С до плюс 600 °С (согласно ГОСТ 25.506-85 [9]).

7.1 Содержание работы

Испытывают образцы с предварительно нанесенной усталостной трещиной. Проведение эксперимента сопровождается записью диаграмм «нагрузка-смещение» ($P-f$) или «нагрузка-прогиб» ($P-v$). Нагружение образца производят вдоль оси симметрии трещины (трещина типа 1).

По результатам испытаний определяют следующие основные характеристики трещиностойкости:

1) силовые – критические коэффициенты интенсивности напряжений K ;

2) деформационные – раскрытие в вершине трещины δ_C ;

3) энергетические – критические значения J -интеграла J_c или J_{IC} .

Трещиностойкость металлов оценивают по одной или нескольким величинам K_{IC} , K_c^* , K_{QT} , K_c , δ_C , $J_c(J_{IC})$. Основная характеристика трещиностойкости материала – коэффициент K_{IC} .

Определяемые по настоящему стандарту характеристики трещиностойкости могут быть использованы наряду с другими механическими характеристиками:

1) для сравнения вариантов химического состава, технологических процессов изготовления, обработки и контроля качества металлов и сплавов;

2) для сопоставления материалов при обосновании выбора их для машин и конструкций;

3) для расчетов на прочность несущих элементов конструкций с учетом их дефектов, геометрических форм и условий эксплуатации и анализа причин аварий и разрушения конструкций.

При определении характеристик K_{Ic} , K_{Ic} , K_{QI} , K_{Ic}^* испытания образцов (типов 1–4) доводят до разрушения с регистрацией диаграмм $P-v$. Возможные четыре типа таких диаграмм показаны схематически на рисунке 7.1.

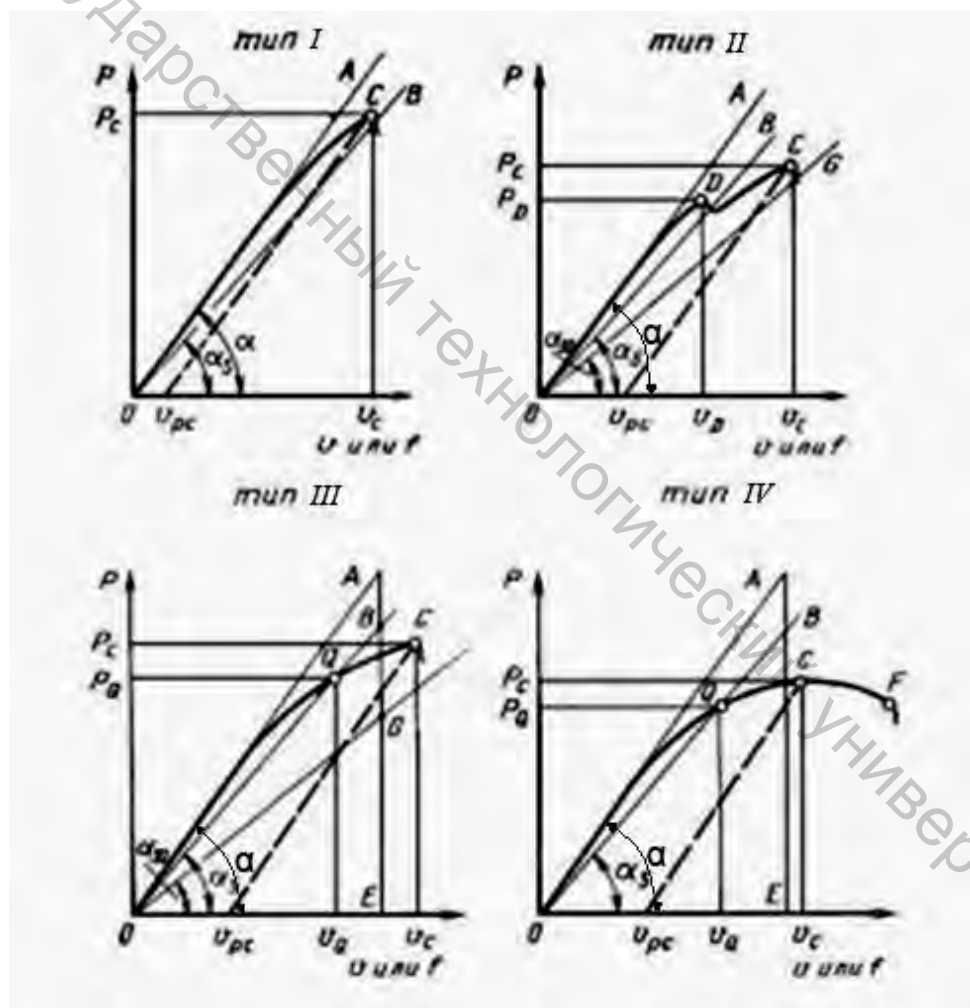


Рисунок 7.1 – Характерные типы диаграмм $P-v$

1. Диаграмма типа I характеризуется расположением вершины (точка C) левее прямой OB , наклоненной к оси v (или f) под углом α_5 ,

его тангенс на 5 % меньше тангенса угла α наклона касательной ОА к начальному линейному участку диаграммы. Разрушению образца отвечает точка С.

2. Диаграмма типа II характеризуется наличием локального максимума нагрузки (точка D), находящегося левее прямой ОВ. Разрушению образца отвечает точка С, расположенная левее прямой ОG, наклоненной к оси v (или f) под углом α_{30} , его тангенс на 30 % меньше тангенса угла наклона касательной ОА (угла α).

3. Диаграмма типа III характеризуется наличием максимума нагрузки (точка С), соответствующего разрушению образца, лежащего левее прямой ОG.

4. Диаграмма типа IV представляет собой кривую с максимумом нагрузки в точке С. Но разрушению образца отвечает точка F, расположенная правее точки С.

Характеристики трещиностойкости материалов определяются по силам P_Q , P_D или P_C , соответствующим характерным точкам Q, D и C кривых различных типов (рис. 7.1).

7.2 Формулы для коэффициентов интенсивности напряжений

Из диаграмм $P-v$ находят нагрузки P_Q , P_D и P_C , ориентируясь на характерные типы этих диаграмм, показанные на рисунке 7.1. Сила P_Q принимается за расчетную. Для диаграммы вида I принимают $P_Q = P_C$; для диаграммы вида II $P_Q = P_D$; для диаграмм вида III и IV – нагрузки P_Q . Их находят в точке пересечения диаграмм с пятипроцентной секущей ОВ. По значениям P_Q вычисляют вспомогательные коэффициенты интенсивности напряжений K_Q по формулам для коэффициентов интенсивности K (K_1):

1) для образца **типа 1** ($0,3b \leq 2\ell \leq 0,5b$)

$$K_Q = \frac{P_Q}{t\sqrt{b}} Y_1, Y_1 = \left[1 + 2.308 \left(\frac{2\ell}{b} \right) + 2.439 \left(\frac{2\ell}{b} \right)^2 \right]; \quad (7.1)$$

2) для образца **типа 2** ($0,6D \leq d \leq 0,7D$ и $2s < 0,08$)

$$K_Q = \frac{P_Q}{D^{\frac{3}{2}}} (Y_2' + Y_2''), Y_2' = 6.53 \left[1 - 1.8167 \left(\frac{d}{D} \right) + 0.9167 \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right];$$

$$Y_2'' = 3.1 \frac{2s}{d}; \quad (7.2)$$

3) для образца **типа 3** ($0,45b \leq \ell \leq 0,55b$)

$$K_Q = \frac{P_Q}{t\sqrt{b}} Y_3, Y_3 = 13.74 \left[1 - 3.38 \left(\frac{\ell}{b} \right) + 5.572 \left(\frac{\ell}{b} \right)^2 \right]; \quad (7.3)$$

4) для образца **типа 4** ($0.45b \leq \ell \leq 0.55b$)

$$K_Q = \frac{P_Q \ell}{tb^2} Y_4, Y_4 = 3.494 \left[1 + 3.396 \left(\frac{\ell}{b} \right) + 5.939 \left(\frac{\ell}{b} \right)^2 \right]. \quad (7.4)$$

Значения функций $Y_1, Y_2', Y_2'', Y_3, Y_4$ в формулах (7.1–7.4) см в таблицах 7.1–7.3.

Таблица 7.1 – Поправочные функции Y_1 для образцов типа 1

2 ℓ/b	Y_1	2 ℓ/b	Y_1	2 ℓ/b	Y_1	2 ℓ/b	Y_1
1	2	3	4	5	6	7	8
0.3	0.727	0.35	0.8	0.4	0.879	0.45	0.962
0.305	0.734	0.355	0.808	0.405	0.887	0.455	0.971
0.310	0.741	0.360	0.816	0.410	0.895	0.46	0.980
0.315	0.748	0.365	0.824	0.415	0.904	0.465	0.988
0.32	0.756	0.37	0.832	0.42	0.912	0.47	0.997
0.325	0.763	0.375	0.839	0.43	0.928	0.480	1.014
0.335	0.778	0.385	0.855	0.435	0.937	0.485	1.024
0.34	0.785	0.39	0.863	0.44	0.945	0.49	1.032
0.345	0.793	0.395	0.871	0.454	0.495	0.495	1.041
						0.5	1.05

Таблица 7.2 – Поправочные функции Y_2', Y_2'' для образцов типа 2

d/D	Y_2'	d/D	Y_2'	2 s/d	Y_2''
0,600	1,57	0,650	1,35	0	0
0,605	1,54	0,655	1,33	0,01	0,03
0,610	1,52	0,660	1,31	0,02	0,06
d/D	Y_2'	d/D	Y_2'	2 s/d	Y_2''
0,615	1,50	0,665	1,29	0,03	0,09
0,620	1,47	0,670	1,27	0,04	0,12
0,625	1,45	0,675	1,25	0,05	0,16
0,630	1,43	0,680	1,23	0,06	0,19
0,635	1,41	0,685	1,21	0,07	0,22
0,640	1,39	0,690	1,19	0,08	0,25
0,645	1,37	0,695	1,17		
		0,700	1,16		

Таблица 7.3 – Поправочные функции Y_3 , Y_4 для образцов типа 3 и 4

ℓ/b	Y_3	Y_4	ℓ/b	Y_3	Y_4
0,450	8,34	2,29	0,500	9,66	2,66
0,455	8,46	2,32	0,505	9,81	2,70
0,460	8,58	2,35	0,510	9,97	2,75
0,465	8,70	2,39	0,515	10,13	2,79
0,470	8,82	2,42	0,520	10,29	2,84
0,475	8,95	2,46	0,525	10,46	2,89
0,480	9,09	2,50	0,530	10,63	2,94
0,485	9,22	2,54	0,535	10,81	2,99
0,490	9,37	2,58	0,540	10,99	3,04
0,495	9,51	2,62	0,545	11,17	3,09
			0,550	11,36	3,14

7.3 Результаты испытаний. Измерение длины трещины

Длину ℓ в плоских образцах типов 1, 3, 4 находят по излому как среднее арифметическое не менее чем в трех точках на контуре (фронте) усталостной (исходной) трещины, расположенных через равные промежутки по толщине образца, исключая боковые поверхности (рис. 7.2 а).

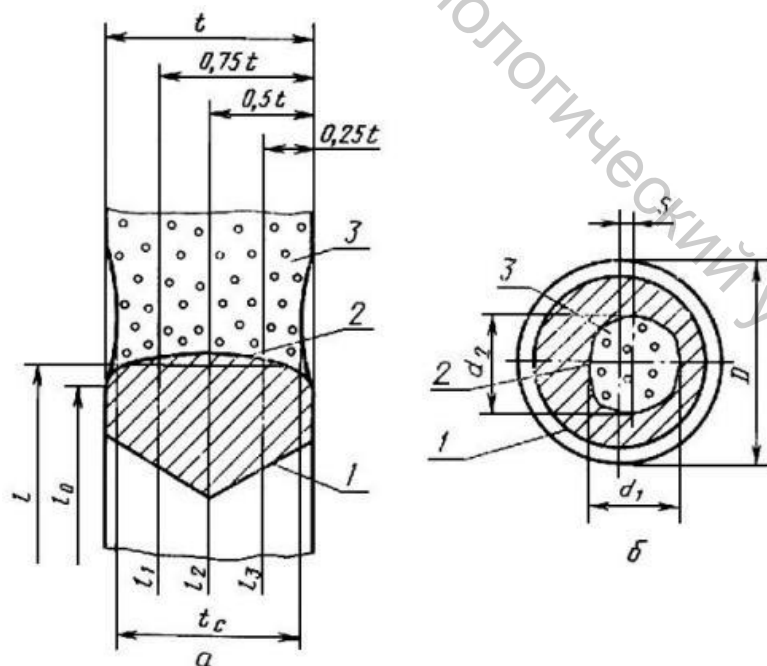


Рисунок 7.2 – Схемы изломов: а – плоских образцов типов 1, 3 и 4, б – цилиндрического образца типа 2: 1 – граница надреза; 2 – контур усталостной трещины; 3 – статический долом

В образце типа 2 измеряют расстояние s между центрами поперечного сечения и статического долома образца, а также диаметры контура усталостной трещины в двух взаимно перпендикулярных направлениях d_1 , d_2 и вычисляют их среднее значение d (рис. 7.2, б).

Статический (медленный) подрост трещины A вычисляют как среднее арифметическое измерений не менее чем в пяти точках на контуре подросшей трещины, расположенных на равных промежутках по толщине образца, исключая боковые поверхности.

7.4 Критические коэффициенты интенсивности напряжений

Сначала вычисляют вспомогательный коэффициент K_Q по формулам (7.1–7.4), в которые подставляют силу P_Q . Величина K_Q дает вязкость разрушения K_{Ic} для плоских образцов, если удовлетворяются условия корректности (достоверности): $P_c < 1,1 P_Q$ и вместе с этим (дополнительно) $t \geq 2,5 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{0,2}} \right)^2$ и $\frac{t-t_c}{t} 100\% \leq 1,5 \%$ или $V_c \leq 1,2V_Q$. Для чугуна коэффициент 2,5 заменяют на 0,6.

Для цилиндрических образцов условия достоверности аналогичны, но первое дополнительное условие записывается в виде:

$$D \geq 2,3 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{0,2}} \right)^2 \text{ и } d \geq 1,6 \left(\frac{K_Q}{\sigma_{0,2}} \right)^2.$$

Условия достоверности ограничивают размеры пластической зоны перед вершиной трещины. Это нужно для уверенности в хрупком состоянии образца при разрушении. Тогда можно считать, что вязкость разрушения K_{Ic} – характеристика материала, будь то образец или деталь.

Если условия достоверности определения K_{Ic} не удовлетворяются, следует испытывать образцы большей толщины. Если это не представляется возможным, придется ограничиться величиной K_Q или воспользоваться другими коэффициентами, приводимыми далее.

Значения K_c^* вычисляют по формулам (7.1–7.4), но с заменой P_Q на P_c . Полученные значения K_Q принимают равными K_c^* без проверки на достоверность. По определению эта величина – предел трещиностойкости I_c при $\ell/b = 0,5$ (в согласии с чертежом образца).

Нетто-напряжение σ_{c0} , соответствующее точке Q:

$$\text{для образцов типа 1 } \sigma_{c0} = \frac{P_Q}{(b-2\ell)t};$$

для образцов типа 2 $\sigma_{c0} = \frac{4P_Q}{\pi d^2}$;

для образцов типа 3 $\sigma_{c0} = \frac{P_Q}{(b-\ell)t} \left[1 + \frac{3(b+\ell)}{b-\ell} \right]$;

для образцов типа 4 $\sigma_{c0} = \frac{6P_Q b}{(b-\ell)^2 t}$.

Вычисление K_c (при $\sigma_{c0} < 0,8\sigma_{0,2}$) ведут по формулам (7.1–7.4) с заменой P_Q на P_c . В формулы (7.1–7.4) при вычислении K_{Ic} , K^*_c , K_c подставляют длину исходной усталостной трещины, замеренную на изломе образца так, как указано выше.

Вычисление $K_{от}$ (при $\sigma_{c0} < 0,8\sigma_{0,2}$) ведут по формулам (7.1–7.4) по силе P_Q . Длину трещины в эти формулы подставляют с учетом пластической поправки Ирвина

$$\ell_T = \ell + \frac{1}{\gamma\pi} \left(\frac{K_Q}{\sigma_{0,2}} \right)^2,$$

где $\gamma = 210t^* + 1.8$ (при t^* от 10^3 до $20 \cdot 10^3$) и $\gamma = 6$ (при t^* больше $20 \cdot 10^3$); t^* – безразмерное число, равное толщине, выраженной в метрах. Коэффициент γ учитывает переход от плоского напряженного состояния к плоской деформации.

7.5 Раскрытие вершины трещины

Величину пластического раскрытия трещины вычисляют для точек С диаграмм P-v (рис. 7.1):

1) для образцов типов 1 и 2

$$\delta_c = \frac{K_c^{*2}(1-\mu^2)}{2\sigma_{0,2}E} + \nu_{pC}; \quad (7.5)$$

2) для образцов типа 3

$$\delta_c = \frac{K_c^{*2}(1-\mu^2)}{2\sigma_{0,2}E} + \frac{(b-\ell)}{3z+1.75b+2\ell} \nu_{pC}; \quad (7.6)$$

3) для образцов типа 4

$$\delta_c = \frac{K_c^{*2}(1-\mu^2)}{2\sigma_{0,2}E} + \frac{(b-\ell)}{z+0.4b+0.6\ell} \nu_{pC}, \quad (7.7)$$

где K_c^* вычисляется, как указано выше, а v_{pC} находится графически из диаграмм P-v: на диаграмме P-v из точки C проводят прямую, параллельную начальному линейному участку диаграммы, до пересечения с осью v. Абсцисса точки пересечения дает величину v_{pC} . Величина Z (рис. 6.6) – расстояние между торцевой поверхностью образцов типов 3 или 4 и кромками накладных опорных призм.

В формулах (7.5–7.7) первое слагаемое – раскрытие вершины трещины от локального пластического течения в малой окрестности вершины трещины, второе – в результате поворота одной из половин образца как целого относительно другой, ось поворота делит нетто сечение, примерно, посередине.

7.6 Критический инвариантный J-интеграл

Соответствующие испытания проводят на образцах типов 3 или 4. Первый из них доводят до разрушения, при этом находят, к какому типу относится полученная диаграмма. В случае, когда диаграмма деформирования имеет тип I, критическое значение J-интеграла вычисляют по формуле

$$J_c = \frac{(1-\mu^2)(K_c^*)^2}{E} + \frac{A_{pC}}{(b-\ell)t k'} K \quad (7.8)$$

где K_c^* вычисляется, как указано выше; A_{pC} – работа, измеряется пластической частью площади под диаграммой P-v на момент начала роста трещины, которому по предположению отвечает точке C (рис. 7.3); ℓ – исходная длина трещины.

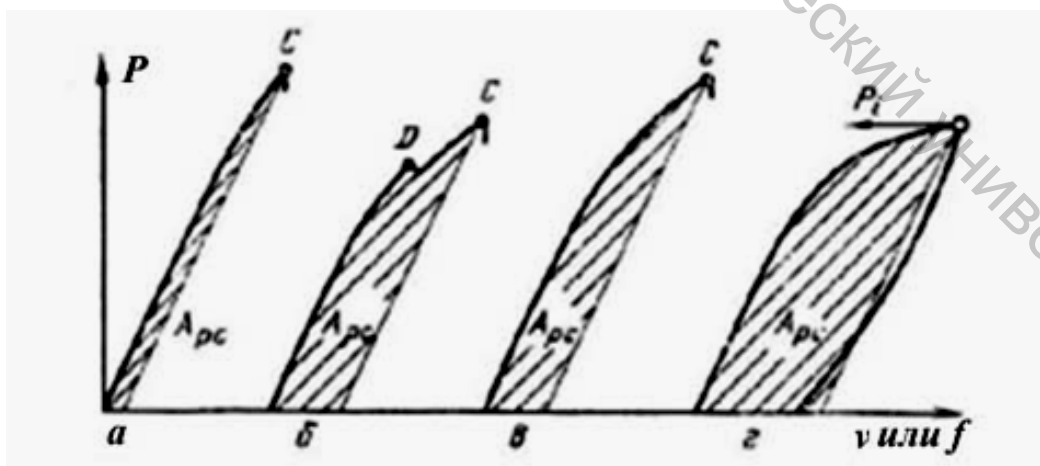


Рисунок 7.3 – Пластическая часть работы (заштрихована) под диаграммой P-v или P-f: а, б, в – для диаграмм I, II, III типа; г – при разгрузке образца

Для определения пластической части площади под диаграммами «P-v» или «P-f» следует из точки С диаграммы провести прямую, параллельную начальному линейному участку диаграммы. Значения К и k в формуле (7.8):

1) для образцов типа 3

$$K = 2 + 0.522 \frac{b - \ell}{b}; k = 1 + \frac{r_v}{\ell + 0.1(b - \ell)}; r_v = 0.25b + z;$$

2) для образцов типа 4 принимают $K=2$, $k=1$.

Если при первичных диаграммах типов II и III повторное испытание другого образца произошло при смещении в пределах от $0,9v_c$ до v_c , то для последнего величину J_c подсчитывают опять же по формуле (7.8).

В случае диаграмм типов II, III или IV начало роста трещины обычно предшествует точке С. При вязком разрушении типична диаграмма типа IV. Где именно на диаграмме находится начало роста трещины, неизвестно. Соответственно точку на диаграмме приходится определять посредством измерения подраста трещины на нескольких образцах (скажем, на пяти-семи одинаковых образцах), ибо трещина медленно растет не только с ростом силы, но и после достижения максимума нагрузки. Каждой точке диаграммы соответствует своя длина растущей трещины. Поэтому один из образцов нагружают минуя точку С (максимум силы), остальные – до сил, отвечающих разным точкам перед точкой С, образцы при этом еще не разрушены. Затем все образцы разгружают и вынимают из испытательной машины. Во всех образцах у трещины разная длина. Образцы ломают, чтобы посмотреть на изломе, насколько выросла трещина. Трещину перед этим следует покрасить (иначе на изломе ее не увидеть). Образец можно нагреть до 300°C , затем сломать и измерить подрост трещины $\Delta\ell$ для каждого из образцов, как сказано выше. Для каждого из них следует вычислить J_i и построить график зависимости J_j от $\Delta\ell$ (J_R – кривую), она будет возрастающей. Экстраполяция J_R -кривой на нулевой подрост трещины даст искомую упругопластическую вязкость разрушения J_c .

В раскрытии трещины от пластического течения в ее вершине возникает эффект мнимого увеличения длины трещины (вследствие пластического втягивания материала внутрь тела). Для учета этого пластического затупления проводят линию из начала координат по уравнению $J = (\sigma_{0,2} + \sigma_B)\Delta\ell$ (при толщине не более 30 мм); $J = (\sigma_{0,2} + \sigma_B)\Delta\ell/2$ (при толщине более 30 мм).

Точка пересечения J_R с линией затупления дает величину J_c (рис. 7.4). Величина J_c равна J_{Ic} , если выполняются условие достоверности

$$t \geq \beta_j \frac{J_c}{\sigma_{0,2} + \sigma_B},$$

где $\beta_j=200$ при $\sigma_{0,2}/\sigma_B < 0.6$ и $\beta_j=-375(\sigma_{0,2}/\sigma_B)+425$ при $\sigma_{0,2}/\sigma_B \geq 0.6$.

Упругопластическая вязкость разрушения J_{lc} аналогична вязкости разрушения при плоской деформации K_{lc} . Согласно ГОСТ 25.506-85 допускается их взаимный пересчет по формуле $J_{lc} = \frac{(1-\mu^2)}{E} (K_{lc})^2$.

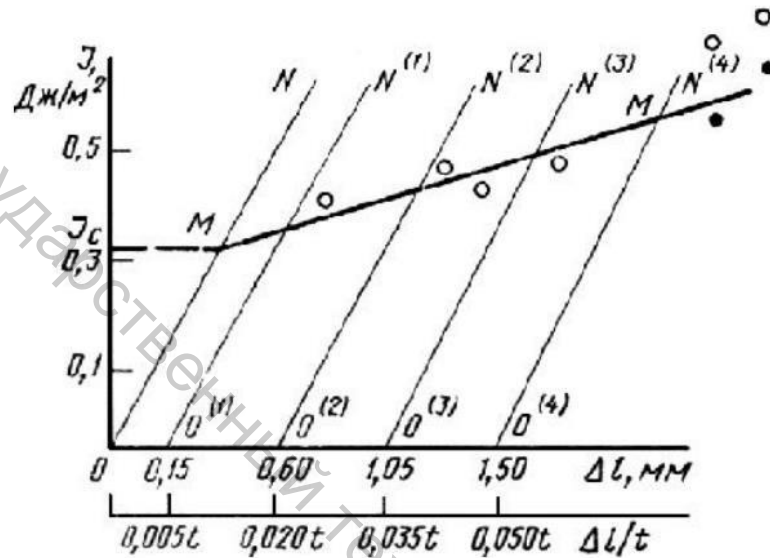


Рисунок 7.4 – Диаграмма J-Δl. Зачерченные точки – скорректированные значения J

7.7 Выводы

Для экспериментального определения характеристик трещиностойкости используют пять типов образцов (тип 5 используют для определения предела трещиностойкости – приложение 3 в ГОСТ 25.506-85). В качестве характеристики материала определяют K_{lc} . Остальные характеристики определяют либо в специальных целях, либо по причине невозможности нахождения K_{lc} .

При вязком разрушении характеристикой трещиностойкости служит упругопластическая вязкость разрушения J_c или раскрытие в вершине трещины δ_c . Условный критический коэффициент интенсивности напряжений K^*_c не связан с видом разрушения. Величины K_c и $K_{от}$ находят при ограниченном пластическом течении, так как принято, что $\sigma_{c0} < 0.8\sigma_{0,2}$. Поскольку K_c соответствует максимальной нагрузке, эта величина есть аналог предела

трещиностойкости (материал находится в относительно хрупком состоянии). Величина $K_{от}$, подсчитанная с учетом пластической зоны у вершины трещины, дает критический коэффициент интенсивности напряжений в упругом состоянии при разрушении, т. е. это аналог вязкости разрушения K_{Ic} .

Все эти характеристики оценивают сопротивление материала образца развитию имеющейся в теле трещины.

Лабораторная работа 8 Определение предела трещиностойкости

Цель работы: определение пределов трещиностойкости, построение диаграммы трещиностойкости.

8.1 Содержание работы

Предел трещиностойкости I_c – количественная мера сопротивления материала распространению трещины, представляющая собой критический условный коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic}^* , определенный при максимальной нагрузке P_c , выдерживаемой образцом с данной длиной трещины ℓ .

Предел трещиностойкости определяют (согласно ГОСТ 25.506-85 [9]) испытанием на растяжение серии плоских образцов с разными длинами трещин – в диапазоне $0 < \ell/b < 0,6$. Для каждого образца с конкретной длиной трещины получают предел трещиностойкости. Используются образцы типов 1, 4 и 5 (см. рис. 8.1).

В каждом испытании (образцов с разной длиной трещины) фиксируется только разрушающая нагрузка P_c , по которой вычисляется предел трещиностойкости I_c – по формуле для коэффициента интенсивности напряжений. Оснастка для измерения раскрытия трещины и построения диаграммы P - v не требуется.

Приведем формулу для образца типа 5:

$$I_c = \frac{P_c \ell^{1/2}}{t - b} Y'_5,$$

где $Y'_5 = 1.99 - 0.41(\ell/b) + 18.7(\ell/b)^2 - 38.48(\ell/b)^3 + 53.85(\ell/b)^4$.

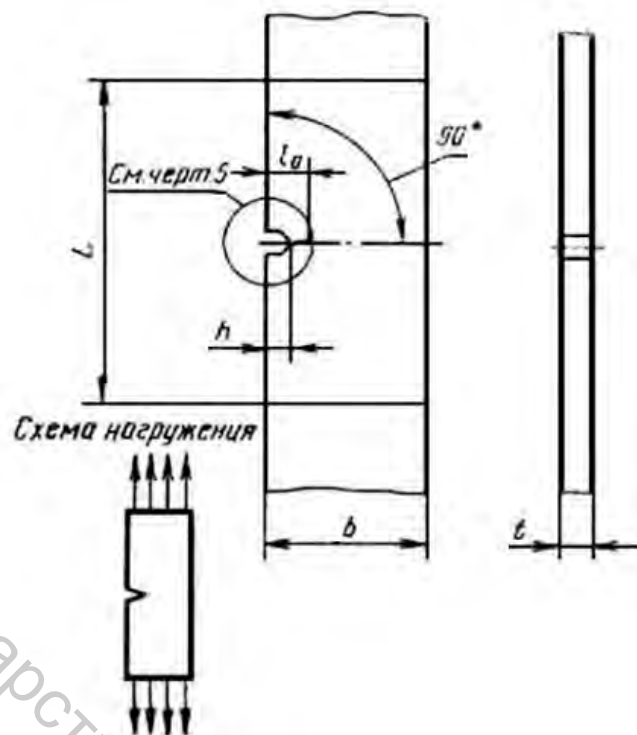


Рисунок 8.1 – Схема образца типа 5 для определения характеристик трещиностойкости ($b \geq 5t$, $L \geq 2b$, $h \approx 0,1b$; L – расстояние между частями образца, служащими для его крепления в захватах)

При силах P для образцов с различными длинами трещин и без них ($l=0$) определяют номинальное разрушающее напряжение σ_c , для образца типа 5 $\sigma_c = P_c / (t \cdot b)$. При $l = 0$ допустимо использовать вместо σ_c временное сопротивление σ_b при заданной температуре и данной схеме нагружения – в соответствии с одним из ГОСТ: ГОСТ 1497-73, ГОСТ 9651-73, ГОСТ 11150-75, ГОСТ 22706-77.

8.2 Результаты испытаний

Результаты испытаний представляются в виде таблицы (табл. 8.1), набранной в Microsoft Excel.

Таблица 8.1 – Разрушающие напряжения и предел трещиностойкости для разных длин трещин

$\frac{l}{b}$	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
σ_c , МПа							
I_c , МПа $\sqrt{м}$							

8.3 Выводы

Найденные при разных длинах трещин пределы трещиностойкости позволяют построить диаграмму трещиностойкости – зависимость предела трещиностойкости от разрушающего напряжения (и, понятно, от длины трещины). Диаграмма позволяет оценивать материал и рассчитывать детали машин на трещиностойкость при хрупком, переходном и вязком разрушениях. При этом не обязательно предварительное знание вида разрушения. В расчетных соотношениях использованы привычные коэффициенты интенсивности напряжений, но соответствующая характеристика материала усложнена (она стала функцией разрушающего напряжения). Здесь напрашивается аналогия с пределом прочности, а именно, и ту и другую характеристики находят по максимальной силе, выдерживаемой образцом. И в том и в другом случае не обращают внимания на предварительное (перед максимумом нагрузки) пластическое течение и на вид разрушения. Разница только в том, что в одном случае образец гладкий (без трещины), в другом случае образец с трещиной. По сути, предел трещиностойкости – предел прочности образца с трещиной.

Лабораторная работа 9 Определение характеристик трещиностойкости при циклическом нагружении

Цель работы: изучение диаграммы усталостного разрушения, определение скорости роста трещины.

9.1 Содержание работы

Скорость роста трещины и характеристики сопротивления материала развитию трещины при циклическом нагружении определяют в условиях применимости линейной механики разрушения. Следовательно, напряженно-деформированное состояние у вершины трещины характеризуют коэффициентом интенсивности напряжений. Характеристики трещиностойкости металлов при циклическом нагружении (наряду с другими характеристиками механических свойств [10]) могут быть использованы:

- 1) для суждения о сопротивлении материала развитию трещины и определения влияния на него различных металлургических, технологических и эксплуатационных факторов;
- 2) для сопоставления материалов при обосновании их выбора для машин и конструкций;
- 3) для контроля качества материалов;
- 4) для оценки долговечности элементов конструкций на основе сведений о их дефектах и напряженном состоянии;
- 5) для установления критериев неразрушающего контроля и анализа причин разрушения конструкций.

9.2 Результаты испытаний

Испытания состоят в последовательном измерении (при заданных параметрах цикла нагрузки) длины растущей трещины l и числа циклов нагружения N . По этим данным можно построить зависимость длины трещины от числа циклов нагружения. В дальнейшем находят скорость роста трещины v в виде отношения $v = \Delta l / \Delta N$ как средний прирост длины трещины за один цикл. Устанавливают зависимость скорости роста трещины от величины, характеризующей напряженно-деформированное состояние в области ее вершины. В этой роли обычно выступает коэффициент интенсивности напряжений. Параметры этой зависимости – характеристики сопротивления развитию трещины (трещиностойкость) материала при циклическом нагружении по простому периодическому закону.

Коэффициент интенсивности напряжений K используют, когда размер пластической зоны у вершины трещины примерно на порядок меньше длины трещины (и расстояния от ее вершины до края образца). Зависимость скорости роста трещины от максимального коэффициента интенсивности напряжений цикла K_{\max} или размаха $\Delta K = K_{\max} (1-R)$ называют диаграммой усталостного разрушения (диаграммой циклической трещиностойкости).

Перепад коэффициента интенсивности напряжений за один цикл определяется перепадом напряжений (постоянным). Рост трещины с нарастанием числа циклов сопровождается ростом коэффициента интенсивности напряжений.

Диаграмму циклической трещиностойкости строят в двойных логарифмических координатах. Обычно она имеет S-образный вид (рис. 9.1) и состоит из двух криволинейных участков низких (обычно $v < 10^8$ м/цикл) и высоких (обычно $v > 10^6$ м/цикл) скоростей роста трещины, а также среднего участка, аппроксимируемого прямой. Поскольку коэффициент асимметрии цикла R постоянен, диаграммы усталостного

разрушения, построенные на базе ΔK и K_{max} , эквивалентны и различаются лишь масштабом по оси абсцисс и смещены относительно друг друга на $\lg(1-R)$ вдоль нее.

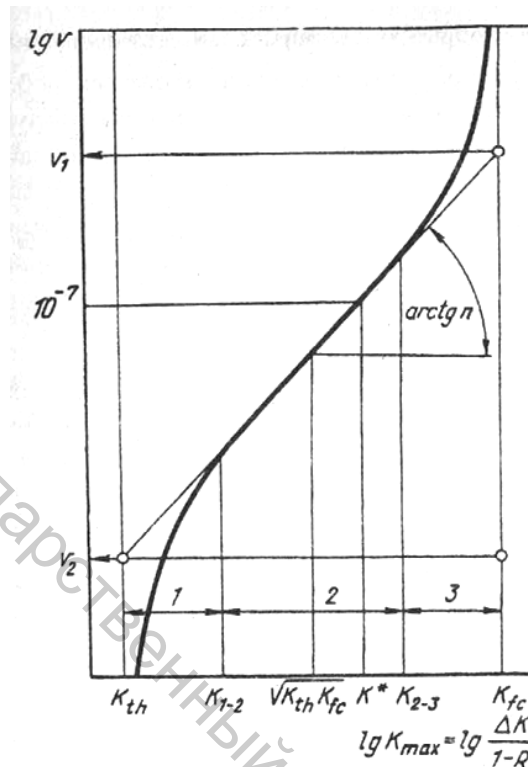


Рисунок 9.1 – Диаграмма усталостного разрушения (дана схематически)

Диаграмма усталостного разрушения дает информацию о сопротивлении развитию трещины материала при циклическом нагружении. По ней устанавливают основные характеристики усталостной трещиностойкости материала:

- пороговый коэффициент интенсивности напряжений K_{th} – максимальное значение наибольшего коэффициента интенсивности напряжений цикла, при нем трещина не развивается на протяжении заданного числа циклов;

- критический коэффициент интенсивности напряжений (циклическую вязкость разрушения) K_{fc} – наибольший коэффициент интенсивности напряжений цикла, при котором наступает долом образца;

- K^* и n – параметры зависимости, аппроксимирующей средний участок диаграммы усталостного разрушения с уравнением

$$v = 10^{-7} \left(\frac{K_{max}}{K^*} \right)^n \frac{M}{\text{цикл}}, \quad (9.1)$$

его можно представить уравнением Париса

$$v = CK_{max}^n ; \quad (9.2)$$

постоянная C связана с характеристиками n и K формулой

$$C = 10^{-7} (K^*)^{-n} (\text{Па}\sqrt{\text{м}})^{-n} \text{ м/цикл.}$$

Сравнительной характеристикой сопротивления развитию трещины может также служить диаграмма живучести. Она представляет собой зависимость разрушающего числа циклов от начального (при $\ell = \ell_0$) коэффициента интенсивности напряжений цикла K_{max}^0 . Различных значений достигают изменением максимальной нагрузки цикла при одной и той же начальной длине трещины ℓ_0 .

В испытаниях можно использовать образцы для определения статических характеристик. Для измерения длины трещины может использоваться любой метод. Известны следующие методы измерения длины трещины: визуальный, разности, электрических потенциалов, механической податливости, датчиков последовательного разрыва, токовихревой, ультразвуковой, акустической эмиссии и т. п. Наиболее распространен визуальный метод при 10–40-кратном увеличении с помощью катетометра или передвижного микроскопа, фиксирующего положение конца трещины на поверхности образца по отношению к предварительно нанесенным меткам. Обычно эксперимент проводят с коэффициентом асимметрии цикла синусоидальной формы $R = 0-0,1$, с частотой нагружения $f = 10-20$ Гц, при температуре $17-23$ °С. Если толщина образца со сквозной трещиной больше $0,15 b$, длину трещины измеряют по обе стороны образца. В образцах с центральной трещиной измеряют обе полудлины трещины. В обоих случаях длину трещины определяют как среднее арифметическое всех измерений. В процессе испытаний плоских образцов наблюдают за появлением и развитием пластической зоны у вершины трещины, если она видна на полированной поверхности образца. При этом отмечают момент, когда наибольший ее размер достигнет значения, равного $0,1$ длины трещины и $0,1$ расстояния вершины трещины от края образца. Кроме того, номинальные нетто-напряжения в образце, соответствующие максимальной нагрузке цикла, не должны превышать 80% от предела текучести. Коэффициенты интенсивности напряжений, полученные с нарушением этих требований, являются условными и при определении характеристик трещиностойкости не используются.

Для определения порогового коэффициента интенсивности напряжений K_{th} наибольшую нагрузку цикла понижают и находят ее значение, при котором трещина не растет на протяжении заданного числа циклов. Для определения циклической вязкости разрушения K_{fc} испытания проводят с увеличивающимся коэффициентом

интенсивности напряжений K_{\max} , фиксируя нагрузку и длину трещины, соответствующие началу долома образца.

Скорость роста трещины можно определять соотношением

$$v_i = \frac{\ell_{i+1} - \ell_i}{N_{i+1} - N_i}$$

в точке, соответствующей средней длине трещины $(\ell_{i+1} + \ell_i)/2$.

Возможно графическое дифференцирование, для чего используют график роста трещины в функции числа циклов. На графике через определенные интервалы длины трещины отмечают точки с ординатами ℓ_i и проводят к ним касательную, тангенс угла наклона которой (к оси абсцисс N) равен в заданном масштабе скорости роста трещины v_i .

Для каждой скорости роста трещины определяют по известной нагрузке и длине трещины (с помощью известных формул) наибольшее значение или размах коэффициента интенсивности напряжений. Скорости и соответствующие им размахи коэффициента интенсивности напряжений позволяют построить (в логарифмических шкалах) кривую – диаграмму усталостного разрушения. Рекомендуется масштаб диаграммы по оси абсцисс (ось $\lg K_{\max}$ или $\lg \Delta K$) выбирать в 3–3,5 раза большим, чем по оси ординат (ось $\lg v$).

9.3 Выводы

Известно, что стадия развития трещины занимает порой значительную долю от общей долговечности образца или детали. Поэтому характеристики циклической трещиностойкости занимают существенную часть в общей иерархии механических свойств материалов. Зная скорость роста трещины в функции коэффициента интенсивности напряжений, а, следовательно, и длины трещины, можно путем интегрирования определить ресурс образца или изделия до полного разрушения.

Использование коэффициента интенсивности напряжений предполагает упругое состояние тела с растущей трещиной. Однако зачастую трещина продвигается внутри пластической зоны в предварительно пластически деформированном материале. Тогда следует перейти к использованию параметров нелинейной механики разрушения. Например, перспективно выразить скорость роста трещины в выражении (9.2) не через ΔK , а через ΔJ , принимая во внимание, что J -интеграл можно выделять при большой пластической зоне. Но следует

иметь в виду, что пластические зоны в образце и в детали могут оказаться разными, что отразится на искомой скорости.

Лабораторная работа 10

Определение характеристик трещиностойкости металлов при температурной ползучести

Цель работы: построение диаграмм «нагрузка – смещение» берегов трещины; кривые трещиностойкости металлов при испытаниях с постоянной нагрузкой.

10.1 Содержание работы

Характеристики трещиностойкости металлов и их сварных соединений при ползучести определяют в условиях нагружения двух видов: с постоянной скоростью деформации (нагружения); с постоянной нагрузкой во времени. Определяются следующие основные характеристики трещиностойкости, которые соответствуют их базовым статическим аналогам (ГОСТ 25.506-85):

- раскрытие в вершине трещины δ_C ;
- минимальное значение δ_C в заданном температурно-временном интервале, критический коэффициент интенсивности напряжений K_{Ic} ;
- критическое значение J-интеграла J_c ;
- минимальное значение J_c в заданном температурно-временном интервале.

В зависимости от характера температурно-временной зависимости δ_C и J_c материалы разделяются условно на три категории: трещиностойкие упрочняющиеся; трещиностойкие стабильные; нетрещиностойкие разупрочняющиеся.

Трещиностойкие упрочняющиеся – такие материалы, у которых с увеличением времени испытания и температуры, а также с уменьшением скорости деформации значения δ_C , K_{Ic} , J_c возрастают.

Трещиностойкие стабильные – материалы, у которых при увеличении времени испытания, температуры и уменьшении скорости деформации значения δ_C , K_{Ic} , J_c не изменяются.

Нетрещиностойкие материалы – такие, у которых при увеличении времени испытания и температуры, а также уменьшении скорости деформации значения δ_C и J_c уменьшаются.

Для измерения смещений v или прогибов f применяют датчики смещения, устанавливаемые на упоры приспособления вне зоны нагрева.

10.2 Проведение испытаний

На образце устанавливают приспособления для измерения смещений берегов трещины. Образец нагружают после выравнивания температур нагревающего устройства и образца. Время выравнивания температур – не менее 1 ч. Скорость деформирования образцов при испытаниях с постоянной скоростью деформации выбирают в интервале $10\text{--}10^{-4}$ мм/ч. Рекомендуемые скорости деформации выбираются в соответствии со средними скоростями ползучести в изделии. В результате записывают диаграммы P-v и P-f.

После испытаний образец разгружают и освобождают от приспособлений. Затем образец охлаждают в жидком азоте и доламывают.

По излому образца измеряют начальную длину трещины и величину ее подрастания Δl как среднее трех измерений на равных расстояниях вдоль фронта трещины. При испытаниях с различными скоростями деформирования получают серию кривых P-v и P-f (изотах), отвечающих заданным скоростям деформации u (рис. 10.1 а).

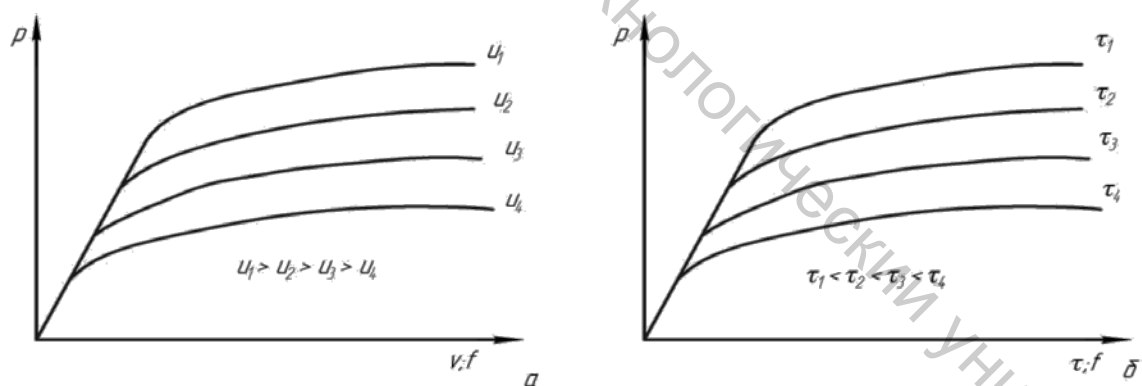


Рисунок 10.1 – Диаграммы «нагрузка – смещение» берегов трещины:
а – изотахи (линии одинаковой скорости деформации u); б – изохроны
(линии одинаковой длительности нагружения τ)

При достаточно большой скорости эффекты ползучести не успевают себя проявить, результаты эксперимента практически соответствуют обычным кратковременным. Чем меньше скорость, тем заметнее ползучесть и кривая P-v получается более пологой. Кривые P-v (P-f) перестраивают в изохронные кривые (рис. 10.1 б), отвечающие заданным длительностям нагружения τ , которые определяют из

соотношения $\tau = v/u$. Например, для заданной длительности нагружения $\tau_1 = \frac{v_1}{u_1} = \frac{v_2}{u_2} = \frac{v_3}{u_3}$ находят из кривой v_1 , равное произведению $v_1 = \tau_1 u_1$, затем, отыскивают скорость u_2 , т. е. находят такое $v_2 = \tau_1 u_2$, то же делают для третьей пары величин и последующих пар. В итоге получают кривую $P-v$ для длительности τ_1 , аналогичным образом для времен τ_2, τ_3 и последующих. Полученные кривые $P-v$ обрабатывают для определения характеристик трещиностойкости так же, как при кратковременном нагружении. Получаются характеристики, перечисленные во вводной части работы. Все это повторяется для ряда заданных температур.

Порядок испытаний образцов при постоянной нагрузке следующий: образец, установленный в захватах нагружающего устройства, после достижения заданной температуры нагружают до выбранной нагрузки P и включают систему записи диаграмм $v - \tau$. По окончании заданной длительности испытания τ или по разрушению образца измеряют по излому на одинаковых расстояниях вдоль фронта трещины начальную длину трещины ℓ и величину ее подрастания $\Delta \ell$ как среднее из трех измерений.

В результате испытаний с постоянной скоростью деформирования строят кривые $P-v$ или $P-f$ для заданных скоростей деформирования u_1, u_2, u_3, \dots – изотахи (см. рис. 10.1 а). Далее кривые $P-v$ и $P-f$ следует перестроить в изохронные (см. рис. 10.1 б) для данного времени $\tau = f/u$. Полученные характеристики трещиностойкости можно изобразить в виде функций скорости деформирования и температуры (в логарифмических шкалах) и найти их минимальные значения, которые используются в последующем расчете конструкций.

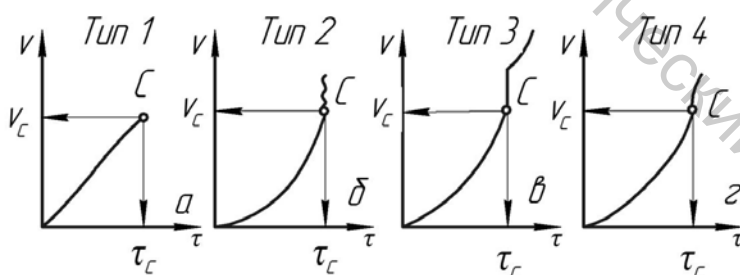


Рисунок 10.2 – Типы первичных кривых трещиностойкости при испытаниях с постоянной нагрузкой; четыре вида этих диаграмм соответствуют четырем видам диаграмм при кратковременных испытаниях

В результате испытаний с постоянной нагрузкой строят кривые $v-\tau$ (рис. 10.2). На оси τ устанавливают момент начала роста трещины, отвечающий точке C кривой. Для кривых $v-\tau$ типов 1 и 2 точка C отвечает моменту полного разрушения образца (рис. 10.2 а, б); для

кривой типа 3 – скачку на диаграмме (рис. 10.2 в). Для диаграммы типа 4 (рис. 10.2 г) точка С определяется путем обработки испытаний серии образцов при одной и той же нагрузке Р. При этом устанавливают зависимость Δl - τ . Время τ , отвечающее условию $\Delta l = 0$, принимают за τ_c , по которому определяют точку С и соответственно v_c . Допускается определять точку С с использованием любого метода, не влияющего на условия проведения испытания. Максимум смещения v , по достижению которого трещина не растёт, отвечает точке С.

По полученным значениям v_c получают раскрытие трещины:

$$\delta_c = \frac{v_c}{1 + n \frac{a}{b - \ell}} + \frac{(K_c^*)^2}{2\sigma_{0.2/\tau}^T E'}$$

где n – ротационный фактор; a , b , ℓ – размеры образца в кратковременных испытаниях на изгиб; $\sigma_{0.2/\tau}^T$ – условный предел текучести, отвечающий деформации 0,2 % за время испытания τ при температуре T ; K_c^* – условный критический коэффициент интенсивности напряжений, определяемый по формулам линейной механики разрушения (в соответствии с требованиями ГОСТ 25.506-85). Допускается упрощенный расчет критического раскрытия трещины в условиях ползучести. При этом полагают $n = 2$ (идеально ползучее тело). Допустимо введение поправок в ротационный фактор, связанных с величиной критического раскрытия трещины. Рассчитав раскрытие трещины по вышеприведенной формуле, вычисляют ротационный фактор: $n = 2 + 0.13(\delta_c)^{-0.7}$.

Условные критические коэффициенты интенсивности напряжений определяются из изохронных кривых и изотахах путем расчета по критическому раскрытию трещины, а также по критическому значению J_c -интеграла: $K_\delta = \sqrt{E\sigma_{0.2/\tau}^T \delta_c}$; $K_j = \sqrt{\frac{EJ_c}{1-\nu^2}}$. В отсутствии сведений в условиях ползучести о коэффициенте Пуассона допускается полагать $\nu = 0,5$.

Результаты оценки характеристик трещиностойкости в испытаниях при постоянных нагрузках на различных временных базах и при постоянных скоростях деформирования позволяют построить временные и температурные зависимости характеристик трещиностойкости.

Результаты испытаний в заданном температурном интервале позволяют определить минимальные значения характеристик трещиностойкости, отвечающие температурам минимальной сопротивляемости развитию трещин.

Физическое минимальное значение характеристики трещиностойкости – ее значение, ниже которого во всем диапазоне

времен испытания, скоростей деформации, температур трещины не развиваются.

10.4 Выводы

Испытания на ползучесть весьма трудоемки. Учитывая сложность и важность современного энергетического машиностроения, двигателестроения и других отраслей техники, невозможно избежать существенных затрат для предотвращения техногенных катастроф, возникающих в результате недостаточной трещиностойкости элементов конструкций.

Испытания при заданной скорости нагружения – жесткое нагружение, испытания при заданной нагрузке – податливое нагружение. Реакция металла при разрушении может оказаться в различных условиях существенно разной, приходится проводить испытания в значительных интервалах температур и силовых нагружений.

Лабораторная работа 11

Определение удельной поверхностной энергии разрушения материала твердого тела

Цель работы: нахождение удельной поверхностной энергии разрушения.

11.1 Содержание работы

В уравнениях механики разрушения твердых тел с трещинами содержится важная характеристика – удельная поверхностная энергия разрушения γ_0 . Эта энергия представляет собой в количественном отношении работу, которая затрачивается на образование единицы новой поверхности при идеально хрупком разрушении твердого тела и является интегральной характеристикой сил взаимодействия между частицами данного тела. Она имеет большое значение для оценки прочности твердых тел с трещинами, ее можно трактовать как меру сопротивления материала развитию трещин, сопровождающих разрушение. Ее знание заставляет признать лучшей технологию с большей величиной γ_0 (при сохранении на необходимом уровне других физико-механических характеристик материала).

Определение энергии γ_0 в условиях старения материала позволяет получить количественные оценки влияния внешних условий на процесс разрушения твердых тел. Однако экспериментальное определение удельной поверхностной энергии разрушения γ_0 для реальных твердых тел довольно трудная задача, поскольку нет эффективных методов ее прямого измерения. Для ее определения пользуются некоторыми результатами теории распространения трещин в деформируемом твердом теле. Как пример рассмотрим задачу о полосе конечной ширины $2b$ из хрупкого материала, ослабленной изолированной центральной прямолинейной трещиной длины 2ℓ . Пластина подвергнута растяжению монотонно возрастающими напряжениями σ . По достижении внешней нагрузкой некоторого значения $\sigma = \sigma_b$ трещина заданной длины 2ℓ начнет распространяться по сечению пластины. Связь между длиной трещины 2ℓ и разрушающим напряжением $\sigma = \sigma_c$ даётся известной формулой

$$K = \sqrt{2E\gamma_0} = \sigma_c \sqrt{\pi \ell \sec \frac{\pi \ell}{2b}}, \quad (11.1)$$

где E – модуль упругости.

Чтобы найти энергию γ_0 для данного материала в заданных внешних условиях, нужно изготовить из него плоские образцы с центральной трещиной, затем разрушить их согласно схеме приложения нагрузки при максимальной скорости нагружения испытательной машины (чтобы приблизиться к хрупкому разрушению). Разрушающую нагрузку фиксируют. Результаты вносят в таблицу, набранную в Microsoft Excel (табл. 11.1).

Таблица 11.1 – Определение удельной поверхностной энергии разрушения γ_0

Название материала исследуемого образца										
Номер образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Размеры образца	$L \times b \times t$									
Длина L , мм										
Ширина b , мм										
Толщина t , мм										
Длина трещины ℓ , мм	ℓ_1	ℓ_2	ℓ_3	ℓ_4	ℓ_5	ℓ_6	ℓ_7	ℓ_8	ℓ_9	ℓ_{10}
Модуль упругости E , МПа										
Разрушающая нагрузка p_c , Н										
Разрушающее напряжение σ_c , МПа										
Удельная поверхностная энергия разрушения γ_0 , Дж/м ²										

11.2 Результаты испытаний

Используя формулу (11.1) и данные таблицы 11.1, определяют значение γ_0 :

$$\gamma_0 = \frac{\pi l (\sigma_c)^2}{2E \cos \frac{\pi l}{2b}} \quad (11.2)$$

Все расчеты по формуле (11.2) ведутся в Microsoft Excel.

11.3 Выводы

Используя рассмотренный выше подход для определения удельной поверхностной энергии разрушения γ_0 материала, можно исследовать влияние температурных факторов, различных методов термической и механикотермической обработки, поверхностно-активных, коррозионных и агрессивных сред и т. п. на изменение этой характеристики.

Из анализа данных, имеющихся в литературе по этой проблеме следует, что стандартные характеристики менее чувствительны к изменению температуры T , нежели характеристика γ_0 . Характеристика γ_0 , как мера сопротивления материала развитию трещины при определенной температуре ($T = T_c$), резко уменьшается. Это значит, что данный материал при температурах $T \leq T_c$ становится более склонным к хрупкому разрушению. Температура T_c представляет собой температуру хладноломкости материала.

Заметим: определение температуры хладноломкости T_c высокоуглеродистых сталей по ударной вязкости, как известно, малоэффективно из-за рассеяния ее значений.

III ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ И МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Развитие современной техники и технологии немыслимо без самого широкого использования неразрушающих испытаний. В неразрушающих испытаниях пользуются физическими методами, которые не наносят материалу дополнительных повреждений. Таких методов существует много, но один из лучших (и простейших) – визуальный метод. В арсенале специалистов по неразрушающему контролю есть и более сложные методы: тепловые, радиоактивные, акустические, электромагнитные, голографические и т. д. Современная дефектоскопия дает возможность достаточно надежно и быстро обнаруживать дефекты материала, в их числе и внутренние, определять их вид, размеры, расположение. При этом значение имеют не только разрешающая способность приборов и квалификация персонала, но и знание технологии изготовления, а также условий эксплуатации элементов конструкций.

Дефекты могут быть собственными (включения в металле, расслоения в композите), появиться при изготовлении (непровары и трещины в сварных швах), образоваться в процессе эксплуатации изделия (усталостные и коррозионные трещины). Для их успешного выявления, конечно же, необходимо представлять, что и где следует искать. Однако при всех достоинствах у неразрушающего контроля есть слабое место. Дефект обнаружен, что же дальше: оставить его без внимания, продолжить рабочий процесс, начать ремонт конструкции, а может быть, списать ее?

Цель цикла лабораторных работ в этом разделе – отработка навыков обнаружения дефектов элементов конструкций и готовность ответить на следующие ниже вопросы.

1. Опасен ли обнаруженный дефект для заданного уровня рабочих нагрузок?
2. Как скоро дефект может вырасти до опасного размера?
3. Какие меры следует принять для предотвращения катастрофического разрушения?
4. На каком уровне нагрузок безопасна эксплуатация дефектного элемента конструкции?

Лабораторная работа 12

Обнаружение опасных дефектов в конструкционных материалах

Цель работы: ознакомление с поверхностными и внутренними дефектами конструкционных материалов, обнаружение опасных дефектов в изделиях по результатам неразрушающих методов контроля.

12.1 Основные сведения

К внутренним дефектам конструкционных материалов относятся трещины.

Трещины – экстремальные концентраторы напряжений (рис. 12.1).

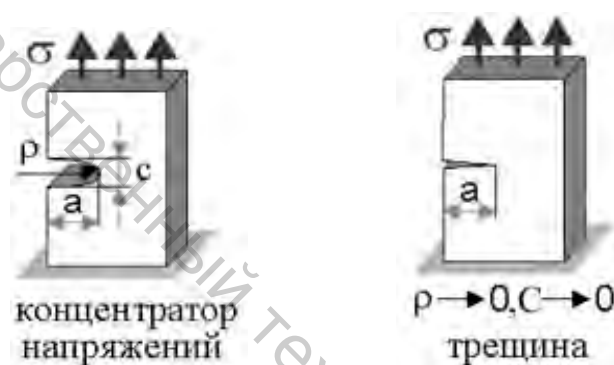


Рисунок 12.1 – Экстремальные концентраторы напряжений

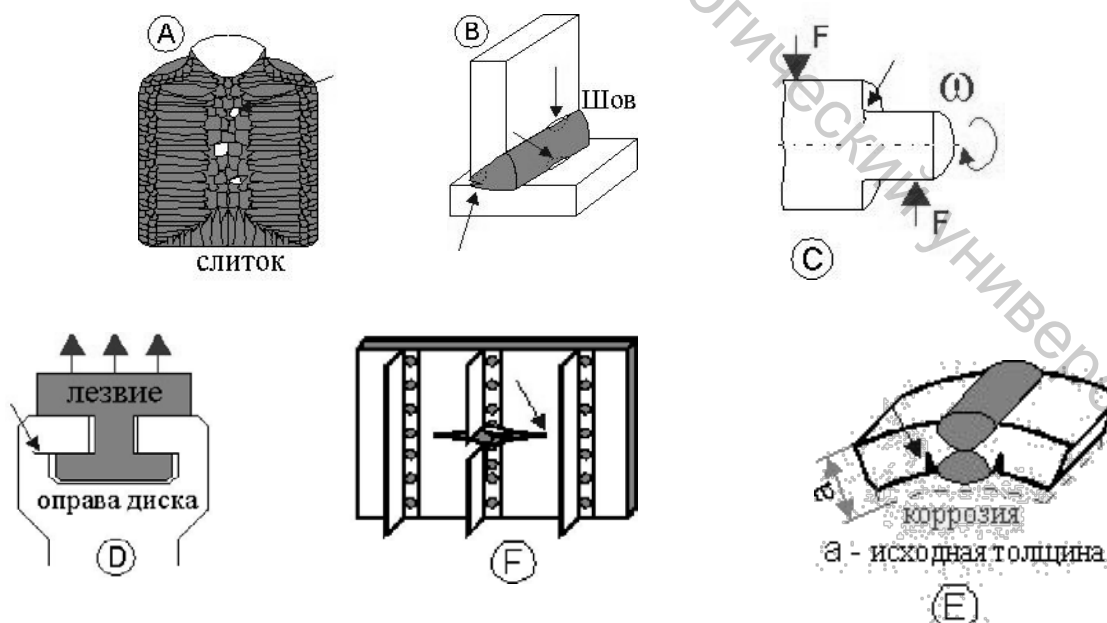


Рисунок 12.2 – Технологические дефекты, перерастающие при эксплуатации в усталостные и коррозионные трещины

Технологические дефекты А, В, С, D, F (рис. 12.2) перерастают в эксплуатации в усталостные трещины: возникают в коррозии – **Е**, а также в ударном терморастрескивании и при износе.

Течь в сосудах давления происходит через трещины, тем самым дефекты обнаруживаются до наступления катастрофического разрушения.

Самые опасные дефекты перпендикулярны растягивающим напряжениям в материале (рис. 12.3). Можно аппроксимировать фронт трещины **A** эллипсом или окружностью (рис. 12.3). Трехмерные дефекты могут быть заменены проекцией на плоскость, перпендикулярную растягивающим напряжениям.

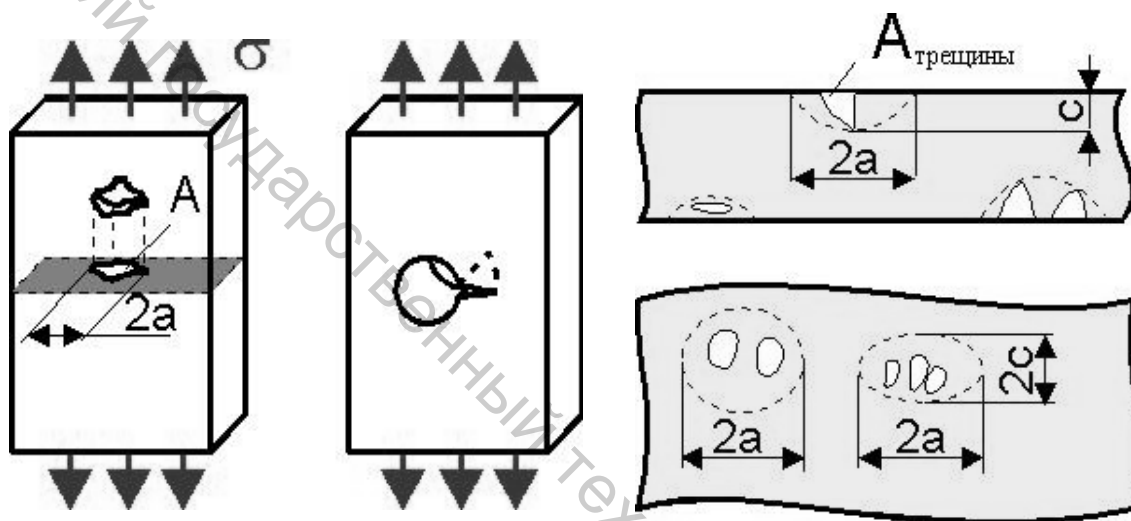


Рисунок 12.3 – Самые опасные дефекты и аппроксимация фронта их трещины

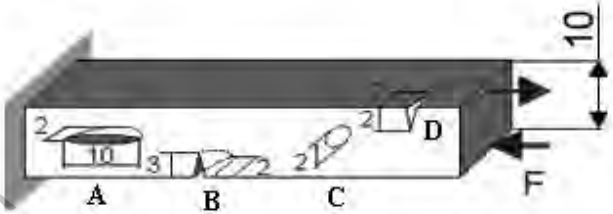
12.2 Выводы

Поверхностный дефект опаснее внутреннего с такими же размерами. Но рассмотреть при неразрушающем контроле поверхностные дефекты легче, чем внутренние.

12.3 Выполнение работы

В представленном конструкционном элементе требуется определить опасные дефекты. Пример конструкционного элемента с имеющимися дефектами приведен в таблице 12.1.

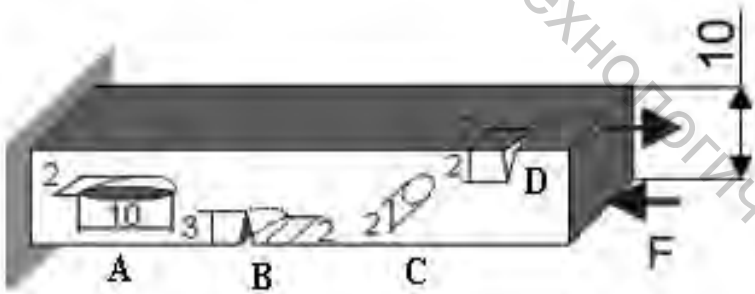
Таблица 12.1 – Пример конструкционного элемента с дефектами

Эскиз элемента с дефектами	Варианты ответа
<p data-bbox="209 315 1075 353">В какой части конструкции дефект самый опасный?</p> 	<p data-bbox="1158 315 1323 353">A, B, C, D</p>

12.3 Оформление результатов и выводы

Пример оформления результатов лабораторной работы приведен в таблице 12.2.

Таблица 12.2 – Анализ и выводы

Эскиз элемента с имеющимися дефектами	Варианты ответа
<p data-bbox="209 1111 1075 1149">В какой части конструкции дефект самый опасный?</p> 	<p data-bbox="1209 1111 1241 1272">A B C D</p>
<p data-bbox="209 1471 1382 1554">Балка изгибается, верхний слой растягивается, нижний слой сжимается. Отсутствуют нормальные напряжения на нейтральной оси</p>	
<p data-bbox="209 1603 1382 1686">A. Неверно. Трещина на нейтральной оси. Здесь отсутствуют растягивающие напряжения.</p> <p data-bbox="209 1686 778 1724">B. Неверно. Трещина под сжатием.</p> <p data-bbox="209 1724 1382 1807">C. Неверно. Внутренний дефект менее опасен, чем поверхностный дефект D.</p>	
<p data-bbox="209 1863 842 1901">D. Верно. Этот дефект самый опасный.</p>	
<p data-bbox="209 1991 711 2029">ВЫВОД: Правильный ответ D</p>	

Лабораторная работа 13

Определение напряжений и деформаций в вершине трещины

Цель работы: определение напряжений и деформаций в вершине трещины в изделиях по результатам неразрушающего контроля.

13.1 Основные сведения

Трещина – препятствие на пути силовых линий. Концентрация силовых линий «воздействует» на распределение напряжений в поперечном сечении. Согласно решению теории упругости для предельного концентратора, такого как трещина, максимальное напряжение по мере приближения к её вершине стремится к бесконечности. Силовые линии и эпюры напряжений в образцах с трещиной при растяжении и чистом изгибе приведены на рисунке 13.1 (случай идеально упругого материала). Конструкционные материалы не идеально упругие, они получают пластические деформации – микроструктурные изменения в вершине трещины.

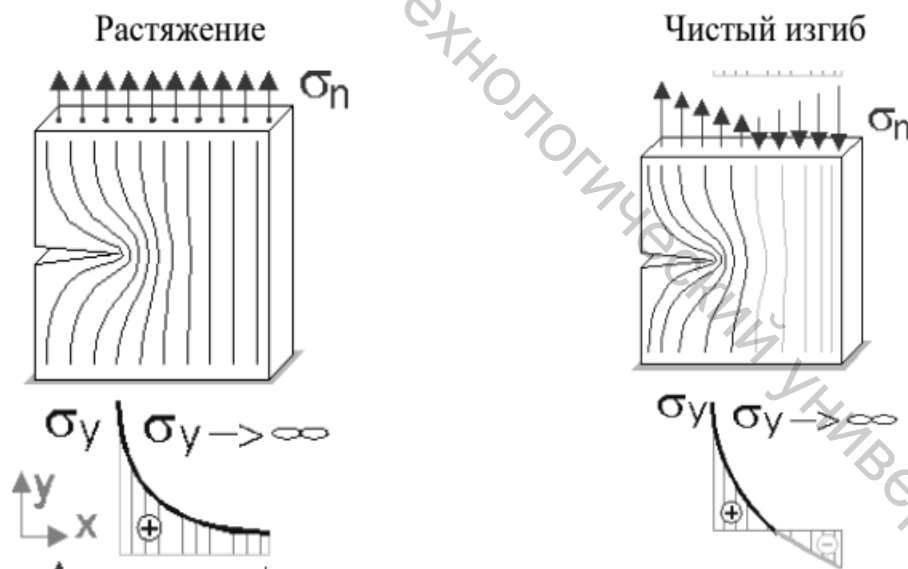


Рисунок 13.1 – Распределение силовых линий и эпюры напряжений в образцах с трещиной при растяжении и чистом изгибе

Первоначальное и деформированное состояние пластины с центральной трещиной приведено на рисунке 13.2. Согласно теории

упругости острая трещина преобразуется в эллиптическое отверстие с более короткой длиной и очень маленькой высотой. В вершине трещины возникает трехмерное поле напряжений.

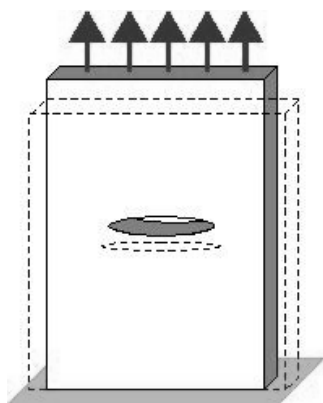


Рисунок 13.2 – Первоначальное и деформированное состояние (перемещение увеличивается) пластины с центральной трещиной

На рисунке показано распределение напряжений в образце с центральной трещиной, показана только его правая часть (рис. 13.3). В вершине трещины существует относительно малая зона, где напряжения могут быть найдены по упрощенной формуле (рис. 13.4).

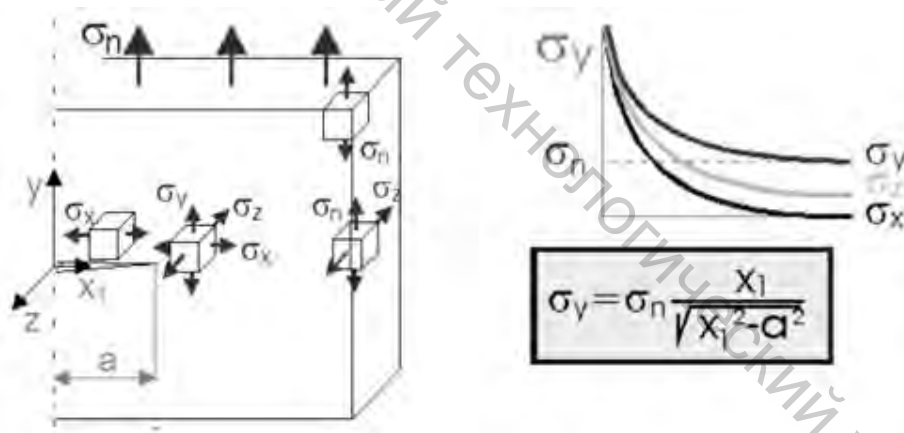


Рисунок 13.3 – Распределение напряжений в образце с центральной трещиной

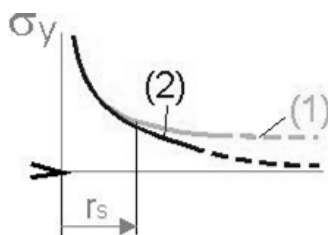


Рисунок 13.4 – Напряжение в вершине трещины

Величина r_s – размер сингулярной зоны. Выражение (13.1) является сингулярным решением.

$$\sigma_y = \frac{\sigma_n \sqrt{a}}{\sqrt{2r_s}} = \frac{\sigma_n \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r_s}}. \quad (13.1)$$

Оно справедливо при растяжении образцов со всеми типами трещин. При больших номинальных напряжениях или для большей длины трещины форма кривой (2) сохраняется, но она поднимается выше. Для различных схем размер сингулярной зоны различен. Во многих случаях он равен примерно 0,1 длины трещины a .

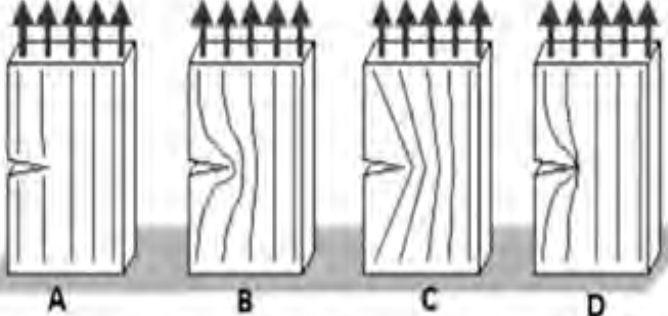
13.2 Выводы

Выражение (13.1) верно при растяжении для всех типов трещин различной конфигурации. Размер сингулярной зоны равен примерно 0,1 длины трещины a .

13.3 Выполнение работы

В представленном конструкционном элементе определить **напряжения и деформации в вершине трещины**. Пример конструкционного элемента с имеющимися дефектами приведен в таблице 13.1.

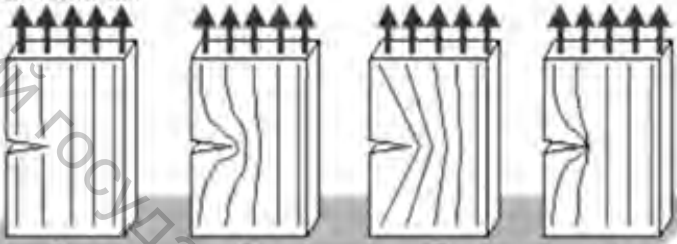
Таблица 13.1 – Конструкционный элемент с дефектами

Эскиз элемента с дефектами	Варианты ответа
<p data-bbox="231 1518 991 1594">В каком образце правильно показано распределение силовых линий?</p> 	<p data-bbox="1225 1585 1257 1825">А В С D</p>

13.4 Оформление результатов и выводы

Пример оформления результатов лабораторной работы приведен в таблице 13.2.

Таблица 13.2 – Анализ и выводы

Эскиз элемента с дефектами	Варианты ответа
<p data-bbox="231 521 1010 589">В каком образце правильно показано распределение силовых линий?</p>  <p data-bbox="371 831 395 853">A</p> <p data-bbox="563 831 587 853">B</p> <p data-bbox="754 831 778 853">C</p> <p data-bbox="930 831 954 853">D</p>	<p data-bbox="1249 577 1273 600">A</p> <p data-bbox="1249 633 1273 656">B</p> <p data-bbox="1249 689 1273 712">C</p> <p data-bbox="1249 745 1273 768">D</p>
<p data-bbox="339 891 1153 925">A. Неверно. Силовые линии не могут прерываться</p>	
<p data-bbox="339 936 1090 969">C. Неверно. Концентрации силовых линий нет</p>	
<p data-bbox="339 981 1185 1014">D. Неверно. Силовые линии не могут соприкоснуться</p>	
<p data-bbox="339 1025 1241 1059">B. Верно. В наличии концентрация в вершине трещины</p>	
<p data-bbox="339 1115 834 1149">ВЫВОД: Правильный ответ B</p>	

Лабораторная работа 14

Определение коэффициента интенсивности напряжений

Цель работы: определение коэффициента интенсивности напряжений в изделиях по результатам неразрушающего контроля.

14.1 Основные сведения

Из решений теории упругости следует: у двух пластин с различными напряжениями и длинами трещин распределение напряжений в вершинах трещины (в сингулярной зоне) может быть одинаковым. Следовательно, существуют такие комбинации «номинального напряжения – длины трещины», которые обеспечивают одинаковый коэффициент интенсивности напряжений в вершине трещины. Наличие более высокого коэффициента интенсивности напряжений (КИН) говорит о более высоких напряжениях на линии продолжения трещины (ось X).

Выражение на рисунке 14.1 справедливо для широкой пластины с трещиной в центре (рис. 14.1).

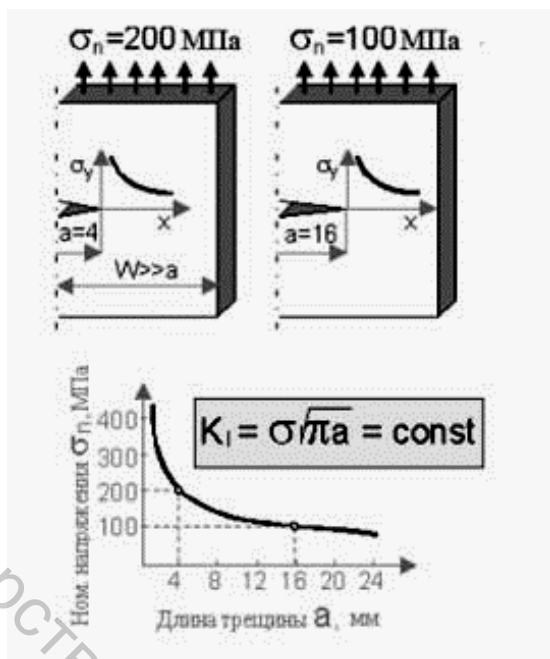


Рисунок 14.1 – Коэффициент интенсивности напряжений

Для пластины, у которой ширина и длина трещины сопоставимы, т. е. одного порядка, в выражение для КИН вводится поправочная функция F_1 (рис. 14.2). Для краевой трещины поправочная функция $F_1 = 1,12$ (рис. 14.3). Для малых полуэллиптических трещин (рис. 14.4) максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений находится в точке А, поправочная функция в данном случае равна примерно 1,12. Поправочная функция увеличивается с увеличением отношения $2c/W$ и уменьшается с увеличением отношения a/W (рис. 14.4).

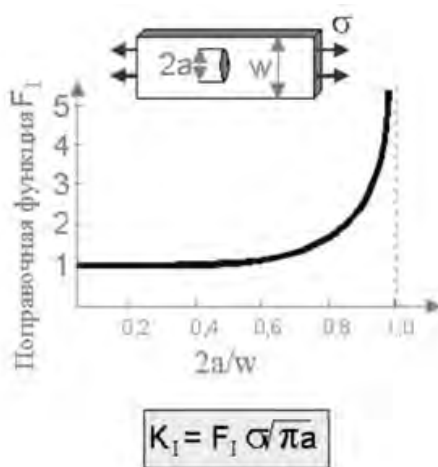


Рисунок 14.2 – КИН с учетом поправочной функции

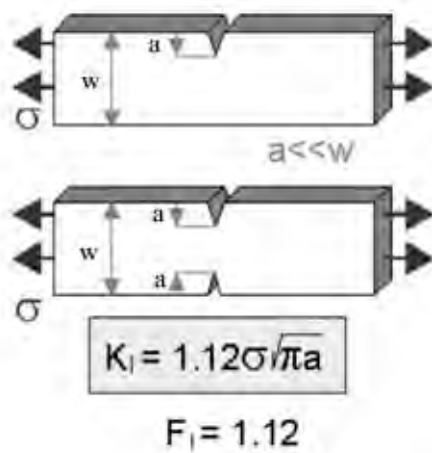


Рисунок 14.3 – Поправочная функция F_I для краевой трещины

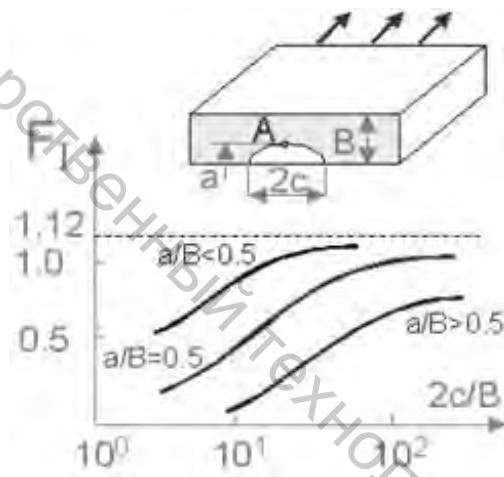


Рисунок 14.4 – Поправочная функция F_I в зависимости от отношений a/B и $2c/B$

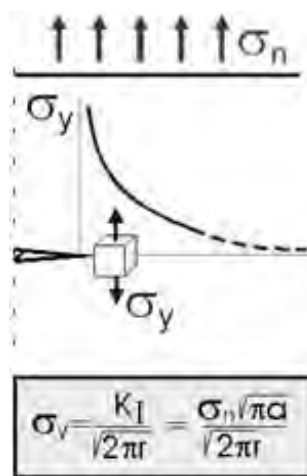


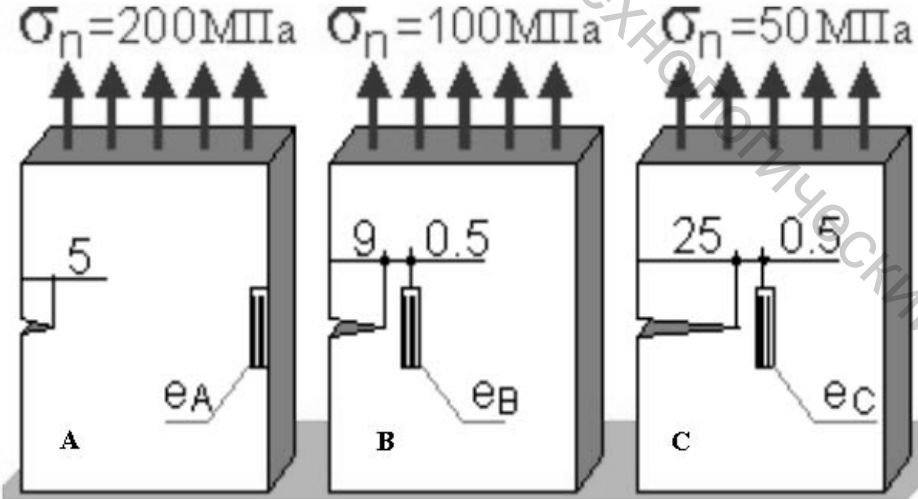
Рисунок 14.5 – Напряжения на расстоянии r от вершины трещины

Поправочная функция для других случаев нагружения может быть найдена в специальных справочниках. По значениям K_I определяются напряжения на расстоянии r от вершины трещины (рис. 14.5). КИН имеет размерность МПа $m^{1/2}$ или кгс $cm^{1/2}$ (1 кгс $cm^{1/2}$ равен 1.1 МПа $m^{1/2}$). Предполагается идеальная форма вершины трещины.

14.2 Выполнение работы

В конструкционном элементе в таблице 14.1 определить коэффициенты интенсивности напряжений в вершине трещины.

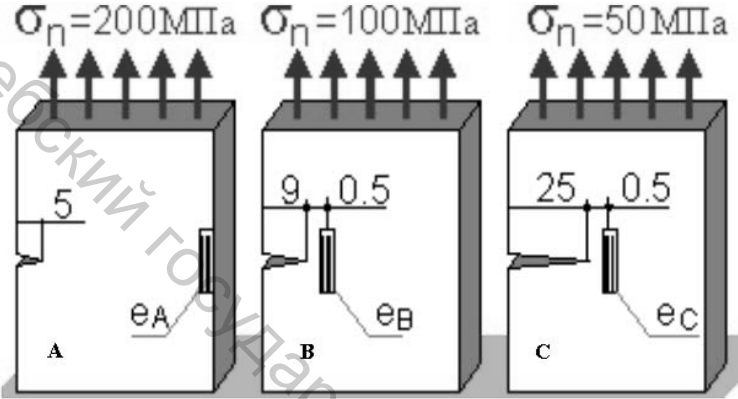
Таблица 14.1 – Примеры конструкционных элементов с имеющимися дефектами

Эскиз элемента с дефектами	Варианты ответа
<p>Тензодатчиками измеряют деформацию в широкой пластине ($b = 500$ мм) с трещиной. Деформация пропорциональна напряжению.</p> <p>Какой из датчиков получит наибольшую деформацию?</p> 	<p>А В С</p>

14.3 Оформление результатов и выводы

Пример оформления результатов лабораторной работы приведен в таблице 14.2.

Таблица 14.2 – Анализ и выводы

Эскиз элемента с дефектами	Варианты ответа
<p>Тензодатчиками измеряют деформацию в широкой пластине ($b = 500$ мм) с трещиной. Деформация пропорциональна напряжению. У какого из образцов самая высокая деформация?</p>	<p>А В С</p>
 <p>В вершине трещины самое высокое напряжение. Тензодатчик А не покажет наибольшей деформации. Сравнивая коэффициенты интенсивности напряжений, найдём: тензодатчик, наклеенный на расстоянии 0,5 мм от вершины трещины, получает наибольшую деформацию (в случае В)</p>	
<p>ВЫВОД: Правильный ответ В.</p>	

Лабораторная работа 15

Определение пластических напряжений и деформаций

Цель работы: определение пластических напряжений и деформаций в изделиях по результатам неразрушающего контроля.

15.1 Основные сведения

Пластические деформации возникают в зонах высокой концентрации напряжений. Пластическая зона возникает в вершине трещины (рис. 15.1).

В соответствии с упругопластическими моделями напряжения в вершине трещины являются конечной величиной (рис. 15.2). Максимальные значения напряжений являются менее важной

характеристикой по сравнению с коэффициентом интенсивности напряжений.

Для толстых пластин размер пластической зоны на поверхности больше чем в центре из-за объемного напряженного состояния в центральной части пластины (рис. 15.3).

Несмотря на это, интенсивность напряжений выше в центре толстой пластины с трещиной. Существуют различные модели пластической зоны в вершине трещины, которые позволяют заменить трещину с пластической зоной на трещину с чисто упругой зоной (рис. 15.4).

Размер r_y зависит от предела текучести σ_{ys} . Эффективная длина трещины a_e – длина трещины с учетом пластической деформации в вершине трещины.

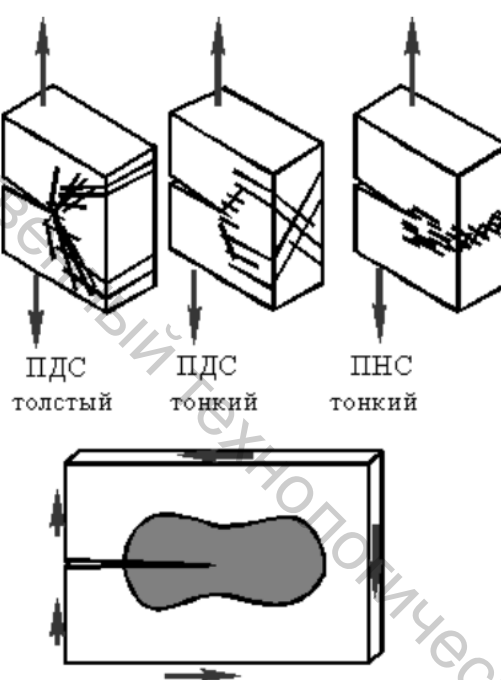


Рисунок 15.1 – Возникновение зон пластических деформаций



Рисунок 15.2 – Распределение напряжений в вершине трещины

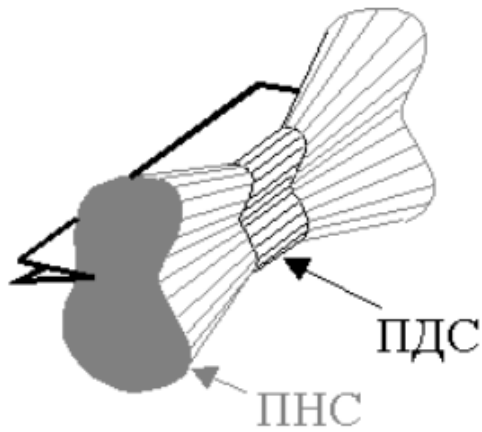


Рисунок 15.3 – Плоское напряженное состояние (ПНС) и плоское деформированное состояние (ПДС)

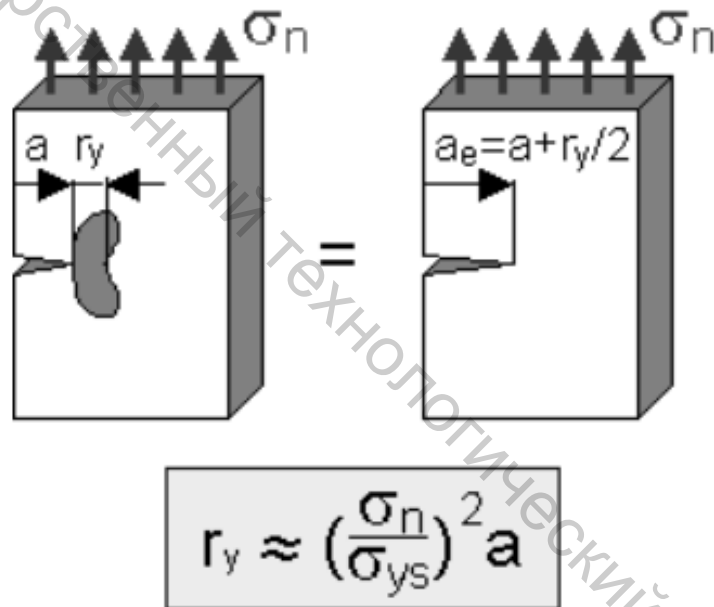
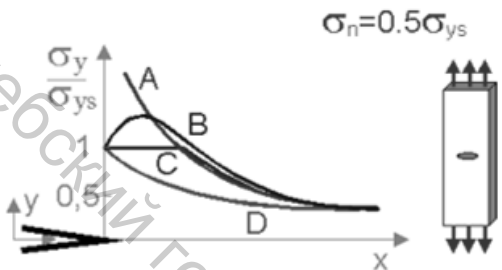


Рисунок 15.4 – Эффективная длина трещины с учетом пластической деформации в вершине трещины

15.2 Выполнение работы

В представленном конструкционном элементе определить распределение пластических напряжений и деформаций в вершине трещины. Пример конструкционного элемента с имеющимися дефектами приведен в таблице 15.1.

Таблица 15.1 – Примеры конструкционных элементов с дефектами

Эскиз элемента с дефектами	Варианты ответа
<p>Каково распределение напряжений на линии роста трещины в середине толстой стальной пластины?</p> 	<p>A B C D</p>

15.3 Оформление результатов и выводы

Пример оформления результатов лабораторной работы приведен в таблице 15.2.

Таблица 15.2 – Анализ и выводы

Эскиз элемента с дефектами	Варианты ответа
<p>Каково распределение напряжений на линии роста трещины в середине толстой стальной пластины?</p> 	<p>A B C D</p>
<p>A. <i>Неверно.</i> Это распределение упругих напряжений. C. <i>Неверно.</i> Это распределение напряжений в тонкой пластине из идеально пластического материала. D. <i>Неверно.</i> Это распределение напряжений при их концентрации.</p>	
<p>В. Верно. Это распределение напряжений для толстой стальной пластины.</p>	
<p>ВЫВОД: Правильный ответ В.</p>	

Лабораторная работа 16

Определение характеристик хрупкого разрушения

Цель работы: определение характеристик хрупкого разрушения в изделиях по результатам неразрушающего контроля.

16.1 Основные сведения

Характеристику хрупкого разрушения получают в специальных испытаниях образцов с предварительно выращенными усталостными трещинами (рис. 16.1). При увеличении напряжений в конструкции с трещинами, трещина «стартует» и быстро растёт. Коэффициент интенсивности напряжений K_I при старте трещины – максимально допустимый (критический) – K_{IC} . Как и номинальные напряжения, коэффициент интенсивности напряжений в трещинах А, В, С увеличивается пропорционально нагрузке (рис. 16.2). $K_I(A)$ увеличивается до критического значения K_{IC} в первую очередь. Образец разрушится в точке А. Вязкость разрушения – мера сопротивления росту трещины.

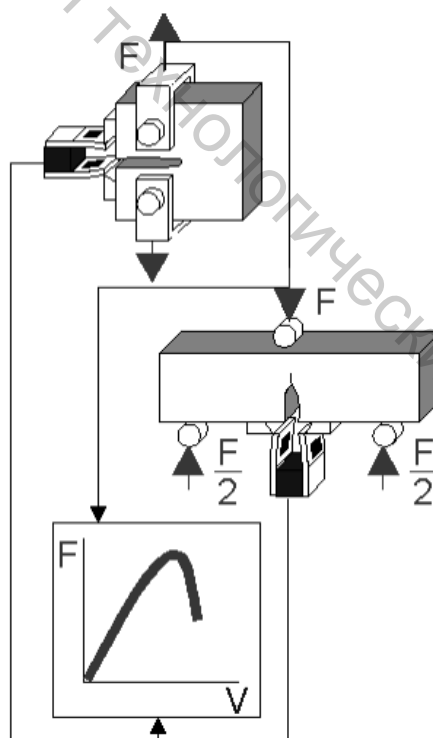


Рисунок 16.1 – Схема испытаний образцов с предварительно выращенными усталостными трещинами

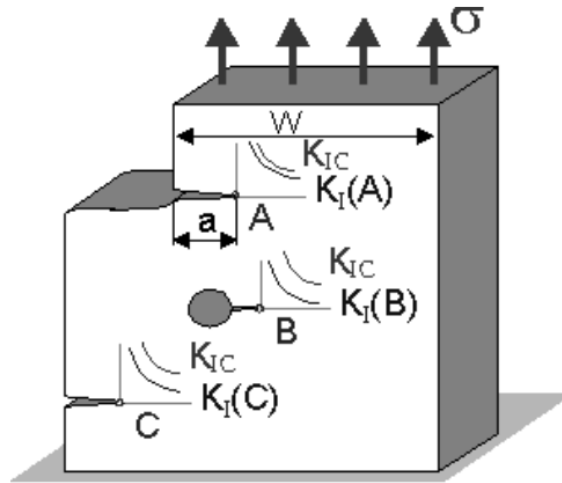


Рисунок 16.2 – Коэффициент интенсивности напряжений в трещинах А, В, С

Размерность трещиностойкости (K_{IC}) совпадает с размерностью коэффициента интенсивности напряжений [$\text{МПа м}^{1/2}$]. Формула (16.1) даст условие безопасной эксплуатации конструкции с трещинами

$$K_I = F_I \sigma \sqrt{\pi a} \leq K_{IC} . \quad (16.1)$$

Существуют комбинации «номинальное напряжение – размер трещины» (рис.16.3), приводящие к разрушению. Есть комбинации, не приводящие к отказу. Номинальные напряжения не могут превышать предел прочности, что упрощает коррекцию графика в области коротких трещин. Заметим: некоторые пластичные материалы демонстрируют медленный подрост трещины перед разрушением.

Запас прочности в материале с трещинами равен отношению K_{IC} к максимальному коэффициенту интенсивности напряжений.



Рисунок 16.3 – Зависимость номинальных напряжений от относительных размеров дефекта

16.2 Выполнение работы

В представленном элементе определить характеристики разрушения. Пример конструкционного элемента с дефектами приведен в таблице 16.1.

Таблица 16.1 – Примеры конструкционных элементов с дефектами

Эскиз элемента с имеющимися дефектами	Варианты ответа
<p>Имеется корпус клапана с заглушкой. Неразрушающим контролем была обнаружена полуэллиптическая трещина. Специалисты считают, что коэффициент интенсивности напряжений равен $40 \text{ МПа м}^{1/2}$ при рабочем давлении. Трещиностойкость материала $57 \text{ МПа м}^{1/2}$. Номинальное напряжение 200 МПа. Возможно ли увеличить давление при испытании до 2 МПа?</p>	<p>А – да, В – нет</p>
 <p>Рабочее давление 1.2 МПа. Температура > 100 °C</p>	

16.3 Оформление результатов и выводы

Пример оформления результатов лабораторной работы приведен в таблице 16.2.

Таблица 16.2 – Анализ и выводы

<p>Увеличение давления от 1,2 до 2 МПа увеличивает номинальное напряжение и коэффициент интенсивности напряжений более чем в 1,5 раза. Это означает, что коэффициент интенсивности напряжений превышает сопротивление росту трещины $40 \times 1,5 = 60 > 57 \text{ МПа м}^{1/2}$.</p>
<p>ВЫВОД: Правильный ответ В.</p>

Лабораторная работа 17

Исследование влияния температуры и времени на характер разрушения

Цель работы: изучение влияния температуры и времени на характер разрушения в изделиях по результатам неразрушающего контроля.

17.1 Основные сведения

Существуют два вида разрушения: хрупкое и вязкое. Значения их трещиностойкости различные.

Влияние температуры. Разрушение материала может быть как хрупким, так и вязким. Если температура испытаний изменяется в широких пределах, материал может иметь оба вида разрушения. Уменьшение температуры приводит к резкому снижению трещиностойкости в области температуры перехода (рис. 17.1).

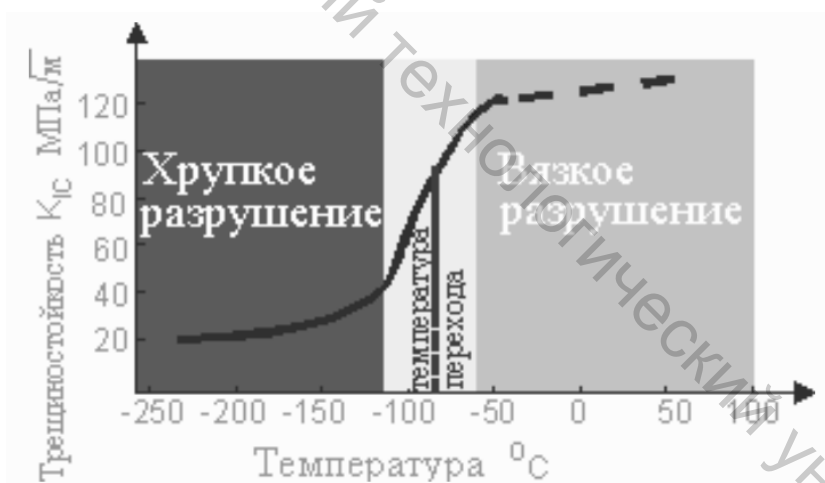


Рисунок 17.1 – Влияние температуры на характер разрушения

Коэффициент динамической трещиностойкости. Трещина, распространяющаяся с высокой скоростью, не располагает временем, чтобы привести к вязкому разрушению. Запасенная энергия деформации освобождается, трещина ускоряется. Если её скорость достигает 1,5 км/секунду, достаточно 4 секунд для разрушения 5 км газопровода.

Коэффициент динамической трещиностойкости K_{ID} меньше его статического аналога K_{IC} (рис. 17.2).

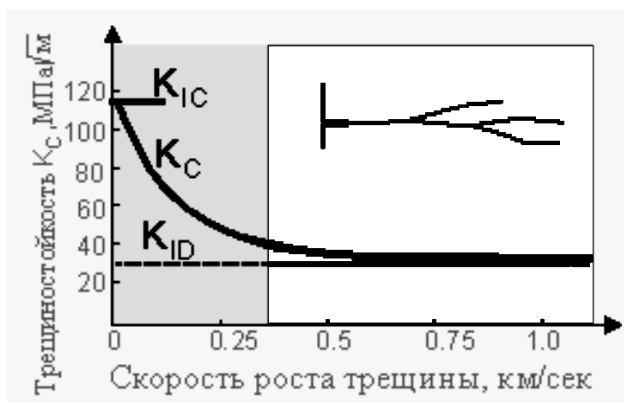


Рисунок 17.2 – Понятие о коэффициенте динамической трещиностойкости K_{ID}

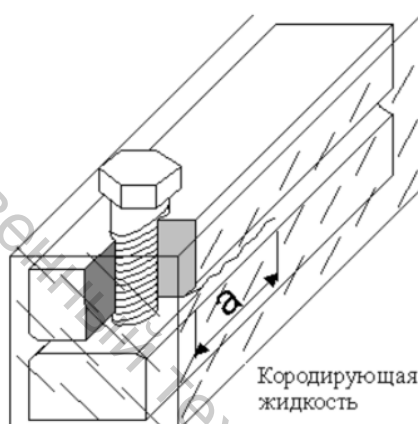


Рисунок 17.3 – Испытания коррозионным разрушением

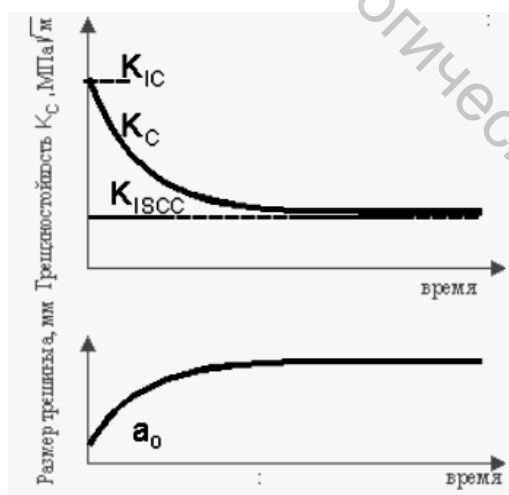


Рисунок 17.4 – Коррозионное разрушение

Коррозионное разрушение. Испытания коррозионным разрушением проводятся на двухбалочном (DB) образце с клином (рис. 17.3). Коррозия делает материал в вершине трещины хрупким. Трещина

стартует и растет, коэффициент интенсивности напряжения уменьшается с увеличением податливости балок (рис. 17.4).

Динамическое распространение трещины. Кривая $K_{IC} = \text{const}$ соответствует медленному росту трещины. Когда накопленная энергия достаточна, чтобы ускорить трещину, начинается динамическое распространение трещины (рис. 17.5).

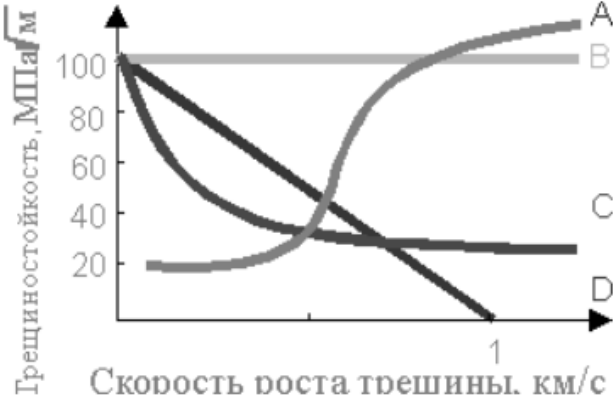


Рисунок 17.5 – Переход к динамическому распространению трещины

17.2 Выполнение работы

Пример конструкционного элемента с имеющимися дефектами приведен в таблице 17.1. В представленном конструкционном элементе исследовать влияния температуры и времени на характер разрушения.


Таблица 17.1 – Пример конструкционного элемента с дефектами

Эскиз элемента с имеющимися дефектами	Варианты ответа
<p data-bbox="209 1525 1070 1599">Какая кривая отражает трещиностойкость углеродистой стали?</p> 	<p data-bbox="1209 1525 1241 1682">A B C D</p>

17.3 Оформление результатов и выводы

Пример оформления результатов лабораторной работы приведен в таблице 17.2.

Таблица 17.2 – Анализ и выводы

Эскиз элемента с имеющимися дефектами	Варианты ответа
<p>Какая кривая отражает трещиностойкость углеродистой стали?</p> 	<p>A B C D</p>
<p>A. Неверно. Трещиностойкость не может увеличиваться при высоких скоростях деформации. B. Неверно. Линия не учитывает скорости роста трещины. C. Верно. Трещиностойкость уменьшается до K_{ID}. D. Неверно. Трещиностойкость не может быть равна нулю. ВЫВОД: Правильный ответ C.</p>	

Лабораторная работа 18

Исследование влияния масштабного фактора на характер разрушения

Цель работы: исследование влияния масштабного фактора на характер разрушения изделий по результатам неразрушающего контроля.

18.1 Основные сведения

Утолщение листа сказывается на размере пластической зоны и в сценарии разрушения. Тонкие пластины разрушаются срезом, для толстых пластин типичен раскол (рис. 18.1). При увеличении размеров образца наблюдается уменьшение сопротивления росту трещины (рис. 18.2). Материалы с меньшим размером зерна обычно обладают более высокими механическими характеристиками (рис. 18.3).

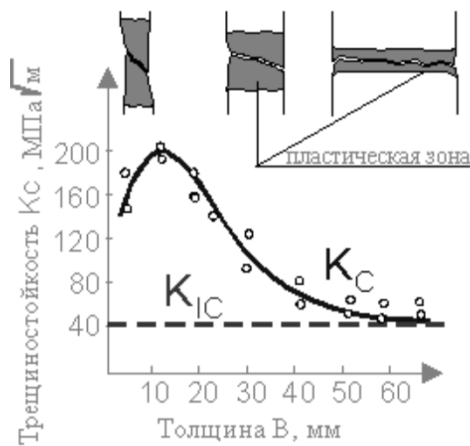


Рисунок 18.1 – Характер разрушения материала в зависимости от толщины листа

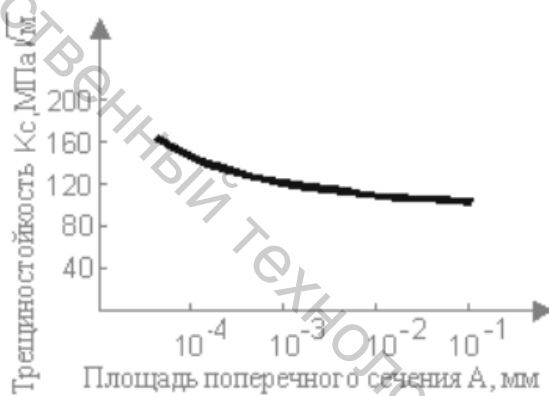


Рисунок 18.2 – Зависимость трещиностойкости от площади поперечного сечения образца

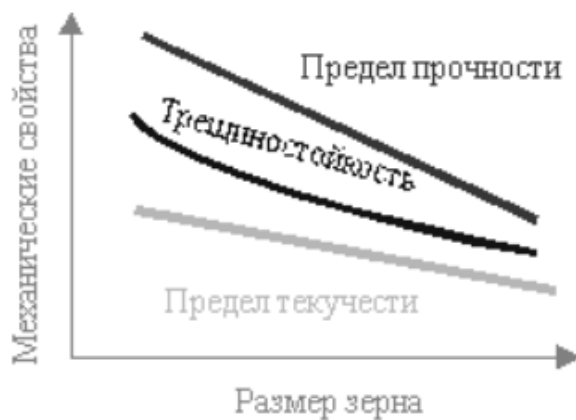


Рисунок 18.3 – Зависимость механических свойств от размера зерна



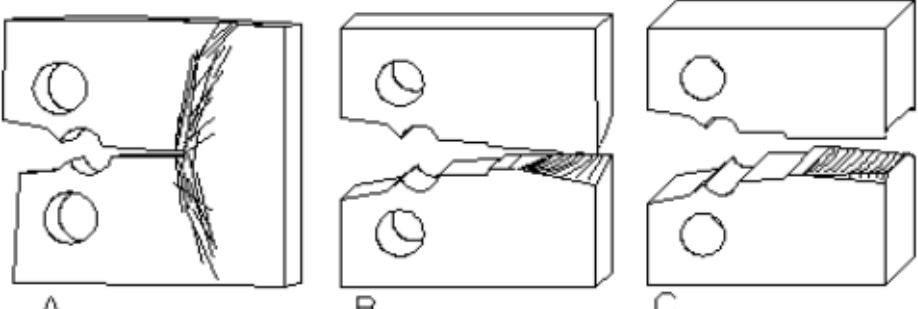
Рисунок 18.4 – Зависимость номинального напряжения от размера трещины

Наибольшее напряжение в пластине с трещиной не может превысить предел прочности, поправочная функция F_U в коэффициенте интенсивности напряжений учитывает это. В средней части диаграммы коэффициент интенсивности напряжений берётся без поправочной функции (рис. 18.4).

18.2 Выполнение работы

В представленном конструкционном элементе учесть влияние масштабного фактора на характер разрушения. Пример конструкционного элемента с дефектами приведен в таблице 18.1.

Таблица 18.1 – Пример конструкционного элемента с дефектами

Эскиз элемента с дефектами	Варианты ответа
<p>Изображены три образца из углеродистой стали после испытаний. У какого из них самая высокая трещиностойкость K_{IC}?</p>  <p style="text-align: center;">A B C</p>	<p>A B C</p>

18.3 Оформление результатов и выводы

Пример оформления результатов лабораторной работы приведен в таблице 18.2.

Таблица 18.2 – Анализ и выводы

Эскиз элемента с дефектами	Варианты ответа
<p>Изображены три образца из углеродистой стали после испытаний. У какого из них самая высокая трещиностойкость K_C?</p> 	<p>A B C</p>
<p>Высокая трещиностойкость K_C отвечает высокой вязкости. Образец А демонстрирует это свойство наиболее ярко.</p> <p>ВЫВОД: Правильный ответ А.</p>	

Лабораторная работа 19

Исследование влияния смешанного нагружения на характер разрушения

Цель работы: исследование влияния смешанного нагружения на характер разрушения изделий по результатам неразрушающего контроля.

19.1 Основные сведения

Существует 3 основных типа перемещений берегов трещины: I – раскрытие трещины; II – сдвиг в плоскости; III – антиплоский сдвиг, наконец I+II+III – смешанное нагружение (рис. 19.1).

Существует несколько видов разрушения, например раскрытие А или сдвиг В (рис. 19.2). На практике чаще встречаются разрушения, которые вызваны простым раскрытием трещины, реже чистым или пластическим сдвигом.

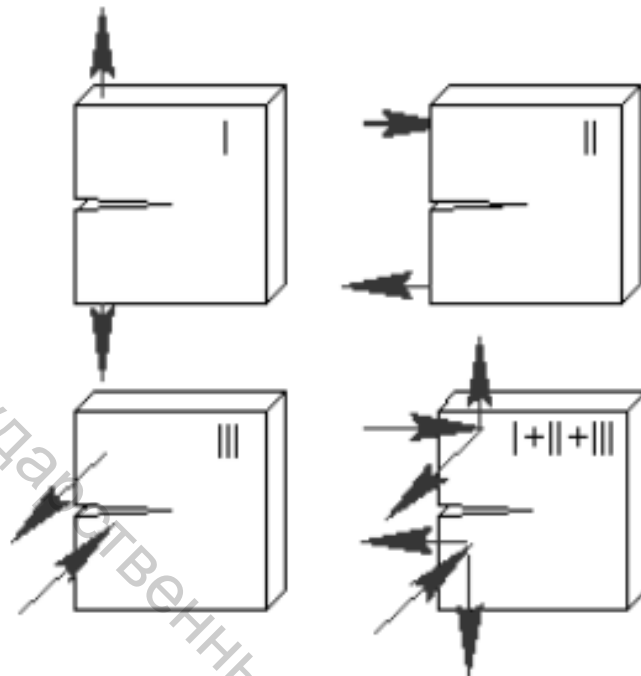


Рисунок 19.1 – Типы перемещений берегов трещины

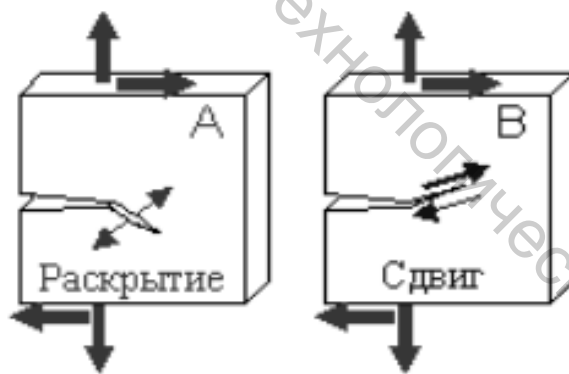


Рисунок 19.2 – Основные виды разрушения

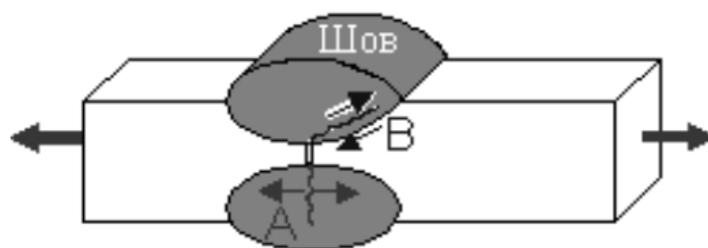


Рисунок 19.3 – Распространение трещин раскрытия и сдвига

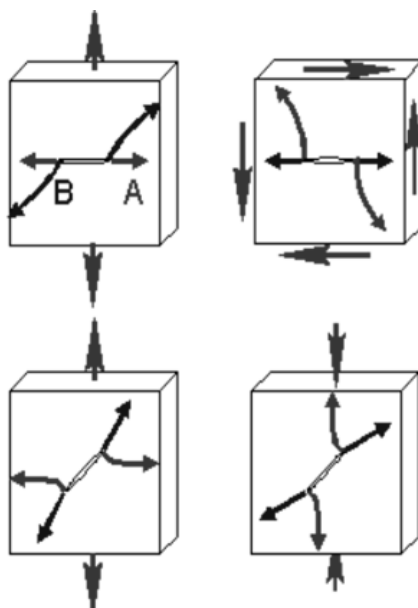


Рисунок 19.4 – Путь трещины после старта при растяжении, сжатии и сдвиге

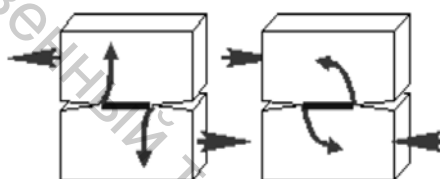


Рисунок 19.5 – Пластический сдвиг

Трещина А растет перпендикулярно максимальным касательным напряжениям (рис. 19.3). Путь трещины после старта зависит от схемы нагружения (рис. 19.4). Хрупкие материалы обычно разрушаются, раскалываясь (А). Пластический сдвиг характерен для пластичных материалов и образцов с нетто-сечением (рис. 19.5). Трещины, перпендикулярные максимальным растягивающим напряжениям, имеют большой коэффициент концентрации напряжений. Трещина А эквивалентна трещине В, если они имеют одинаковую проекцию. При увеличении напряжения они «стартуют» вместе (рис. 19.6). При сдвиге распределение напряжений аналогично распределению при отрыве (рис. 19.7).

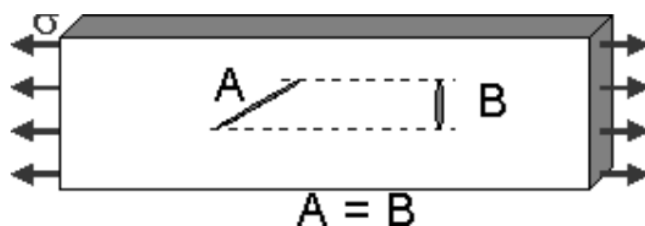


Рисунок 19.6 – Эквивалентные трещины

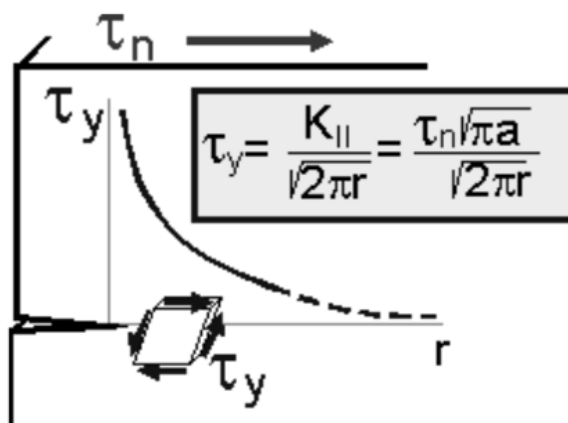


Рисунок 19.7 – Распределение напряжений при сдвиге.
 K_{II} – коэффициент интенсивности напряжений по II типу перемещений берегов трещины (рис. 19.1)

19.2 Выполнение работы

В представленном конструкционном элементе определить коэффициенты интенсивности напряжений. Пример конструкционного элемента с дефектами приведен в таблице 19.1.

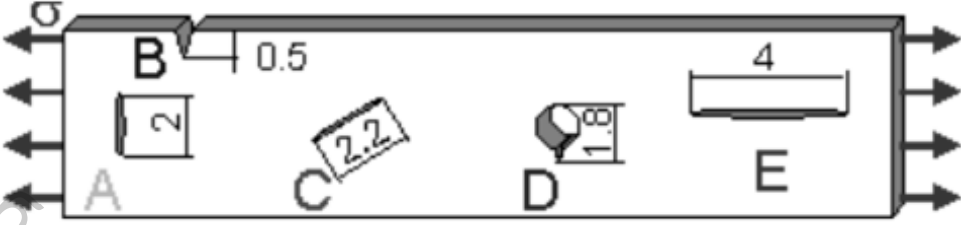
Таблица 19.1 – Пример конструкционного элемента с дефектами

Эскиз элемента с имеющимися дефектами	Варианты ответа
	A B C D E

19.3 Оформление результатов и выводы

Пример оформления результатов лабораторной работы приведен в таблице 19.2.

Таблица 19.2 – Анализ и выводы

Эскиз элемента с имеющимися дефектами	Варианты ответа
<p data-bbox="209 286 1015 324">В каком месте произойдет разрушение пластины?</p> 	<p data-bbox="1220 286 1252 495">A B C D E</p>
<p data-bbox="209 607 1386 680">В. Неверно. Коэффициент интенсивности напряжений меньше, чем для трещины А.</p> <p data-bbox="209 687 1386 761">С. Неверно. Проекция трещины на вертикальную ось $2,2\cos 45^\circ$ меньше, чем размер трещины А (2 мм).</p>	
<p data-bbox="209 779 1015 813">А. Верно. Трещина имеет самый большой размер.</p>	
<p data-bbox="209 819 748 853">ВЫВОД: Правильный ответ А.</p>	

Лабораторная работа 20

Изучение методов предотвращения разрушений

Цель работы: исследование методов предотвращения разрушений в изделиях по результатам неразрушающего контроля.

20.1 Основные сведения

Наиболее надежный подход в этой области «Нет трещин – нет проблем», его трудно добиться. Инженеры стремятся получить конструкцию с высокой прочностью, высокой вязкостью и высокой трещиностойкостью. Когда добиться этого невозможно, существуют некоторые методы предотвращения катастрофического разрушения, к ним относятся: 1) увеличение трещиностойкости вязкого материала (А – С) местным нагревом (D) (рис. 20.1); 2) уменьшение коэффициента интенсивности напряжений путем размещения отверстия на пути трещины (E, F) (рис. 20.2), установки накладок (G) (рис. 20.3), установки жестких элементов (H) (рис. 20.4), использования композитных материалов (I) (рис. 20.5); 3) «Течь-до-разрушения» – эффективный способ предотвратить катастрофическое разрушение сосудов давления (J) (рис. 20.6).

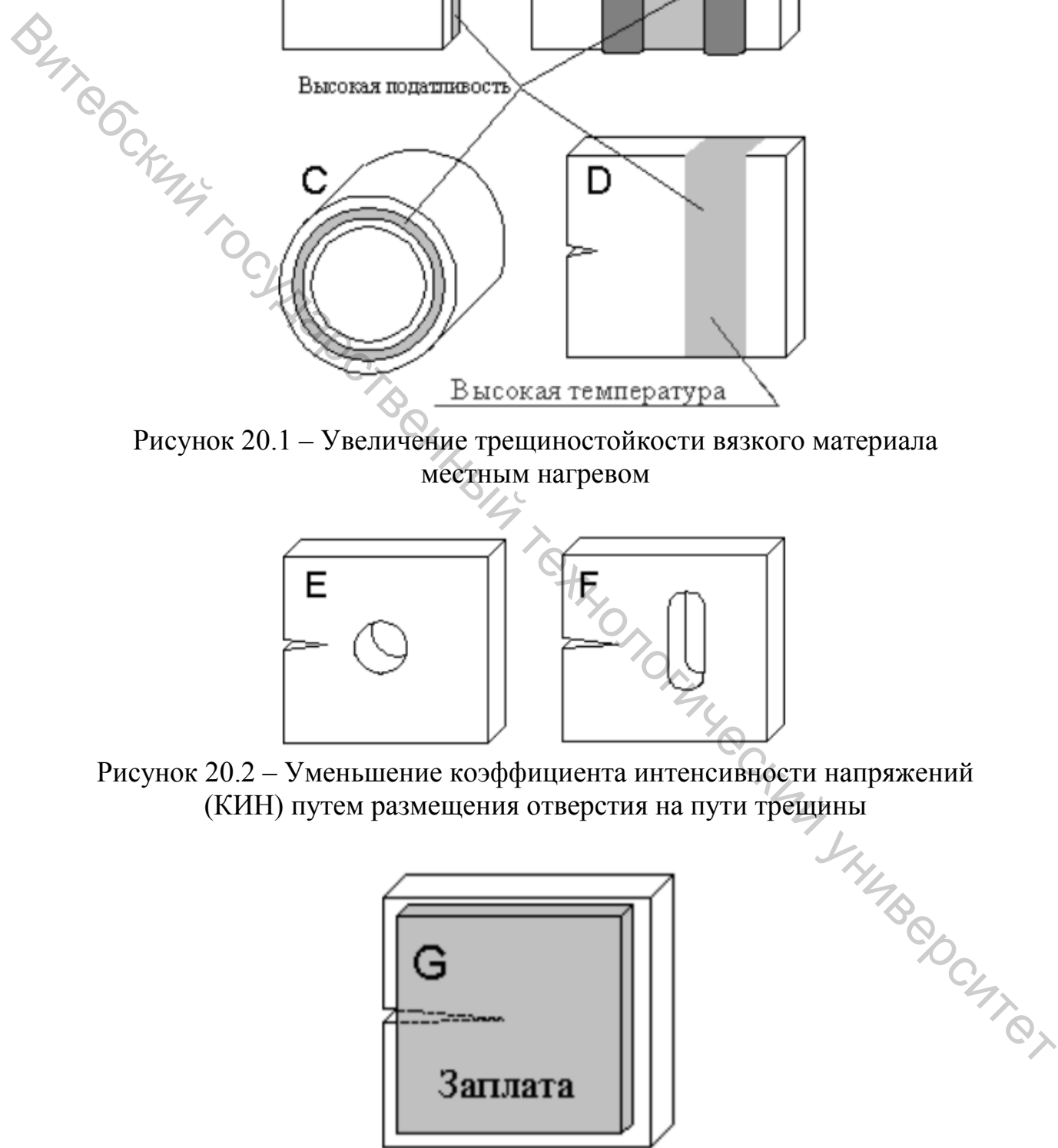


Рисунок 20.1 – Увеличение трещиностойкости вязкого материала местным нагревом

Рисунок 20.2 – Уменьшение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) путем размещения отверстия на пути трещины

Рисунок 20.3 – Уменьшение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) путем установки накладок

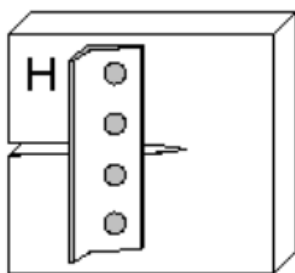


Рисунок 20.4 – Уменьшение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) путем установки жестких элементов

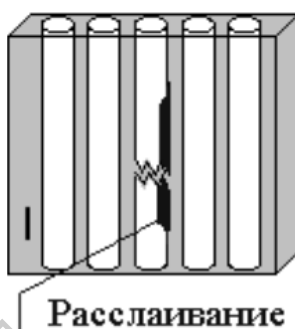


Рисунок 20.5 – Уменьшение коэффициента интенсивности напряжений (КИН) путем использования композитных материалов

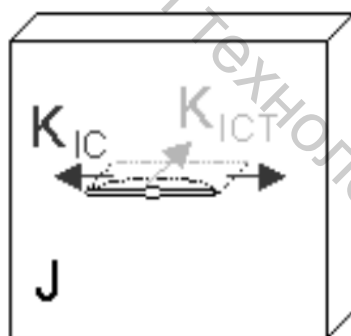


Рисунок 20.6 – «Течь-до-разрушения»

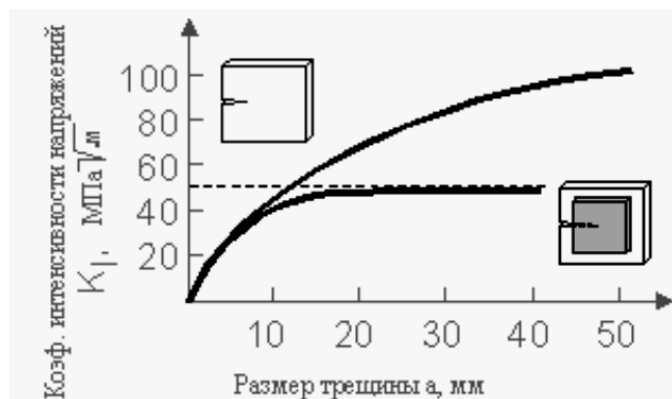


Рисунок 20.7 – Снижение внутренних напряжений путем установки накладок

Лучше позволить небольшой трещине расти через стену (**Ж**) и обнаружить ее текущей, чем иметь динамический старт трещины и разрушение целого сосуда. Существует две характеристики материала:

- 1) трещиностойкость для полуэллиптической трещины K_{IcT} ;
- 2) трещиностойкость для сквозной трещины K_{Ic} .

Снижение внутренних напряжений путем установки накладок дает снижение коэффициента интенсивности напряжений. Если соединение достаточно прочное, то коэффициент интенсивности напряжений не превышает некоторого значения (рис. 20.7). Продольные балки (стрингеры) на пути трещины изменяют критическую комбинацию «напряжение – размер трещины» (рис. 20.8). Усиленная конструкция имеет больший размер трещины при том же самом напряжении.

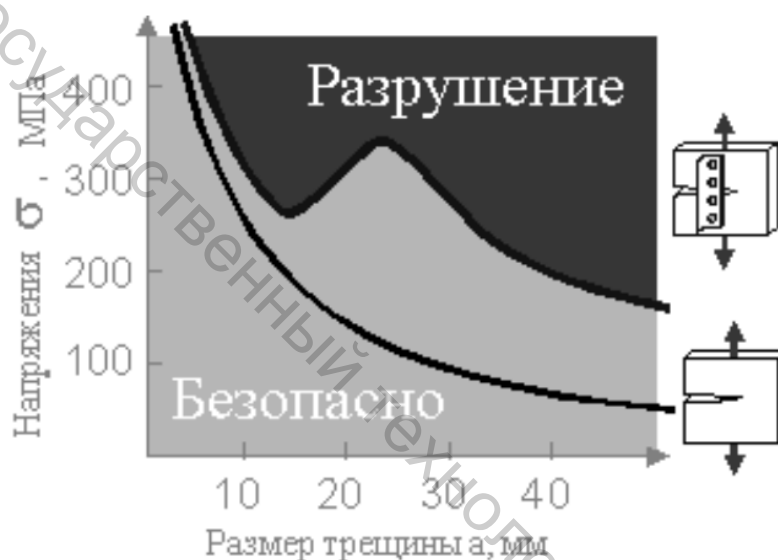


Рисунок 20.8 – Уменьшение коэффициента интенсивности напряжений путем установки жестких элементов (стрингеров)

20.2 Выполнение работы

Исследовать методы предотвращения разрушений в представленном конструкционном элементе. Пример конструкционного элемента с имеющимися дефектами приведен в таблице 20.1.

20.3 Оформление результатов и выводы

Пример оформления результатов лабораторной работы приведен в таблице 20.2.

Таблица 20.1 – Пример конструкционного элемента с дефектами

Эскиз элемента с дефектами
Выберите из нижеперечисленных факторов тот, который уменьшает трещиностойкость стального сосуда давления.
Варианты ответа: А – жесткие ребра, В – биметаллические стенки (вязкость + высокая прочность), С – ремонт зон с обнаруженными небольшими дефектами, D – закалка конструкции.

Таблица 20.2 – Анализ и выводы

Эскиз элемента с дефектами
Выберите из нижеперечисленных факторов тот, который уменьшает трещиностойкость стального сосуда давления.
Варианты ответа: А – жесткие ребра, В – биметаллические стенки (вязкость + высокая прочность), С – ремонт зон с обнаруженными небольшими дефектами, D – закалка конструкции.
Фактор, уменьшающий трещиностойкость стального сосуда давления:
A. Неверно. Жесткие ребра обычно не уменьшают трещиностойкость.
B. Неверно. Биметаллические стенки обычно не уменьшают трещиностойкость.
C. Неверно. Исправления обычно увеличивают трещиностойкость.
D. Верно. Закалка может уменьшить трещиностойкость.
ВЫВОД: Правильный ответ D.

Лабораторная работа 21 Анализ разрушений

Цель работы: анализ разрушений в изделиях по результатам неразрушающего контроля.

21.1 Основные сведения

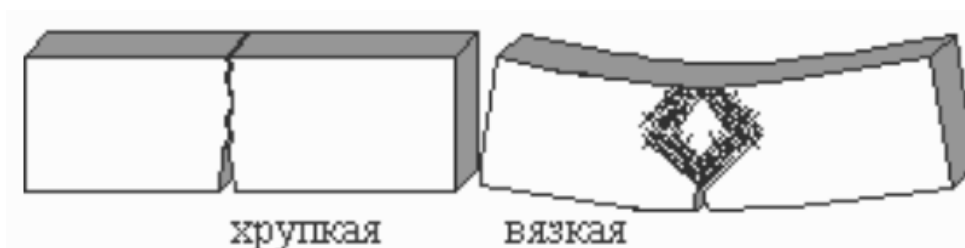


Рисунок 21.1 – Виды разрушенной поверхности

Хрупкое и вязкое разрушение имеют разные виды разрушенной поверхности (рис. 21.1). Возможно обнаружить дефекты на этой поверхности. Дефекты в зонах растягивающих напряжений – обычно главные источники усталостных трещин. Трещиностойкость зависит от ориентации трещины и обычно больше для трещин, перпендикулярных направлению прокатки (L-T) (рис. 21.2). Вязкость разрушения и максимальная прочность на растяжение используется для коротких трещин в сосуде давления (рис. 21.3). Скорость роста усталостной трещины зависит от коэффициента интенсивности напряжений. Чем выше коэффициент интенсивности напряжений, тем больше скорость роста трещины.

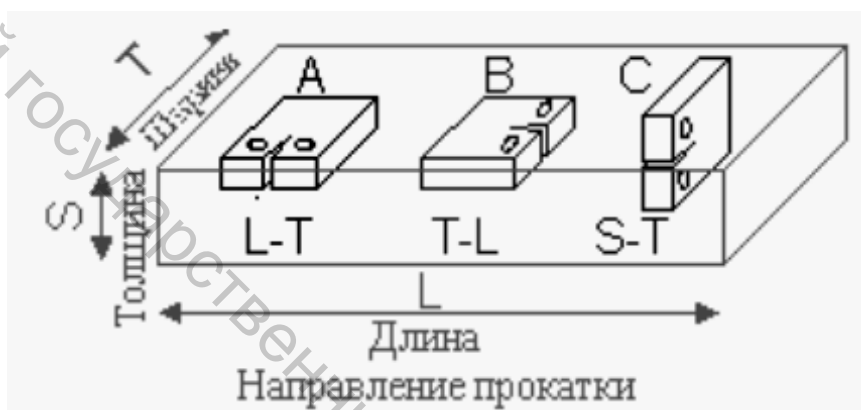


Рисунок 21.2 – Зависимость трещиностойкости от ориентации трещины



Рисунок 21.3 – Область безопасной эксплуатации

Типичные диаграммы «размер усталостной трещины – число циклов» приведены на рисунке 21.4. Короткие трещины, стартовавшие от отверстий, находятся в зоне концентрации напряжений (коэффициент концентрации напряжений 3). Относительно длинные

трещины, проходящие через отверстие, рассматриваются как трещины, увеличенные на диаметр этого отверстия.

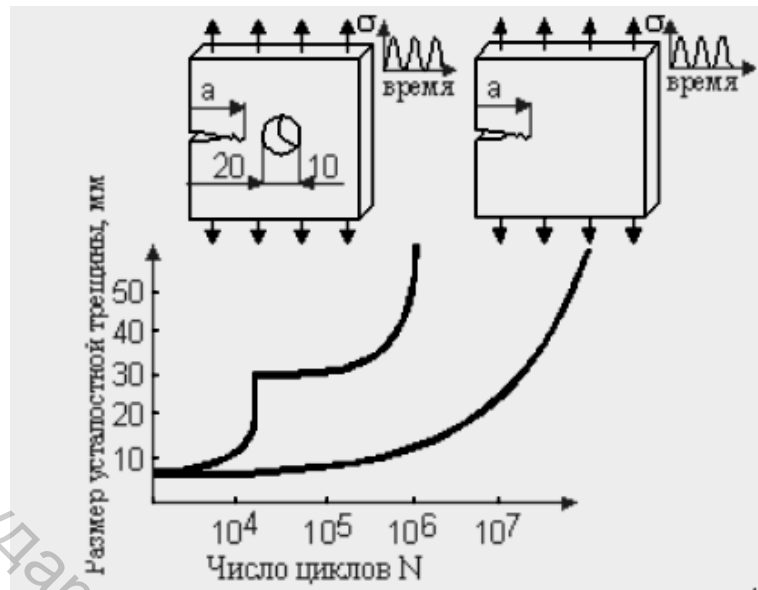


Рисунок 21.4 – Типичные диаграммы «размер усталостной трещины – число циклов»

21.2 Выполнение работы

Анализ разрушений в представленном конструкционном элементе. Примеры конструкционных элементов с дефектами приведены в таблице 21.1.

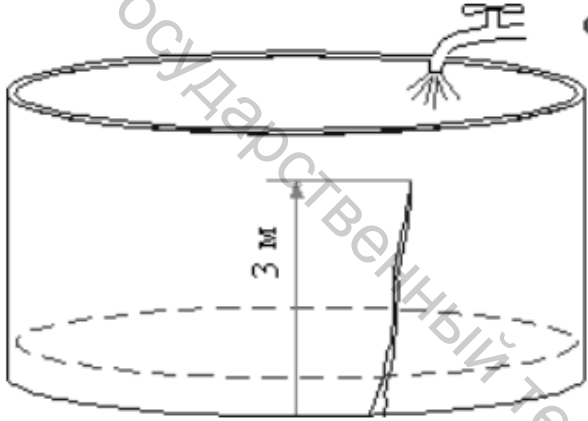
Таблица 21.1 – Пример конструкционного элемента с дефектами

Эскиз элемента с дефектами	
После ремонта стальной резервуар без тепловой изоляции был наполнен доверху горячей фосфорной кислотой. В период зимы хрупкая трещина разрушила конструкцию. Что было главной причиной аварии? Варианты ответа: А – коррозия; В – перегрузка; С – тепловой удар; D – усталость.	
	<p>Фосфорная кислота : + 60°C</p> <p>Стальной резервуар - 28°C</p>

21.3 Оформление результатов и выводы

Пример оформления результатов лабораторной работы приведен в таблице 21.2.

Таблица 21.2 – Анализ и выводы

Эскиз элемента с имеющимися дефектами	
После ремонта стальной резервуар без тепловой изоляции был наполнен доверху горячей фосфорной кислотой. В период зимы хрупкая трещина разрушила конструкцию. Что было главной причиной аварии? Варианты ответа: А – коррозия; В – перегрузка; С – тепловой удар; D – усталость.	
	<p>Фосфорная кислота : + 60°C</p> <p>Стальной резервуар - 28°C</p>
А. Неверно. Коррозия – процесс, происходящий в течение длительного времени. В. Неверно. Резервуар был не полностью наполнен. С. Верно. Высокая разность температур. Пластичность и вязкость разрушения уменьшаются при отрицательных температурах. D. Неверно. Усталость – процесс, происходящий в течение длительного времени.	
ВЫВОД: Правильный ответ С.	

IV МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ ПОЛИМЕРОВ

Лабораторная работа 22

Изучение докритического роста трещины в полимерном материале

Цель работы: рассмотрение докритического роста трещины в полимерном материале.

22.1 Содержание работы

Широкое использование элементов конструкций из полимерных материалов, работающих при повышенной температуре, влажности, в агрессивной среде и в других экстремальных условиях, требует выявления закономерностей их разрушения. Разрушение этих материалов обладает своими специфическими особенностями как при образовании трещин, так и во время их роста.

Здесь рассмотрен вариант уже имеющейся трещины. При действии докритических нагрузок рост трещины в полимерном материале происходит вследствие ползучести материала. На кривой развития трещины, выражающей зависимость длины трещины от времени $l = f(t)$ при действии постоянных докритических нагрузок, можно (условно) выделить три участка.

Первый (инкубационный период) отвечает раскрытию трещины до ее роста.

На втором участке (основном, или медленном) ускорение в движении трещины мало, трещина на большей части этого участка развивается со скоростью, близкой к постоянной.

Третий (динамический участок) начинается в момент, когда трещина достигает критического размера (в конце основного периода). Длительность этого периода крайне мала (в сравнении с первыми двумя периодами развития трещины), вкладом его в общую долговечность тела с трещиной обычно пренебрегают.

Долговечность полимерного тела с трещиной может быть представлена как сумма длительностей трех вышеназванных периодов развития трещины. Длительности периодов развития трещины зависят в большинстве случаев от типа полимерного материала.

Докритическая диаграмма развития трещины в полимерном материале может быть использована в расчетах конструкций на трещиностойкость. Для получения кривой роста трещины в полимерном материале при докритических нагрузках можно использовать плоские образцы с центральной трещиной, изготовленные из

полиметилметакрилата (ПММА), иначе – из органического стекла. Для лабораторной работы подойдут образцы, изготовленные, например, из целлулоида или полиэтилена. Форма концов образцов определяется конструкцией захватов в испытательной машины. Длина трещины в образце подбирается с учётом его ширины – из условия $2l \ll 2b$ ($2l$ – длина трещины, $2b$ – ширина образца). В испытаниях прикладывают к образцу постоянное растягивающее напряжение σ , обеспечивающее медленный рост трещины. Это напряжение $\sigma < \sigma_c$.

Для измерения длины $l=f(t)$ трещины в ее развитии можно использовать катетометр или обычный микроскоп, закрепленный на испытательной машине перед образцом. В крайнем случае, можно использовать лупу, но тогда на образце следует перед вершинами трещины процарапать штангенциркулем или другим заостренным предметом вертикальные полосы через равные промежутки, по ним будут производиться отсчет длины трещины. Результаты отсчетов записывают в таблицу (табл. 22.1), набранную в Microsoft Excel.

Таблица 22.1 – Кинетика роста трещины

Размеры образца	LxВxH										
Приложенная нагрузка, Па	σ										
Время t, ч	0	t ₁	t ₂	t ₃	t ₄	t ₅	t ₆	t ₇	t ₈	t ₉	t ₁₀
Длина трещины l, мм	l ₀	l ₁	l ₂	l ₃	l ₄	l ₅	l ₆	l ₇	l ₈	l ₉	l ₁₀

22.2 Результаты испытаний

На основе данных, представленных в таблице 22.1, строят график $l-t$ (моменты времени указывают на оси у, длину трещины – на оси х). По графику устанавливается область постоянства скорости трещины и критическая длина трещины. Критическую длину трещины определяют по абсциссе вертикальной асимптоты кинетической кривой, отвечающей разрыву образца.

22.3 Выводы

Инкубационный период – время, до истечения которого трещина не растет, трещина раскрывается, после чего движение конца трещины становится заметным. Наступает основной период роста трещины.

Она растёт с примерно постоянной скоростью (с небольшим ускорением). К концу периода скорость роста трещины резко возрастает, она переходит в динамический период развития – в спонтанное разрушение образца. Образец распадается на две части.

Лабораторная работа 23

Определение характеристик зоны предразрушения трещины в полимерном материале

Цель работы: изучение зоны предразрушения перед вершиной трещины и её характеристик в полимерном материале.

23.1 Содержание работы

Экспериментальные исследования показали, что перед вершиной движущейся трещины формируется зона предразрушения. Форма этой зоны и ее структурное состояние зависят от геометрии тела, характера и величины внешней нагрузки и вида материала. К примеру, в металлах область предразрушения представляет собой пластическую зону, внутри которой вследствие высокого уровня напряжений наблюдается частичная деструкция материала. В твердых полимерах зона предразрушения – так называемые трещины серебра, т. е. узкие трещиноподобные зоны с берегами, стянутыми тяжами – фибриллами. В волокнистых композитных материалах на основе вязкоупругих полимеров и высокопрочных упругих волокон зона предразрушения представляет собой локальную зону, где разрушено менее прочное связующее и часть армирующих волокон. Во многих случаях зона предразрушения трещины в полимерном материале представляет собой узкий клинообразный дефект на продолжении трещины.

Зона предразрушения трещины характеризуется следующими параметрами:

- 1) критическим раскрытием трещины δ_c ;
- 2) длиной d ;
- 3) нормальными напряжениями σ_0 , препятствующими раскрытию трещин в ее вершине.

Определение характеристик зоны предразрушения трещины в полимерном материале представляет собой сложный процесс, требующий специальной аппаратуры. Однако оценить эти характеристики можно, если провести испытания на определение предельных нагрузок для образцов с разными длинами трещин, а затем,

приняв одну из известных моделей разрушения, расчетным путем определить по ней указанные характеристики. Для эксперимента следует приготовить несколько полимерных прямоугольных образцов, содержащих центрально расположенные трещины разной длины. Можно вырезать из триацетатной пленки образцы шириной 25 мм с таким расчетом, чтобы их ширина превышала длину трещины в несколько раз (например, в пять). Это позволит использовать приведенные ниже соотношения (23.1) и (23.2), которые получены для неограниченной плоскости. Возможные полудлины трещин при данной ширине образцов могут быть такими: $\ell_1 = 0,75$ мм, $\ell_2 = 1,5$ мм и $\ell_3 = 2,5$ мм. Испытуемая партия образцов должна содержать не менее трех экземпляров. С целью исключения эффектов, связанных с ползучестью материала, образцы одной партии нужно нагружать при различных скоростях перемещения захватов испытательной машины. Начиная со скорости перемещения около 30–40 мм/мин, в расчетах следует брать значения предельных нагрузок при больших скоростях перемещения захватов, например, 70–90 мм/мин. В результате эксперимента получают критические напряжения p_{c1} , p_{c2} , соответствующие полудлинам трещин ℓ_1 , ℓ_2 .

23.2 Результаты испытаний

Чтобы определить по полученным критическим напряжениям p_{c1} , p_{c2} характеристики зоны предразрушения, необходимо выбрать известную теоретическую модель разрушения. В качестве модели разрушения примем раскрытие трещины δ_c в модели [8]. В этом случае условие конечности напряжений и постоянства раскрытия в вершине трещины в задаче Гриффитса о растяжении плоскости, ослабленной трещиной, (в плоском напряженном состоянии) можно записать в виде

$$p_c = \frac{2\sigma_0}{\pi} \arccos\left(\frac{\ell}{\ell+d}\right), \quad (23.1)$$

$$\delta_c = \frac{8\ell\sigma_0}{\pi E} \ln\left(1 + \frac{d}{\ell}\right), \quad (23.2)$$

где p_c – критическое напряжение, соответствующее началу движения трещины; ℓ – полудлина трещины; d – длина зоны предразрушения.

Критические напряжения p_{c1} , p_{c2} соответствуют полудлинам трещин ℓ_1 , ℓ_2 ; используя соотношения (23.1), (23.2), получим для определения параметров зоны предразрушения систему уравнений

$$p_{c1} = \frac{2\sigma_0}{\pi} \arccos\left(\frac{1}{1+\frac{d_1}{\ell_1}}\right), \quad (23.3)$$

$$p_{c2} = \frac{2\sigma_0}{\pi} \arccos\left(\frac{1}{1+\frac{d_2}{\ell_2}}\right), \quad (23.4)$$

$$\delta_c = \frac{8\ell_1\sigma_0}{\pi E} \ln\left(1 + \frac{d_1}{\ell_1}\right), \quad (23.5)$$

$$\delta_c = \frac{8\ell_2\sigma_0}{\pi E} \ln\left(1 + \frac{d_2}{\ell_2}\right). \quad (23.6)$$

В результате решения системы уравнений (23.3–23.6) получим величины σ_0 , δ_c , d_1 , d_2 .

Как пример: найденные величины для образцов из триацетатной пленки с трещиной $2\ell_2 = 3$ мм: $\sigma_0 = 10^{-7}$ Па, $\delta_c = 0,045$ мм, $d = 0,93$ мм.

23.3 Выводы

Особенности полученных данных: напряжение σ_0 оказывается меньше предела σ_b , длина зоны предразрушения существенно зависит от длины трещины.

Заметим: рассмотренный подход в определении характеристик зоны предразрушения трещины в полимерном материале предпочтительнее использовать для пластичного материала.

Лабораторная работа 24

Определение критического значения коэффициента интенсивности напряжений для трещины в полимерном материале

Цель работы: определение критического значения коэффициента интенсивности напряжений для трещины в полимерном материале.

24.1 Содержание работы

Определение критического значения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) для трещины в полимерном

материале имеет свои особенности в отличие от случая металлов. При монотонном нагружении для полимерных материалов с трещинами критическое значение K_{Ic} или K_c , соответствующее спонтанному или динамическому характеру разрушения, зависит от скорости нагружения или времени испытания. На значения K_{Ic} и K_c оказывает большое влияние ползучесть материала, что характерно для вязкоупругих материалов, к которым относятся полимеры. При сравнительно большой скорости нагружения значения K_{Ic} или K_c приближаются к предельным значениям (при кратковременном нагружении). В связи с затруднениями при создании большой скорости нагружения можно поступить иначе: для эксперимента вырезается из листового полимерного материала 10 плоских образцов различной длины с центральными трещинами; для каждой пары образцов устанавливают на испытательной машине фиксированную скорость перемещения одного из захватов.

24.2 Результаты испытаний

На основании полученных данных (табл. 24.1) определяют коэффициент интенсивности напряжений K_I по известной формуле для плоского образца с центральной трещиной:

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi l \sec \frac{\pi l}{2b}}, \quad (24.1)$$

где σ – напряжение в образце; l – полудлина трещины; $2b$ – ширина образца.

После получения коэффициента интенсивности напряжений (КИН) и времени разрушения образцов производят обработку данных. Обработка данных заключается в их аппроксимации линейной зависимостью, для которой по методу наименьших квадратов находят коэффициенты аппроксимирующей функции. Далее, осуществляя экстраполяцию назад, находят значение K_I при $t=0$. Это и будет критическое значение коэффициента интенсивности напряжений.

Таблица 24.1 – Определение КИН для трещины в полимерном материале

Номер образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Размеры образца	$l \times b \times h$									
Длина l , мм										
Ширина b , мм										
Толщина h , мм										
Приложенная нагрузка σ , МПа										
Длина трещины l , мм										
Время разрушения образца t , с										
КИН, МПа $\sqrt{м}$										

24.3 Выводы

При определении критического значения КИН для трещины в полимерном материале следует учитывать ползучесть материала. Его определение (если нет испытательной машины с большой скоростью приложения нагрузки) можно произвести по методике, приведенной выше.

Лабораторная работа 25

Экспериментальная проверка формулы Гриффитса

Цель работы: экспериментальная проверка формулы Гриффитса для зависимости нагрузки, разрушающей пластину с центрально расположенной трещиной, от длины трещины.

25.1 Содержание работы

Формула Гриффитса для случая растяжения тонкой пластинки с трещиной (плоское напряженное состояние) нормальным к

направлению трещины и постоянным на бесконечности напряжением σ (рис. 25.1) имеет вид

$$\sigma_* = \sqrt{\frac{2\gamma E}{\pi\ell}}, \quad (25.1)$$

где σ_* – разрушающее значение номинального напряжения, γ – удельная поверхностная энергия при хрупком разрушении или сумма поверхностной и удельной пластической диссипации энергии при квазихрупком разрушении.

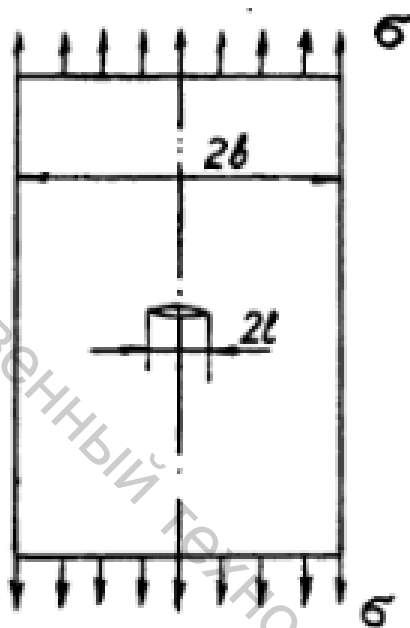


Рисунок 25.1 – Образец для испытаний

Образцы для испытаний имеют конечную ширину $2b$ с трещинами различной длины 2ℓ (рис. 25.1). Формула (25.1) применима в случае $b > 3\ell$. Расстояние от захватов машины до линии трещины не должно быть менее $3b$ – для обеспечения однородности поля напряжений. Работа проводится на образцах из полиметилметакрилата (ПММА). Трещина моделируется пропилом вольфрамовой проволокой диаметром $0,1$ мм.

25.2 Методика проведения работы

Вначале определяется модуль упругости E материала образца без трещины.

Для определения энергии γ испытываются 3–5 образцов с центральной трещиной различной длины на установке ИЧЗ-9. Измеряется длина трещины и расстояния от вершин трещины до

боковых поверхностей образца. Затем закрепленный в захватах образец разрушают при растяжении, фиксируя нагрузку P_* .

25.3 Обработка результатов

По результатам испытаний образцов с трещинами, сведенными в таблицу $\sigma_* - \ell$, нанести точки в плоскости $y - x$: $y = \lg \sigma_*$, $x = \lg \ell$ (σ_* в Н/м², ℓ в м). Напряжение σ_* , определить по сечению «нетто»: $\sigma_* = P_*/2(b-\ell)h$. По экспериментальным точкам построить в плоскости Oxy по методу наименьших квадратов прямую $y=a-kx$: из условия минимума функции $\sum_{i=1}^M (y_i - a + kx_i)^2$ по a и k (i – номер экспериментальной точки) получить систему уравнений относительно a и k

$$aM - k \sum_i x_i = \sum y_i,$$

$$a \sum_i x_i - k \sum_i x_i^2 = \sum_i x_i y_i.$$

Логарифмируя выражение (25.1) находим $y = \lg \sigma_* = \lg \sqrt{2\gamma E/\pi} - 1/2 \lg \ell$.

Критерий пригодности формулы (25.1) – близость экспериментального значения k к $1/2$. Расхождение оценить в процентах. По найденной величине a и известному E определить величину γ .

V МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ КОМПОЗИТОВ

В этой части представлены лабораторные работы по определению механических характеристик, имеющих отношение к механике разрушения композиционных материалов (композитов).

Лабораторная работа 26

Определение характеристик трещиностойкости стеклопластика при циклических нагрузках

Цель работы: изучение характеристик трещиностойкости стеклопластика при циклических нагрузках.

Общие сведения

Композит (композиционный материал) представляет собой неоднородный материал, состоящий из двух или более компонентов, которые разделяются на армирующие элементы (наполнитель), обеспечивающие требуемые механические свойства материала, и на матрицу (связующее), обеспечивающую совместную работу армирующих элементов.

Композиционный материал относится к конструкционным материалам. По своей природе композиционный материал может быть как металлическим, так и неметаллическим, в котором имеются усиливающие элементы в виде нитей, волокон или хлопьев более прочного материала. Свойства композита зависят в значительной степени от наполнителя, распределенного в связующем [3,4,5,6,7]. В зависимости от наполнителя можно выделить два основных вида композитов (рис. V.1).

Для волокнистых композитов обычно вводят более мелкую классификацию – в зависимости от ориентации волокон, а также от того, дискретны они или непрерывны. Можно выделить однонаправленные композиты с непрерывными волокнами, композиты с дискретными волокнами, композиты с непрерывными волокнами, ориентированными во многих направлениях и т. п.

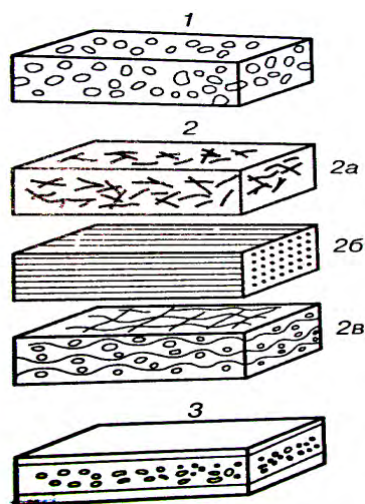


Рисунок 26.1 – Композиты: 1 – с дисперсными частицами; 2 – волокнистые: 2 а – армированный короткими волокнами, 2 б – армированный непрерывными волокнами, 2 в – армированный волокнами во многих направлениях; 3 – слоистый

Используют также слоистые композиты, которые представляют собой набор соединенных между собой слоев из однонаправленных композитов.

В таблице 26.1 приведены сочетания исходных материалов, из которых образуют композиты, и даны наименования для них.

Таблица 26.1 – Сочетания материалов в композитах

Дисперсная фаза	Матричная фаза	Композит
Частицы, порошок	Каучук	Каучук, армированный частицами (PRR)
Волокна	Каучук	Каучук, армированный волокном (FRR)
	Пластмасса	Пластмасса, армированная волокном (FRP)
	Металл	Металл, армированный волокном (FRM)
Частицы	Металл	Металл, армированный частицами (PR. W)
Чешуйки	Керамика	Керамика, армированная волокном (FRC)

Примерами композиционных материалов могут служить пластик, армированный борными, углеродными, стеклянными волокнами, жгутами или тканями на их основе; алюминий, армированный нитями из стали, бериллия. Механические свойства материалов для армирования и некоторых композитов представлены в таблицах 26.1 и 26.3.

Выбор и назначение композиционных материалов во многом определяются условиями нагружения и температурой эксплуатации детали, а также технологическими возможностями. Наиболее доступны и освоены полимерные композиционные материалы.

Пластмассовые композиты в авиационно-космической промышленности ранее применялись лишь для внешней обшивки самолетов, носков крыла и его задних кромок, для бортовых кухонь воздушного судна и прочих второстепенных изделий. Но в наши дни пластмассовые композиты используются для производства таких несущих конструкций, как крылья, фюзеляжи и поперечные балки. Почти 50 % материалов для самолета Boeing 787 производится из композитов [3].

Таблица 26.2 – Свойства армирующих материалов

Материал	Диаметр, мм·10 ⁻³	Удельный вес d , Н/мм ² ·10 ⁻²	Предел прочности σ_v , МПа·10 ⁻²	Модуль упругости, E , МПа·10 ⁻³
Сталь	50-100	7,9	3,5-4,2	180
Оксид алюминия	250	4.0	2.5	250
Карбид кремния	100-150	3.5	2.8	400
Органические волокна	—	1,5	1.4-1.7	77-90
Бор	50-200	2.4-3.1	3.5	400
Стекло	7	2.5	4.2	82
Графит (углерод)	7	1,95	3-3.5	400

Таблица 26.3 – Свойства композиционных материалов

Материал	Диаметр, мкм	Удельный вес d , Н/мм ² ·10 ⁻²	Предел прочности σ_v , МПа·10 ⁻²	Модуль упругости, E , МПа·10 ⁻³
Бормагний	2.20	1.2-1.3	220	55-59
Боралюминий	2.65	1.6		60
Боропластик	2,02	1.4	210	69
Стеклопластик	2 08	1,7	35	81
Органоволокнит	1.38	1,1	77	81
Углепластик	1.58	1,4	140-280	89

Несмотря на существенные преимущества пластмассовых композитов, есть некоторые препятствия для их использования. Во-первых, они часто дороже, чем аналогичные металлические материалы, также существует конкуренция со стороны новых облегченных сплавов металлов и композитов. Наконец отметим, что сертификация пластмассовых композитов (как и любых новых материалов) для использования в несущих конструкциях самолетов, представляет собой долгий процесс, занимающий месяцы и годы дорогостоящих испытаний.

Разрушение композиционных материалов при наличии трещин

Появление трещиноподобных дефектов в композиционном материале возможно на стадии его изготовления или в процессе эксплуатации. Дефекты влияют на прочность, механизмы разрушения и эксплуатационные качества элементов конструкций. Для распространения трещины необходимо, чтобы максимальное напряжение превысило предельное значение, соответствующее тому или иному механизму разрушения. Механизм разрушения представляет собой сочетание явлений в вершине трещины, приводящих к образованию новой поверхности тела. Различные модели разрушения могут быть основаны как в микро-, так и в макроподходах.

Моделирование процесса разрушения предполагает выбор реологической модели материала, модели трещины и критерия разрушения. В каждом отдельном случае, исходя из многообразия композиционных материалов, будет и своя модель разрушения конкретного материала. Большинство композитов создают на основе высокопрочных армирующих элементов и матрицы, допускающей достаточно высокие деформации. При разрушении армирующего элемента или повреждении границы раздела происходит перераспределение напряжений так, что повреждение локализуется в относительно малом объеме. Благодаря этому эффективная прочность композита в целом практически не снижается, что является одним из преимуществ композитов перед большинством традиционных материалов [3]).

Аналогичное явление свойственно композитам, матрица которых хрупкая, армирующие элементы, наоборот, обладают высокой пластичностью (например, хрупкой керамике, армированной короткими металлическими волокнами). В этом случае локализация повреждений получается благодаря высокой деформативности армирующих элементов.

Финальному разрушению композита, как правило, предшествует накопление повреждений на уровне структуры, т. е. на уровне волокна, включения и т. п. Методы линейной механики разрушения можно

поэтому применять к композитам лишь ограниченно. Значительное место занимают модели накопления повреждений на уровне структуры композита, называемые микроповреждениями. Схемы разрушения композитов, учитывающие связь процесса накопления микроповреждений и финального разрушения, приведены на рисунке 26.2. В начальном состоянии 1 в образце имеются начальные дефекты той же природы, что и микроповреждения.

После приложения нагрузки происходит либо хрупкое разрушение образца (состояние 2), либо идет процесс накопления микроповреждений (состояние 3).

В последнем случае возможны три варианта: во-первых, процесс накопления может завершиться вследствие того, что плотность микроповреждений достигает некоторого критического значения, при котором происходит разрушение образца путем потери целостности (состояние 4); во-вторых, в окрестности одного или нескольких разрушенных элементов структуры могут образоваться сочетания дефектов, которые станут зародышами макроскопических трещин (этому соответствует состояние 5, в котором характерный размер зародышевой трещины $2l_0$); далее следует постепенный рост трещины (состояние 6), пока ее длина l не станет критической в состоянии 7; в-третьих, возможно хрупкое разрушение 8 как завершение процесса накопления микроповреждений.

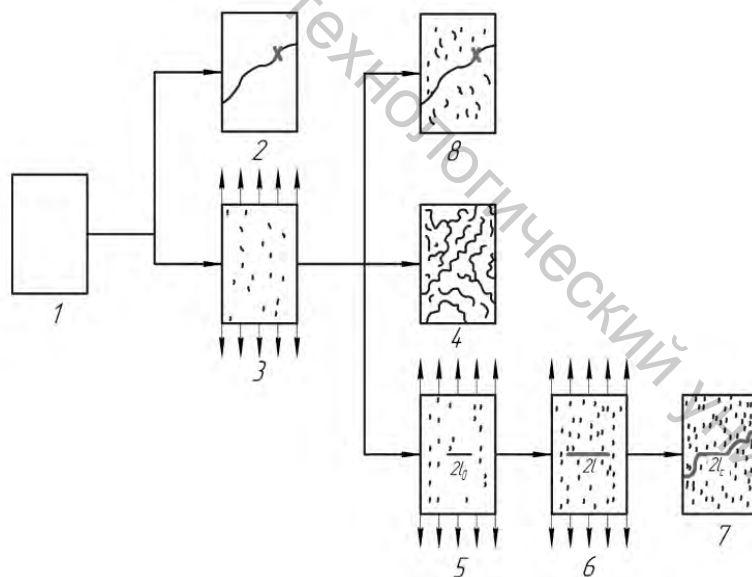


Рисунок 26.2 – Этапы разрушения композитов: 1 – начальное состояние; 2 – хрупкое разрушение; 3 – накопление микроповреждений; 4 – разрушение вследствие потери целостности; 5 – образование макроскопической трещины; 6 – рост макроскопической трещины; 7 – финальное разрушение в результате роста макроскопической трещины; 8 – хрупкое разрушение как результат накопления микроповреждений

Схемы, представленные на рисунке 26.2, можно отнести к любому конструкционному материалу.

В композитах виды разрушений разнообразны из-за взаимодействия двух и большего числа механизмов повреждений. Например, даже в простейшем случае однонаправленного композита с непрерывными волокнами различают разрывы отдельных волокон, нарушения связей на границе раздела *матрица-волокно*, разрушение по матрице, а также взаимодействие этих трех явлений.

Макроскопическое растрескивание композитов также весьма разнообразно по форме. Так, если плоскость начального надреза или трещины совпадает с направлением армирования, то трещина, как правило, развивается совсем не так, как в обычных макроскопически изотропных материалах. Достаточно указать на «щеткообразное» разрушение однонаправленных композитов при растяжении вдоль волокон (рис. 26.3 а) и продольное растрескивание образцов при испытаниях на трещиностойкость по схеме трехточечного изгиба (рис. 26.3 б).

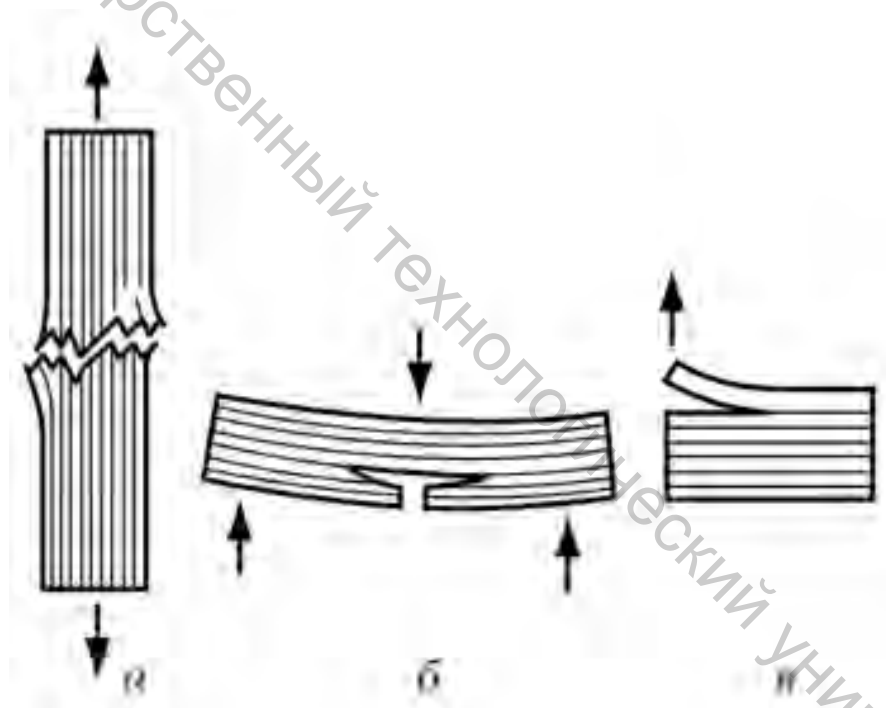


Рисунок 26.3 – Типичные разрушения слоистых материалов:

а – «щеткообразное» разрушение однонаправленных композитов при растяжении вдоль волокон; *б* – продольное растрескивание при испытании по схеме трехточечного изгиба; *в* – межслойное растрескивание при испытании по двухконсольной схеме

Напротив, если начальная трещина лежит в плоскости армирования, то она растёт, оставаясь примерно в этой плоскости. Поэтому для испытания композитов на трещиностойкость в плоскостях армирования пригодны стандартные методы, разработанные для

обычных конструкционных материалов. Примером служит испытание на межслойное растрескивание по двухконсольной схеме (рис. 26.3 в). Для экспериментальной оценки трещиностойкости в плоскостях армирования часто используют методы, которые были предложены для испытания прочности клеевых соединений [3].

26.1 Содержание работы

Стеклопластики – одни из наиболее распространенных композитных материалов, сочетающих высокую прочность, хорошие диэлектрические свойства и приемлемую цену. Они состоят из полимерной матрицы, армированной стекловолокнистым материалом. Использование различных сочетаний армирующих и связующих компонентов позволяет создавать материалы с широким диапазоном регулируемых свойств, что предопределяет большое разнообразие сфер применения стеклопластиков. Этот тип композиционных материалов широко используют как конструкционный и теплозащитный материал при производстве корпусов лодок, катеров, судов и ракетных двигателей, кузовов автомобилей, цистерн, рефрижераторов, радиопрозрачных обтекателей, лопастей вертолетов, выхлопных труб, деталей машин и приборов, коррозионностойкого оборудования и трубопроводов, небольших зданий, бассейнов для плавания и др., а также как электроизоляционный материал в электро- и радиотехнике.

Определение характеристик трещиностойкости при циклическом нагружении стеклопластика имеет большое практическое значение, так как этот тип материалов часто применяют в конструкциях, подверженных усталостному разрушению. Характеристики трещиностойкости могут быть использованы (наряду с другими характеристиками механических свойств) для суждения о сопротивлении материала развитию трещины и определения влияния на него различных технологических и эксплуатационных факторов; для сопоставления материалов при их выборе в проектировании конструкций из стеклопластика; для оценки сроков службы изделий на основе данных об их дефектности и напряженном состоянии; для анализа причин разрушения конструкций.

В настоящей лабораторной работе исследуется трещиностойкость листовых стеклопластиков, изготовленных вакуумным формованием из шести слоев стеклоткани Т-10 ГОСТ 19170-73, уложенных взаимно ортогонально. Для этих целей желательно иметь 30 образцов на связующем УП-2125 ТУ6-05-241-187-78 и 30 образцов на связующем ЭФ 32-301-16 ТИ 000-25200.009.

Испытания на циклическую трещиностойкость состоят в последовательном измерении длины l (глубины) растущей трещины усталости и соответствующего числа циклов нагружения N . Для исследования берут плоские образцы, исходная трещина в которых расположена перпендикулярно растягивающим напряжениям (трещина нормального отрыва по модели I механики разрушения). Испытания проводят при постоянных значениях K_{\max} или ΔK (изменяющихся ступенчато). Соблюдение постоянных значений K_{\max} или ΔK особо рекомендуется в случаях изучения влияния различных факторов на скорость роста трещин. Такого постоянства можно достигнуть при жестком нагружении (с заданными перемещениями).

Зависимость скорости роста трещины от наибольшего коэффициента интенсивности напряжений цикла K_{\max} или его размаха ΔK при постоянном коэффициенте асимметрии цикла R и всех других условиях испытаний изображают диаграммой усталостного разрушения, которая становится базовой для данного материала, по ней устанавливают следующие основные характеристики:

1) C, n – параметры степенной зависимости скорости роста трещины $v = CK_{\max}^n$, аппроксимирующей средний и линейный участок диаграммы усталостного разрушения;

2) пороговый КИН K_{th} – максимальное значение наибольшего коэффициента интенсивности напряжений цикла, при котором трещина не развивается на протяжении заданного числа циклов;

3) критический КИН X_{fc} – наибольший коэффициент интенсивности напряжений цикла, при котором наступает долом образца.

Образец для испытаний представляет собой прямоугольную плоскую пластину с центральным надрезом. Пластина вырезается из листового стеклопластика. Форма и соотношение размеров образца представлены на рисунке 26.4.

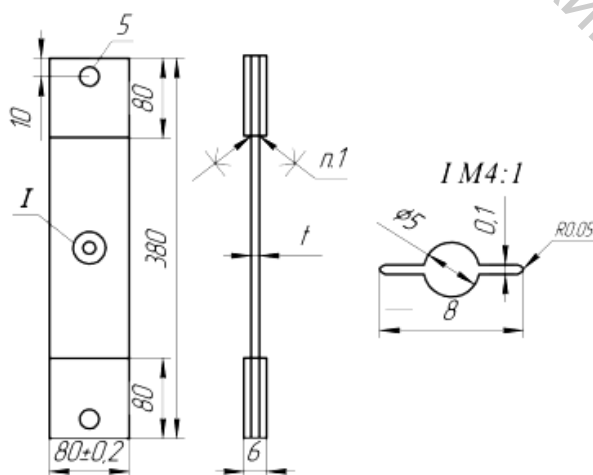


Рисунок 26.4 – Образец для испытаний на трещиностойкость стеклопластика

Надрез можно выполнять от центрального отверстия с помощью специальных фрез и пилочек. Размеры образцов выбирают в соответствии с задачей исследования, механическими свойствами, возможностями испытательного оборудования и по экономическим соображениям. Ширина образца должна обеспечивать не менее 25 замеров длины трещины. Толщина образцов определяется из конструктивных соображений, минимальная толщина определена недопущением выпучивания образца.

Испытания проводят на испытательных машинах, предназначенных для испытаний на усталость, которые обеспечивают заданные параметры нагружения: уровень нагрузки, частоту, асимметрию и форму цикла. Крепление образца в испытательной машине должно обеспечивать центровку образца, исключение разрушения образца в зоне захватов и реализацию заданной схемы нагружения.

Измерение длины трещины может производиться микроскопом МП6-2 (для трещин с длиной, l не превышающей 5 мм), штангенциркулем (для трещин с длиной l более 5 мм). Для контрастного выявления трещины необходимо обеспечить подсветку с тыльной стороны образца. Испытания необходимо проводить при коэффициенте асимметрии $R = 0,05-0,1$, частоте нагружения $f = 5-20$ Гц, синусоидальной форме цикла и при стандартных атмосферных условиях.

Для построения диаграммы разрушения образцов испытания проводятся в несколько этапов.

1. От иницирующего надреза трещина вырастает при $\sigma_{\max} = \text{const}$ до длины, когда K_{\max} и ν отвечают линейному участку диаграммы; при этом снимают 5–10 измерений.

2. Для определения порогового коэффициента интенсивности напряжений K_{th} нагрузку цикла снижают ступенчато при $R = 0$ до уровня, при котором трещина будет подрастать не более 0,5 мм за 10 циклов. Величина подрастания трещины выбирается исходя из расстояния между двумя соседними нитями в стеклоткани, толщина которых для стеклоткани Т10-80, например, равна 0,25 мм.

3. Для определения критического коэффициента интенсивности напряжения K_{fc} испытания продолжают при постоянной нагрузке с увеличивающимся коэффициентом K_{\max} . Фиксируется длина трещины $2l$, соответствующая началу долома образца. Длину трещины, при которой произошел долом, определяют в направлении, перпендикулярном направлению нагрузки, ибо при статическом разрушении, соответствующем долому образца, наблюдается косою излом с обширной зоной растрескивания, берега трещины имеют при этом ярко выраженную «рваную» форму. Испытания прекращают, если

разница между правой и левой полудлинами трещин превышает 15 % их среднего значения.

26.2 Результаты испытаний

Полученные в результате эксперимента длина 2ℓ и число циклов N позволяют построить кривую $2\ell = f(N)$, которую в дальнейшем используют для вычисления коэффициента K_{\max} и скорости v , т. е. определяют параметры уравнения, аппроксимирующего экспериментальные данные.

Обработка полученных данных производится в следующем порядке:

1) строят графики роста трещины в виде зависимости $2\ell = f(N)$ (рис. 26.5);

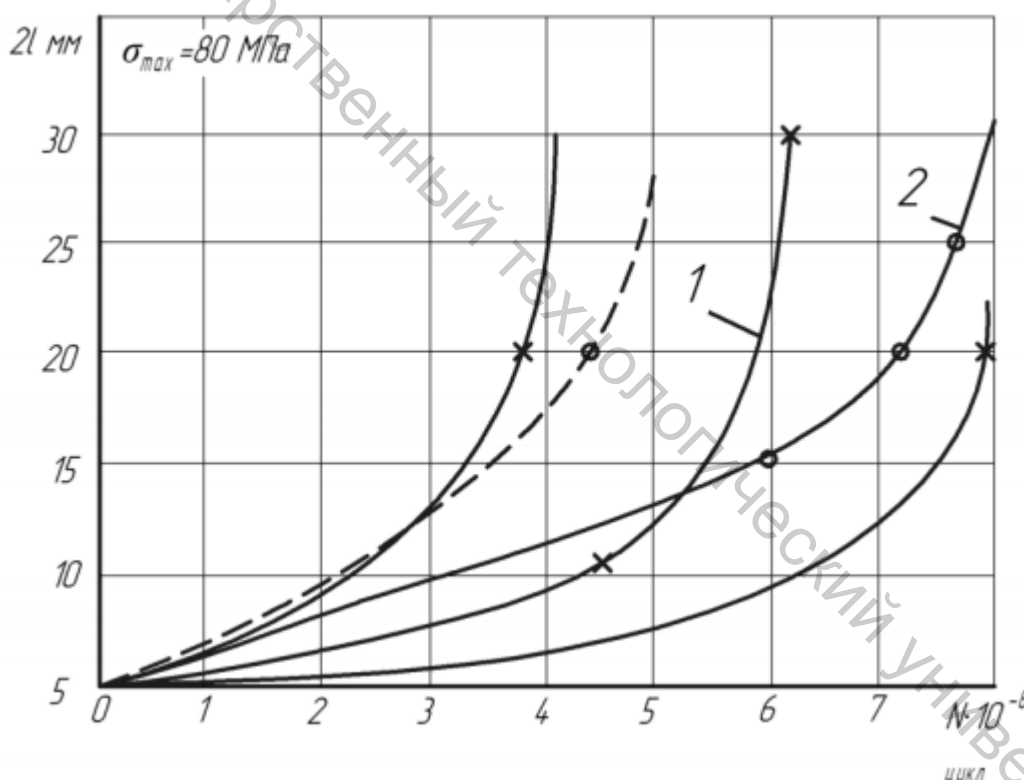


Рисунок 26.5 – Среднестатистические кривые роста усталостных трещин в стеклопластиках на связующих: 1 – УП2125; 2 – ЭФ32-301-16

2) вычисляют скорость роста трещины v , как средний прирост ее длины за один цикл при заданных условиях испытаний;

3) устанавливают зависимость $v = f(K_{\max})$ скорости роста трещины от коэффициента интенсивности напряжений, который характеризует напряженно-деформированное состояние около вершины трещины; определяют параметры этой зависимости. Графическое

изображение такой зависимости будет базовой кривой-диаграммой усталостного разрушения материала (рис. 26.6).

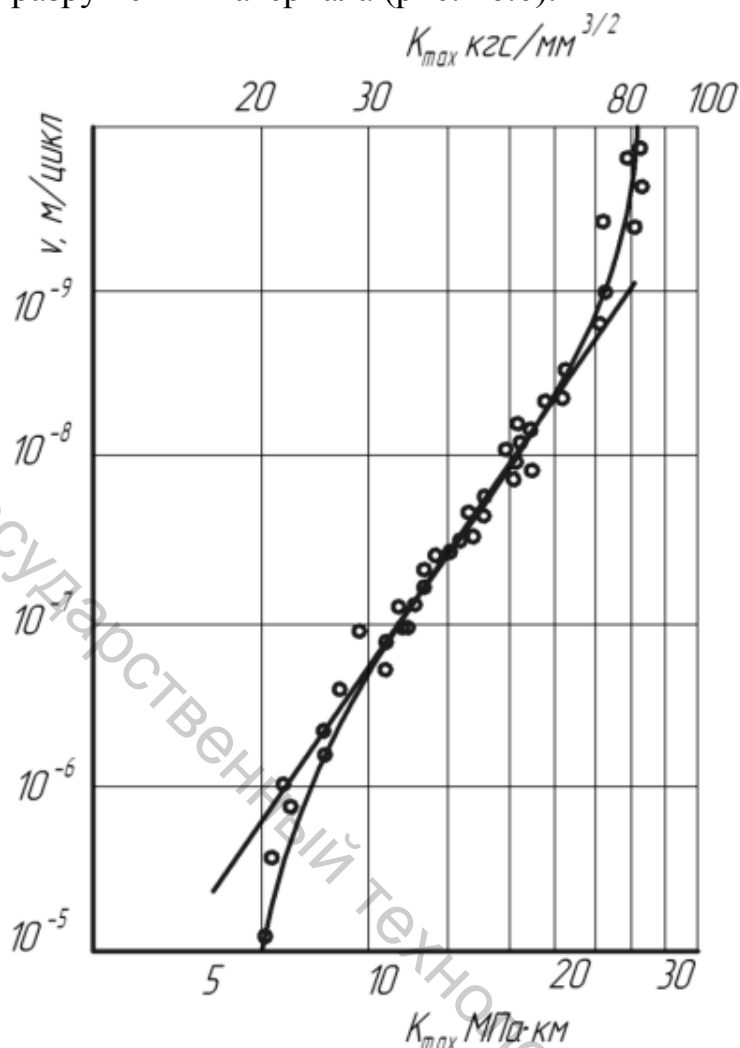


Рисунок 26.6 – Диаграмма усталостного разрушения стеклопластика (эксперимент), сплошная линия – аппроксимирующая кривая

26.3 Выводы

Существует несколько видов разрушения стеклопластиков (одного из композиционных материалов), обусловленных разрывом волокон; растрескиванием матрицы; разрушением поверхностей раздела; комбинацией этих факторов.

При разрушении стеклопластика в локальной зоне у вершины трещины его температура растет (рис. 26.7). Замер температуры можно произвести контактным способом в зоне растрескивания у вершины трещины по мере ее подрастания.

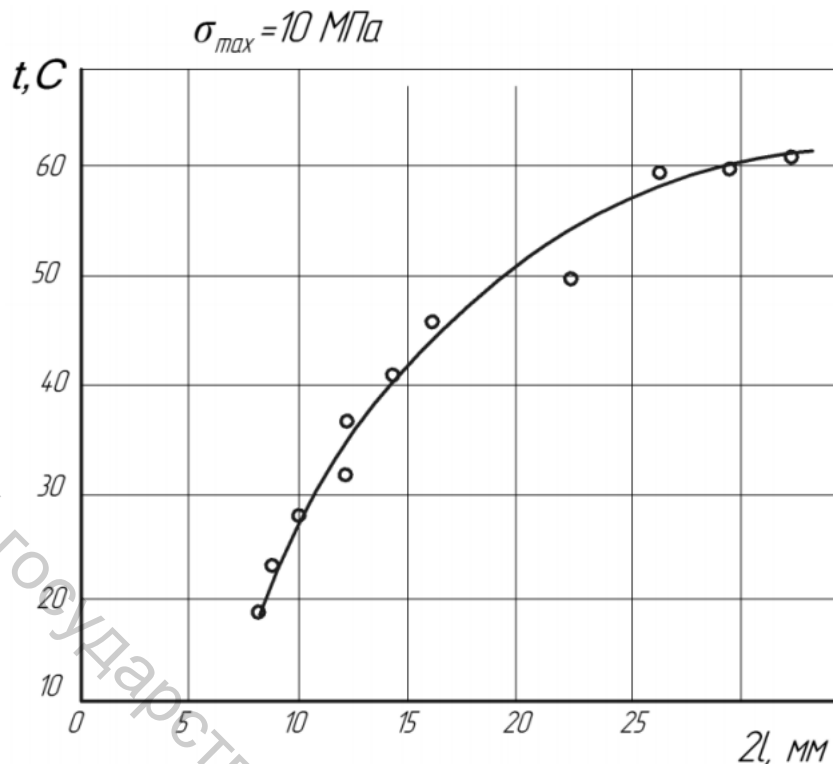


Рисунок 26.7 – Изменение температуры в вершине усталостной трещине при ее росте

Рост трещины в стеклопластике отличается от роста в металле, он не является монотонным. На кривой роста трещины, построенной по результатам испытания одного образца, трещина в котором растет не от надреза, а от отверстия, можно выделить одну особенность – участок замедления скорости роста трещины (поскольку трещина выходит из зоны концентрации). Однако при статистической обработке набора кривых эти особенности сглаживаются полем рассеяния и на средней статистической кривой $2l = f(N)$ их не видно.

Одной из отличительных черт стеклопластика по сравнению с изотропными материалами является слабая чувствительность к концентрации напряжений. Это объясняется тем, что уже первые циклы нагрузки реализуют эффекты концентрации напряжений, обусловленные отверстием или надрезом. В результате этого происходит разрушение близлежащего к концентратору волокна; помимо прочего, часть волокна выдергивается из матрицы, что приводит к «затуплению» концентратора. Дальнейшему продвижению трещины способствует образование зоны растрескивания у вершины трещины, аналогичной зоне пластических деформаций у пластичных металлов или зоны предразрушения у полимеров.

Для стеклопластиков эффективный коэффициент концентрации напряжений $k_{\sigma} = 1.34$ на базе 10^7 циклов. Чувствительность материала к концентрации напряжений можно также оценить коэффициентом чувствительности

$$q = \frac{k_{\sigma}-1}{\alpha_{\sigma}-1} = 0.126, \quad (26.1)$$

где α_{σ} теоретический коэффициент концентрации напряжений для круглого отверстия в ортотропном материале, определяемый по методике Лехницкого[8]. В формуле (26.1) для стеклопластика $\alpha_{\sigma} = 3,7$. Для сравнения с другими материалами: для высокопрочных сталей $q = 1$, для углеродистых сталей $q = 0,6-0,8$, для чугуна $q = 0$. Это позволяет сделать вывод, что острота надреза (концентратора) слабо влияет на процесс разрушения.

Лабораторная работа 27

Методика испытания фибробетона (ФБ) на растяжение при изгибе

Цель работы: ознакомление с новым подходом к классификации ФБ по остаточной прочности на растяжение при изгибе после образования трещин и учету физико-механических свойств фибробетонов при расчете элементов конструкций.

27.1 Общие положения

Прочность фибробетона оценивается на основании значений остаточной прочности на растяжение при изгибе, которые выводятся из кривой «нагрузка – перемещение (раскрытие трещины)» или кривой «нагрузка – прогиб», получаемых в результате воздействия на призму (образец-балку) с разрезом сосредоточенной нагрузкой [10].

Определение остаточной прочности ФБ на растяжение при изгибе проводится по методике, приведенной в EN 14651 (метод испытания сталефибробетона. Измерение прочности на растяжение при изгибе (предел пропорциональности (LOP), остаточная прочность). Стандарт, Европейское сообщество).

Класс ФБ по остаточной прочности на растяжение при изгибе должен назначаться в результате испытаний образцов-балок. Класс ФБ по остаточной прочности на растяжение при изгибе – показатель качества ФБ, обозначаемый числом и строчной латинской буквой. Число в обозначении класса характеризует гарантированную прочность ФБ на растяжение при изгибе $R_{F0-5,n}$ с обеспеченностью 0,95, соответствующую продольной деформации надреза образца-балки $SMOD = 0,5$ мм при испытаниях на изгиб, латинская буква характеризует отношение гарантированных прочностей ФБ на

растяжение при изгибе $R_{F2.5,n}$ и $R_{F0.5,n}$ при $CMOD = 2,5$ мм и $CMOD = 0,5$ мм соответственно (рис. 27.1).

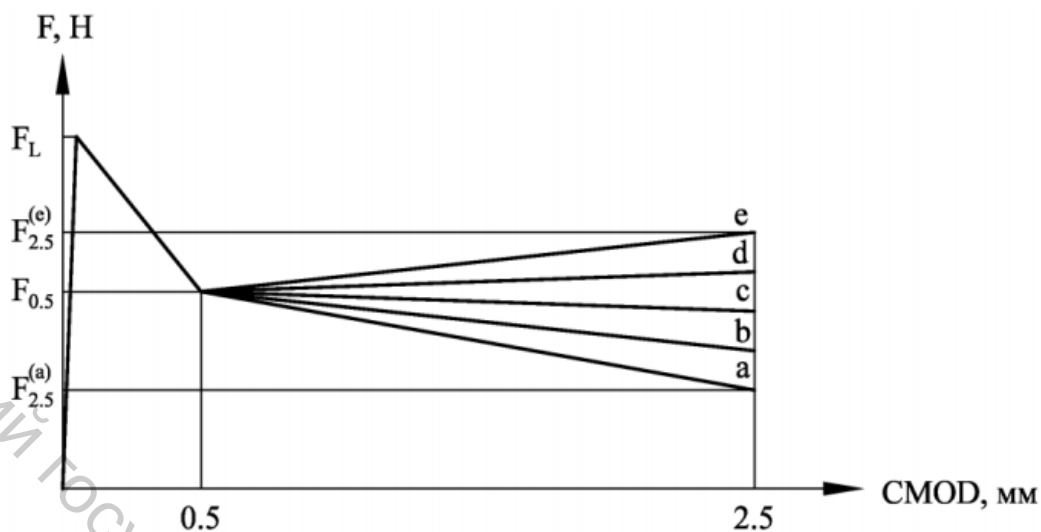


Рисунок 27.1 – Приведенный график «F-CMOD» для назначения класса ФБ по остаточной прочности на растяжение при изгибе:

- а – при $0,5 \leq R_{F2.5,n} / R_{F0.5,n} < 0,7$; б – при $0,7 \leq R_{F2.5,n} / R_{F0.5,n} < 0,9$;
- с – при $0,9 \leq R_{F2.5,n} / R_{F0.5,n} < 1,1$; д – при $1,1 \leq R_{F2.5,n} / R_{F0.5,n} < 1,3$;
- е – при $1,3 \leq R_{F2.5,n} / R_{F0.5,n}$

27.2 Проведение испытаний

В ходе испытаний для каждого образца должны быть построены графики «F-CMOD» (рис. 27.2). Количество образцов n для испытаний не менее 6.

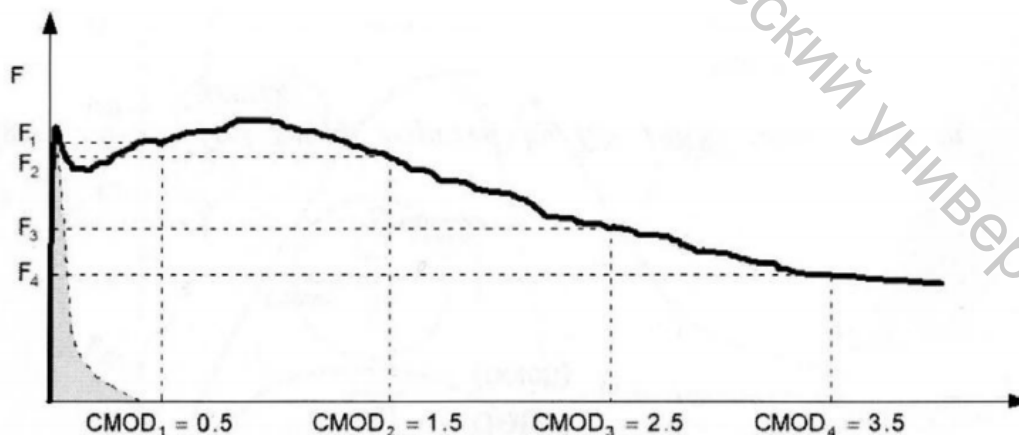


Рисунок 27.2 – Характерный вид графиков «F-CMOD» для неармированного бетона (заштриховано) и ФБ

Для каждого образца определяются значения прочности R_{fbt} , $R_{F0.5}$ и $R_{F2.5}$, Н/мм² по формулам

$$R_{fbt,i} = 1.5 \cdot F_{L,i} \cdot \ell_i / b_i \cdot h_{sp,i}^2; \quad (27.1)$$

$$R_{F0.5,i} = 1.5 \cdot F_{0.5,i} \cdot \ell_i / b_i \cdot h_{sp,i}^2; \quad (27.2)$$

$$R_{F2.5,i} = 1.5 \cdot F_{2.5,i} \cdot \ell_i / b_i \cdot h_{sp,i}^2, \quad (27.3)$$

где i – индекс, обозначающий номер образца в серии $i = 1, 2, 3, \dots, n$; $F_{L,i}$ – максимальное значение нагрузки, Н, приложенной к i -му образцу при $0 < CMOD \leq 0,05$ мм; $F_{0.5,i}$ – значение нагрузки, Н, приложенной к i -му образцу, соответствующей $CMOD = 0,5$ мм; $F_{2.5,i}$ – значение нагрузки, Н, приложенной к i -му образцу, соответствующей $CMOD = 2,5$ мм; ℓ_i – рабочий пролет i -го образца, мм; b_i – ширина i -го образца, мм; $h_{sp,i}$ – расстояние между вершиной надреза и верхом i -го образца, мм. Значения прочности R_{fbt} , $R_{F0.5}$ и $R_{F2.5}$, Н/мм² при стандартных размерах образца и надреза (по EN 14651) $\ell = 500$ мм, $b = 150$ мм, $h_{sp} = 125$ мм, допускается оценивать ориентировочно по формулам

$$R_{fbt,i} = 3,2 \cdot 10^{-4} \cdot F_{L,i}; \quad (27.4)$$

$$R_{F0.5,i} = 3,2 \cdot 10^{-4} \cdot F_{0.5,i}; \quad (27.5)$$

$$R_{F2.5,i} = 3,2 \cdot 10^{-4} \cdot F_{2.5,i}. \quad (27.6)$$

27.3 Статистическая обработка результатов испытаний

Статистическая обработка результатов испытаний производится с определением подклассов ФБ $V_{F0.5}$ и $V_{F2.5}$ по остаточной прочности на растяжение при изгибе

$$V_{F0.5} = R_{F0.5,m} \cdot (1 - 1,64 \cdot V_{F0.5,m}); \quad (27.7)$$

$$V_{F2.5} = R_{F2.5,m} \cdot (1 - 1,64 \cdot V_{F2.5,m}), \quad (27.8)$$

где $R_{F0.5,m}$ и $R_{F2.5,m}$ – средние значения остаточной прочности фибробетона на растяжение при изгибе, Н/мм²; $V_{F0.5,m}$ и $V_{F2.5,m}$ – коэффициенты вариации. Коэффициенты вариации $V_{F0.5,m}$ и $V_{F2.5,m}$

$$V_{F0.5,m} = S_{F0.5,m} / R_{F0.5,m}, \quad (27.9)$$

$$V_{F2.5,m} = S_{F2.5,m} / R_{F2.5,m}. \quad (27.10)$$

Значения средних квадратичных отклонений $S_{F0.5,m}$ и $S_{F2.5,m}$

$$S_{F0.5,m} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(R_{F0.5j} - R_{F0.5m})^2}{(n-1)}}; \quad (27.11)$$

$$S_{F2.5,m} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(R_{F2.5j} - R_{F2.5m})^2}{(n-1)}}. \quad (27.12)$$

При определении средних предела прочности на растяжение при изгибе в момент образования трещины и остаточного сопротивления на растяжение при изгибе в серии образцов предварительно отбраковываются аномальные (сильно отклоняющиеся) результаты испытаний.

27.4 Вывод

Расчетные сопротивления по остаточной прочности на растяжение при изгибе ($R_{F0.5}$ и $R_{F2.5}$), полученные в результате испытаний лабораторных образцов, используются для построения диаграммы состояния ФБ « $\sigma - \epsilon$ » (рис. 27.3).

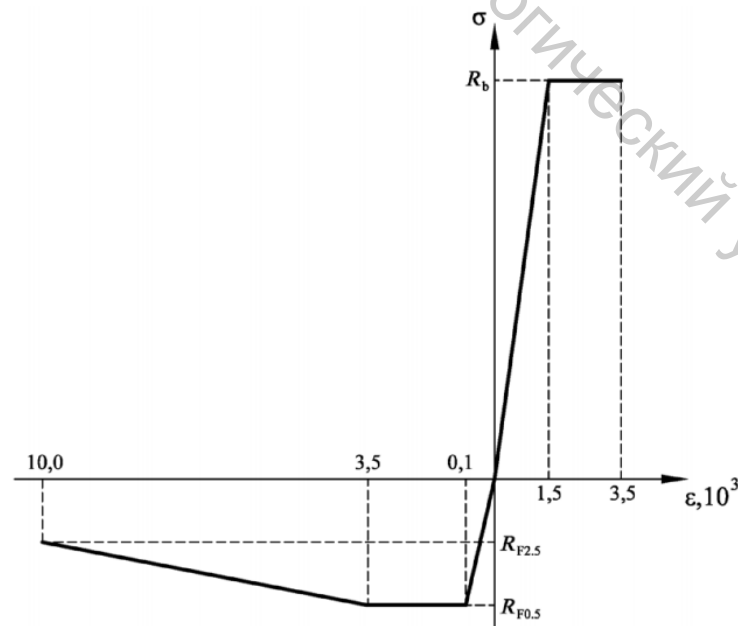


Рисунок 27.3 – Диаграмма состояния ФБ (« $\sigma - \epsilon$ »), $R_{F0.5}$ и $R_{F2.5}$ – расчетные сопротивления по остаточной прочности на растяжение при изгибе

Расчет элементов ФБ (ФЖБ) производится по предельным состояниям первой и второй групп с использованием нелинейной деформационной модели, описываемой диаграммой состояния ФБ « $\sigma - \varepsilon$ » (рис. 27.3).

Лабораторная работа 28

Определение остаточной прочности фибробетона на растяжение при изгибе

Цель работы: определение остаточной прочности фибробетона на растяжение при изгибе по методике, приведенной в лабораторной работе 27.

28.1 Принцип

Прочность фибробетона оценивается на основании значений остаточной прочности на растяжение при изгибе, которые выводятся из кривой «нагрузка – перемещение (раскрытие трещины)» или кривой «нагрузка – прогиб», получаемых в результате воздействия на призму (образец-балку) с разрезом сосредоточенной нагрузкой.

28.2 Приборы и приспособления

1. Для проведения испытаний используются следующие приборы и приспособления.

Приспособление для передачи нагрузки от испытательной машины испытываемому образцу, состоящее из двух опорных и одного нагрузочного ролика (рис. 28.1). Все ролики круглого сечения с диаметром $30 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$ выполняются из стали. Их длина должна превышать ширину испытываемого образца не менее чем на 10 мм. Поверхность роликов должна быть чистой и гладкой. Два ролика, включая верхний, должны свободно вращаться вокруг своей оси и поворачиваться в проекции, перпендикулярной продольной оси испытываемого образца. Расстояние между центрами опорных роликов (т. е. пролет) должно составлять 500 мм. Все ролики должны быть установлены в правильное положение с точностью 2 мм.

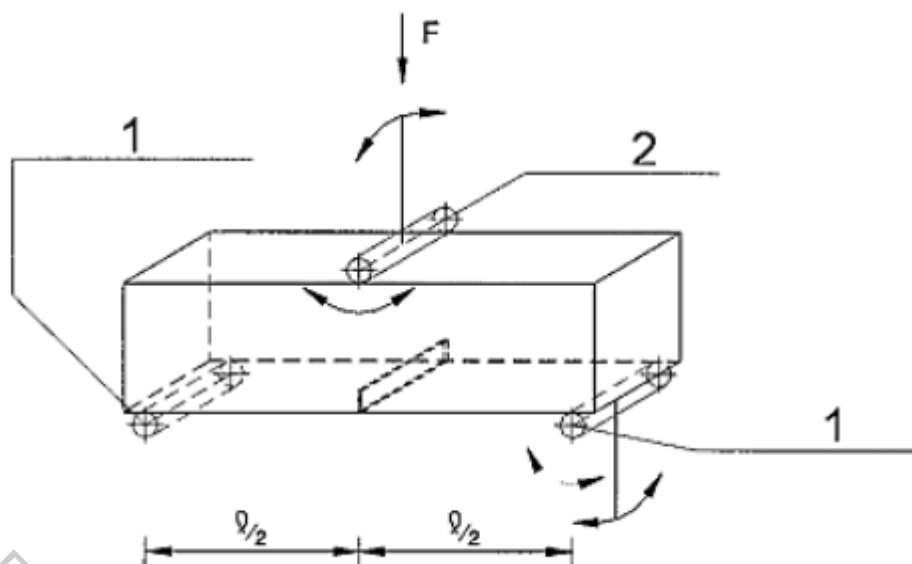


Рисунок 28.1 – Распределение нагрузки испытательного образца:
1 – опорный ролик; 2 – нагрузочный ролик

2. Прибор для измерения нагрузки с точностью до 0,1 кН.
3. Датчик(и) линейного смещения с точностью до 0,01 мм.
4. Прибор (рама или фиксатор) для установки датчика (датчиков) перемещений, обеспечивает точное определение «чистых» прогибов в средней точке пролета, исключая погрешности из-за проседания или изгиба испытуемого образца и его опор.
5. Система, подключенная к электронным выходам для регистрации данных о нагрузках, СМОД или прогибах, с частотой регистрации не менее 5 Гц.

28.3 Форма и размер испытуемых образцов

Испытуемые образцы должны быть выполнены в форме призмы (балки) со стандартными размерами (шириной и высотой) 150 мм и длиной L в пределах $550 \text{ мм} \leq L \leq 700 \text{ мм}$.

Примечание. Указанная форма и размер испытательных образцов подходят для бетона с максимальным размером зерен заполнителя не более 32 мм и (или) металлическими волокнами длиной не более 60 мм. Ширина прорези должна быть не более 5 мм, ее глубина $25 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$, т. е. расстояние между вершиной надреза и верхней гранью образца h_{sp} должно быть $125 \text{ мм} \pm 1 \text{ мм}$.

28.4 Подготовка и расположение испытательных образцов

Ширину образца и расстояние между вершиной надреза и верхней гранью образца h_{sp} следует определять по среднему, исходя из двух измерений, выполняемых с точностью до 0,1 мм с использованием штангенциркуля. При измерении величины перемещений в зоне надреза датчик перемещений необходимо установить по центру образца и надреза таким образом, чтобы расстояние между нижней частью образца и линией измерения составляло менее 5 мм (рис. 28.2).

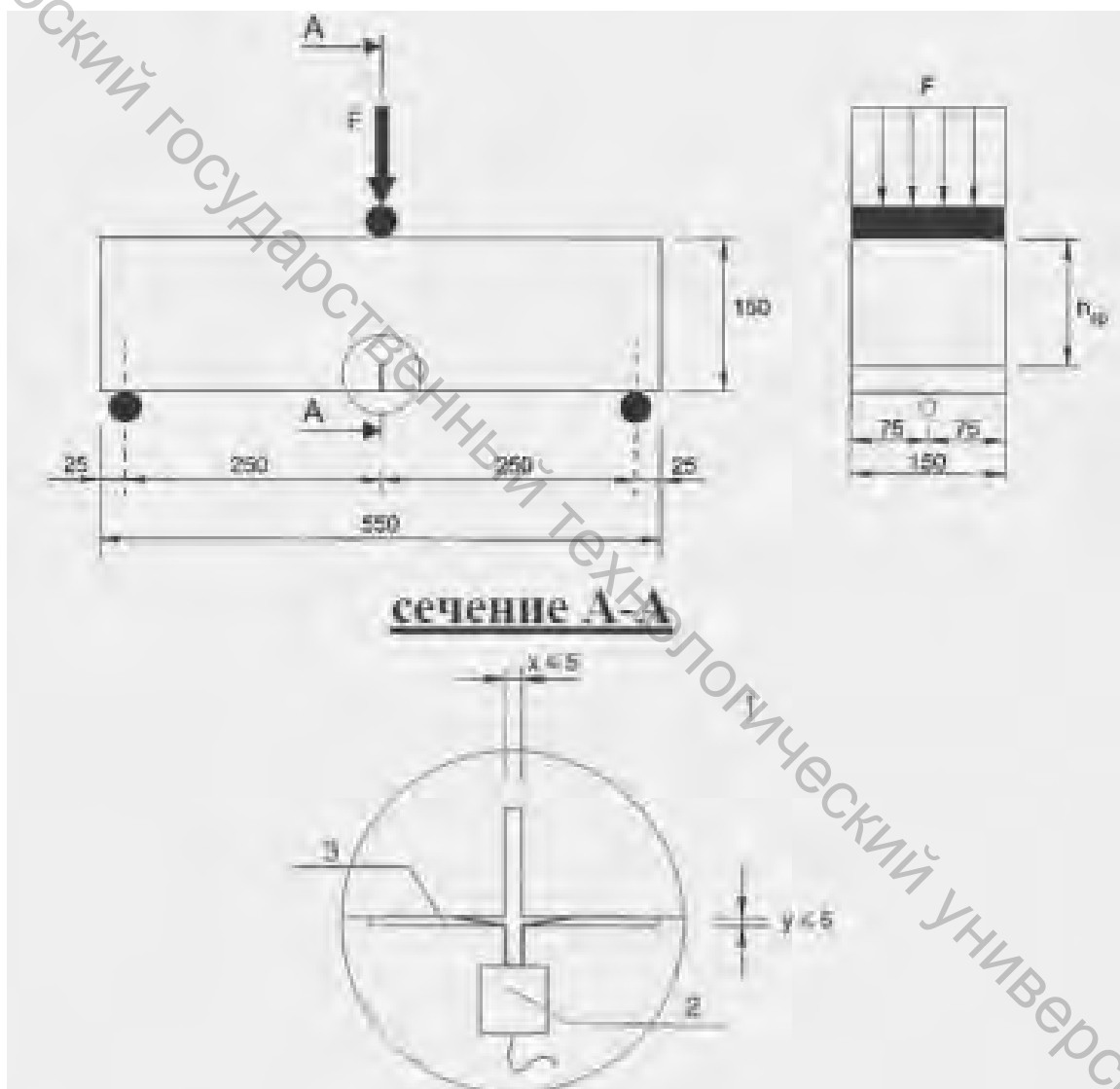


Рисунок 28.2 – Стандартное расположение образца для измерения CMOD: 1 – деталь (надрез); 2 – датчик (зажимной); 3 – ребро призмы

При измерении величины прогиба образца вместо величины перемещения внешних граней надреза (СМОД) датчик перемещений устанавливается на неподвижную раму, которая прикреплена к испытываемому образцу на средней высоте над опорами (рис. 28.3).

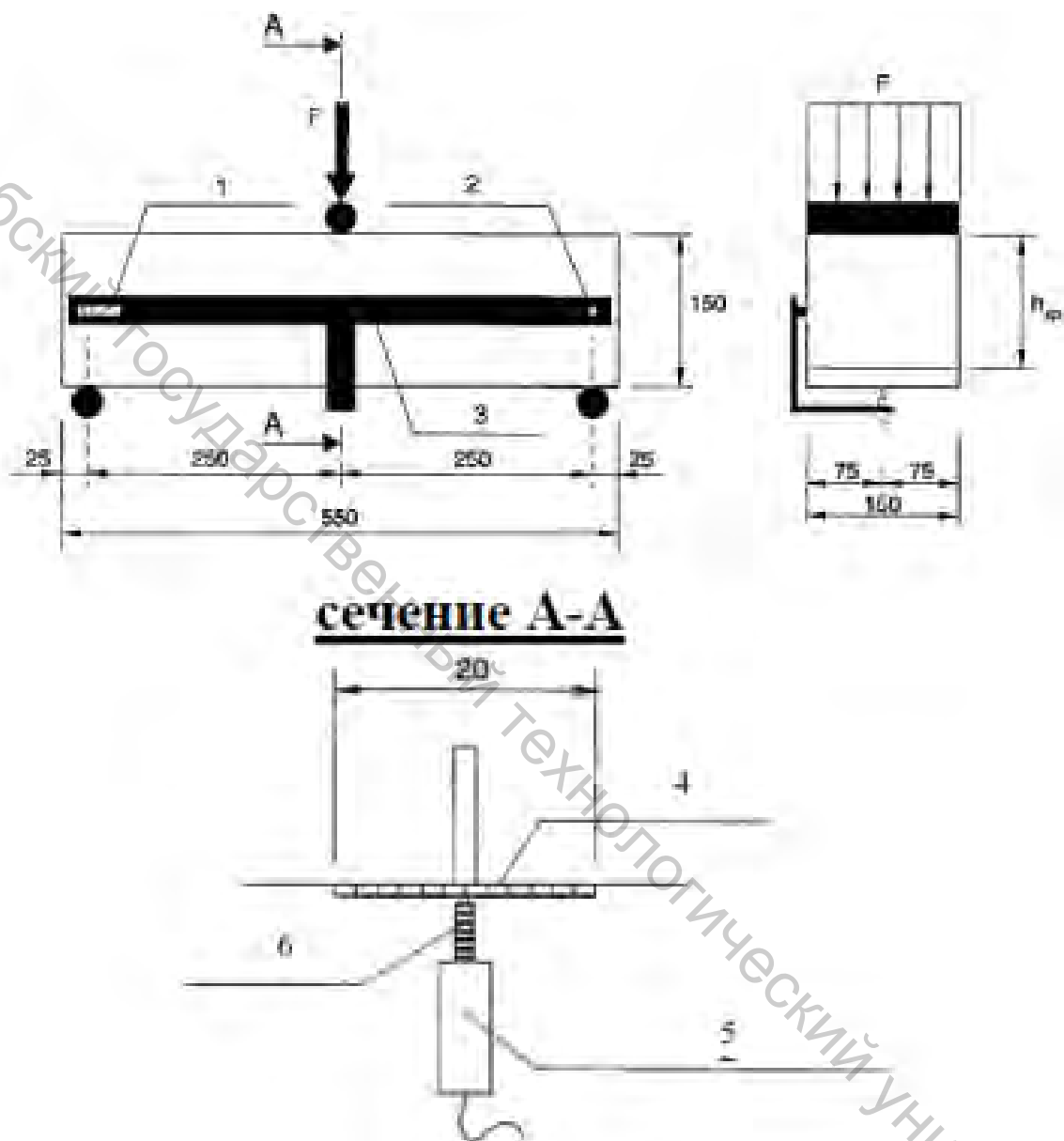


Рисунок 28.3 – Стандартное оснащение для измерения прогиба:
 1 – скользящая деталь; 2 – вращающаяся деталь; 3 – неподвижная рама;
 4 – алюминиевая пластина толщиной 1 мм; 5 – датчик
 (дифференциальный преобразователь линейной переменной);
 6 – шпindel пружины

28.5 Испытание на изгиб

Если испытательная машина работает в режиме контролируемого увеличения СМОР, она должна работать так, чтобы обеспечить постоянное увеличение СМОР на 0,05 мм/мин. При СМОР = 0,1 мм машина должна работать так, чтобы обеспечить постоянное увеличение СМОР на 0,2 мм/мин. В течение первых двух минут испытания значения нагрузки и соответствующего СМОР регистрируются при частоте не менее 5 Гц, после этого частоту можно уменьшить до 1 Гц, но не менее. При значении СМОР не менее 4 мм испытание необходимо прекратить. Испытания необходимо прекратить при достижении значения СМОР = 4 мм, либо при разрушении образца с разделением на 2 части. В случае работы испытательной машины в режиме контроля роста прогиба применяется вышеописанная процедура – при условии, что параметры, связанные с СМОР, преобразуются в параметры, связанные с прогибом.

28.6 Обработка результатов

Связь между СМОР и прогибом

Отношение между СМОР и прогибом может выглядеть следующим образом:

$$\delta = 0,85 \text{ СМОР} + 0,04, \quad (28.1)$$

где δ – прогиб, мм; СМОР – значение СМОР, мм, измеряемое в случае, если расстояние от оси датчика перемещений до нижней грани испытуемого образца $y = 0$.

Для преобразования графиков «нагрузка – СМОР», изображенных на рисунках 28.4 и 28.5, в график «нагрузка – прогиб» необходимо провести преобразование оси СМОР с использованием значений СМОР и δ (28.1).

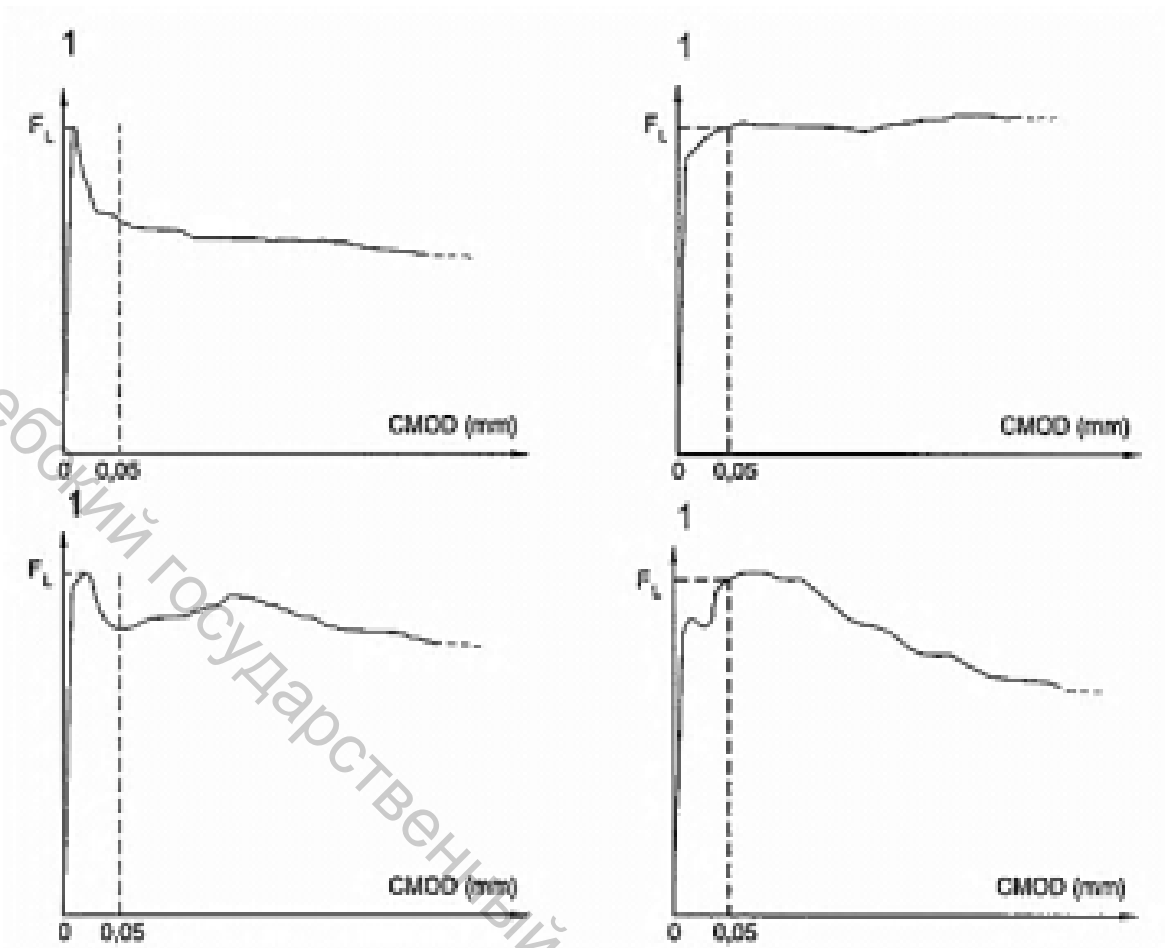


Рисунок 28.4 – Графики «нагрузка – CMOD» и F_L

28.7 Предел пропорциональности (LOP)

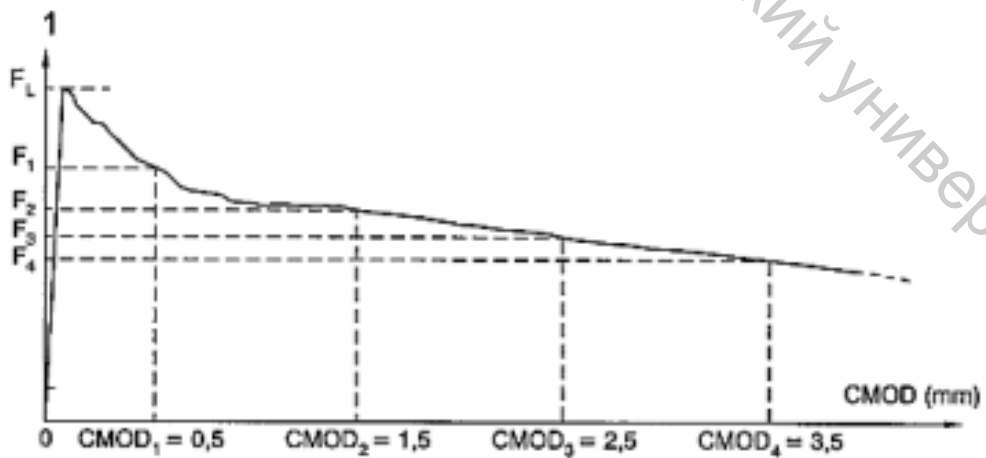


Рисунок 28.5 – Графики «нагрузка – CMOD» и F_L

LOP – величина, характеризующая сопротивление материала в упругой стадии работы без трещин, рассчитываемая с точностью 0,1 Н/мм² по приведенной ниже формуле, исходя из значения максимальной величины нагрузки, зафиксированной при испытании образца – балки с надрезом в интервале CMOD от 0 до 0,05 мм:

$$R_{fct,L} = \frac{3F_L \ell}{2bh_{sp}^2}, \quad (28.2)$$

где $R_{fct,L}$ – предельная прочность на растяжение при изгибе в момент образования трещины (LOP), Н/мм²; F_L – нагрузка, соответствующая LOP, Н; ℓ – длина пролета, мм; b – ширина образца, мм; h_{sp} – расстояние между вершиной надреза и верхней (сжатой) гранью образца, мм. Значение нагрузки F_L определяется путем проведения линии на расстоянии 0,05 мм, параллельной оси нагрузки графика «нагрузка – CMOD» или «нагрузка – прогиб». За величину F_L принимается максимальное значение нагрузки в интервале 0,05 мм (рис. 28.4).

28.8 Остаточное сопротивление на растяжение при изгибе

Остаточное сопротивление на растяжение при изгибе $R_{fbt,j}$ определяется с точностью до 0,1 Н/мм² по формуле

$$R_{fbt,j} = \frac{3F_j \ell}{2bh_{sp}^2}, \quad (28.3)$$

где $R_{fbt,j}$ – остаточное сопротивление на растяжение при изгибе, соответствующее CMOD = CMOD_j или $\delta = \delta_j$ ($j = 1, 2, 3, 4$), Н/мм²; F_j – нагрузка, соответствующая CMOD = CMOD_j или $\delta = \delta_j$ ($j = 1, 2, 3, 4$), Н (рис. 28.5); ℓ – длина пролета, мм; b – ширина образца, мм; h_{sp} – расстояние между вершиной надреза и верхней гранью образца, мм.

28.9 Пример определения предела пропорциональности и остаточной прочности на растяжение при изгибе (из EN 14651:2005 (E) приложения А)

Изгибающий момент в средней точке испытательного образца (рис. 28.6), соответствующий сосредоточенной нагрузке F , $M = \frac{F}{2} \cdot \frac{\ell}{2}$, где ℓ – длина пролета.

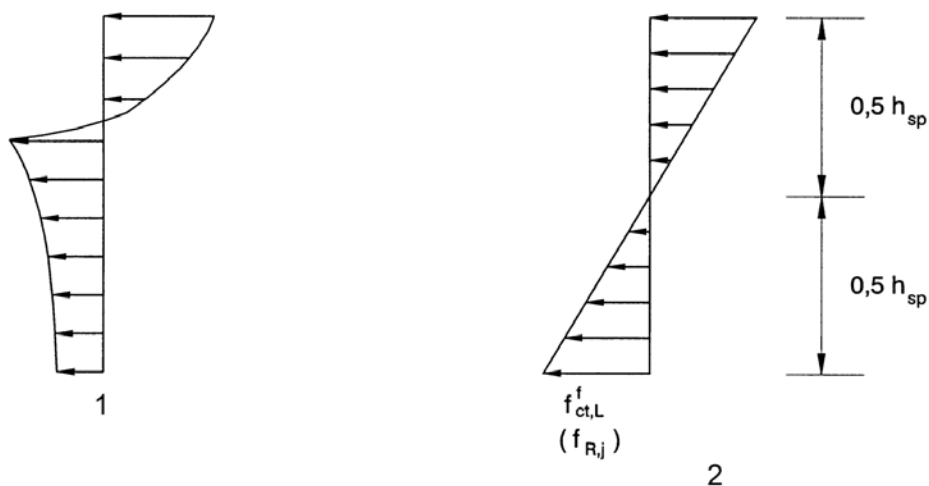


Рисунок 28.6 – Распределения нагрузки: 1 – реальное распределение нагрузки; 2 – предполагаемое распределение нагрузки

Если предположить, что линейное распределение нагрузки, изображенное на рисунке 28.6 правомерно, то LOP $R_{fct,L}$ можно определить выражением

$$R_{fct,L} = \frac{6M_L}{bh_{xp}^2} = \frac{3F_L \ell}{2bh_{xp}^2}, \quad (28.4)$$

а остаточная прочность на растяжение при изгибе $R_{fbt,j}$ ($j = 1, 2, 3, 4$)

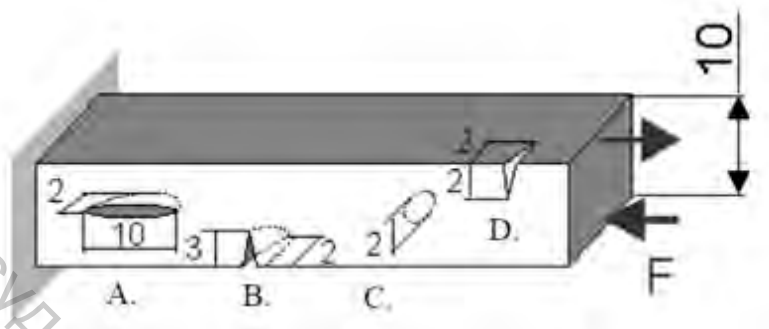
$$R_{fbt,j} = \frac{6M_j}{bh_{xp}^2} = \frac{3F_j \ell}{2bh_{xp}^2}, \quad (28.5)$$

где F_L – нагрузка, соответствующая LOP; F_j – нагрузка, соответствующая $CMOD = CMOD_j$ или $\delta = \delta_j$ ($j = 1, 2, 3, 4$); M_L – изгибающий момент, соответствующий нагрузке при LOP; M_j – значение изгибающего момента, соответствующего нагрузке F_j ($j = 1, 2, 3, 4$); b – ширина испытательного образца; h_{sp} – расстояние между краем надреза и верхней частью образца в серединной точке.

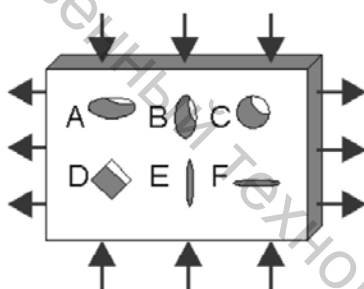
VI ТЕСТЫ ПО КУРСУ «МЕХАНИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ»

Дефекты

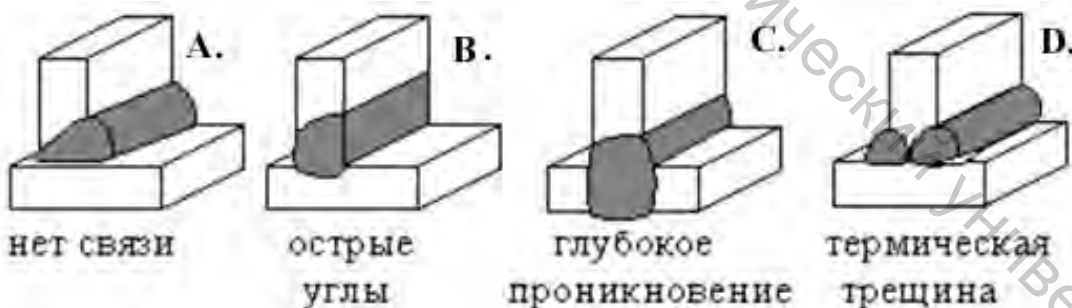
1. В какой части конструкции дефект самый опасный?



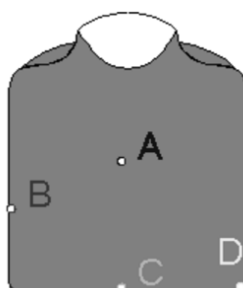
2. Каждый дефект имеет одинаковый максимальный размер. Какой дефект самый опасный?



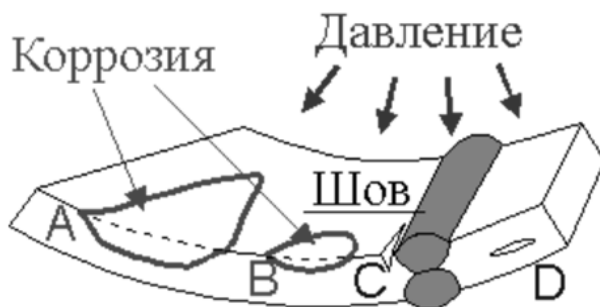
3. Какой дефект типичен для сварки?



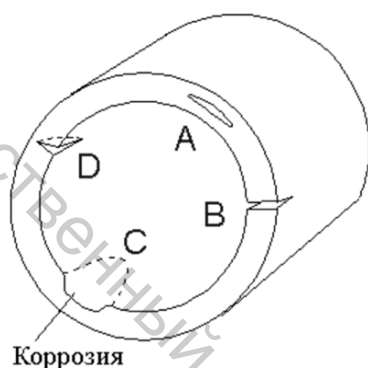
4. В какой части отливки можно найти самый большой технологический дефект?



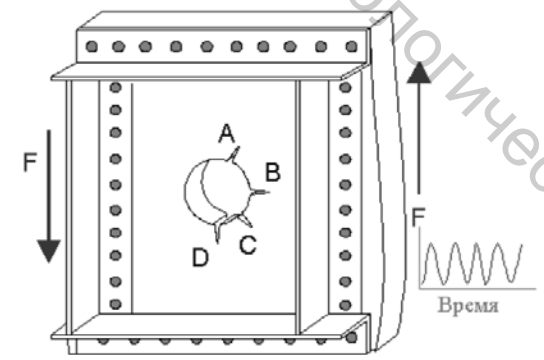
5. Сосуд давления был подвержен коррозии. Неразрушающим методом контроля было обнаружено 4 дефекта в оболочке. Какой дефект самый опасный?



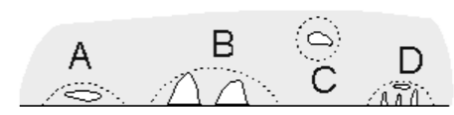
6. Какой дефект легко обнаружить в нефтепроводе?



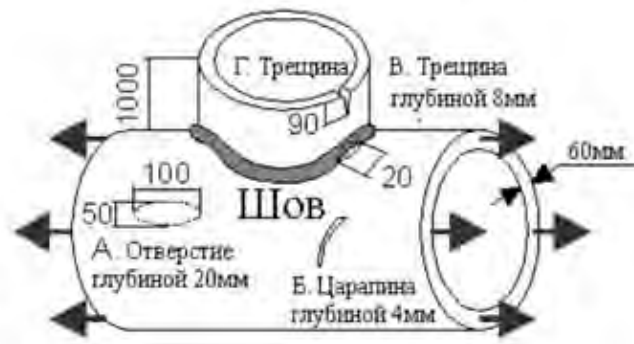
7. Какая трещина стартует первой?



8. Рисунок показывает поперечное сечение с обнаруженными дефектами. Какой дефект самый опасный?



9. Элемент нефтяной платформы имеет 4 обнаруженных дефекта. Какой дефект самый опасный?

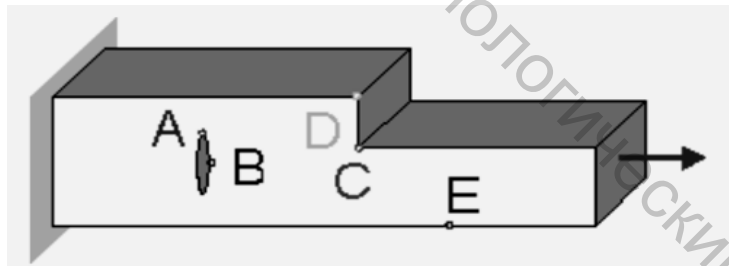


10. Какой дефект является причиной окончательного разрушения при увеличении нагрузки?



Напряжения в вершине трещины

11. В какой точке растягивающие напряжения максимальны?

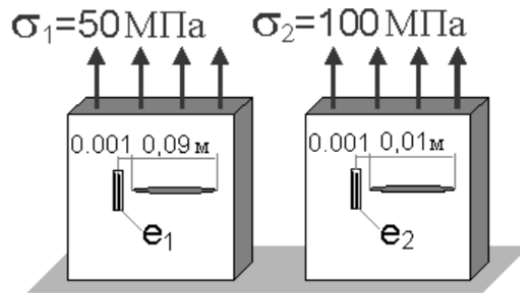


12. Два тензодатчика помещены на равных расстояниях от вершин трещин. Отношение деформаций e_2/e_1 ?



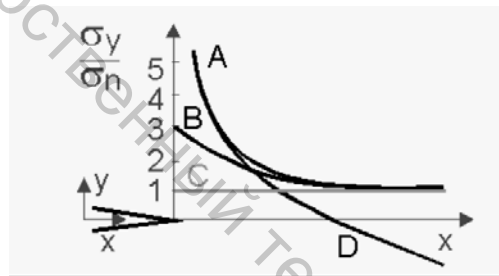
- A. 0.5 B. 1.0 C. 2.0 D. 4.0

13. Два тензодатчика помещены на равных расстояниях от вершин трещин. Для какого случая деформация растяжения максимальна?

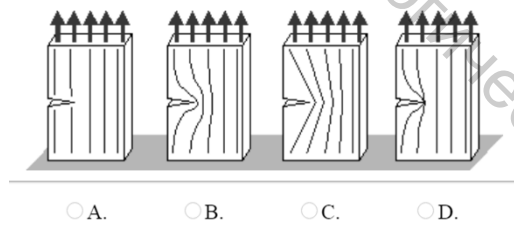


- A. $e_1 > e_2$ B. $e_1 < e_2$ C. $e_1 = e_2$

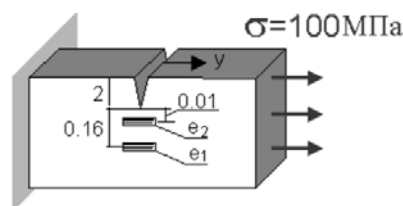
14. На рисунке эпюра напряжений на линии продолжения трещины при растяжении пластины. Какая эпюра напряжений является наиболее точной?



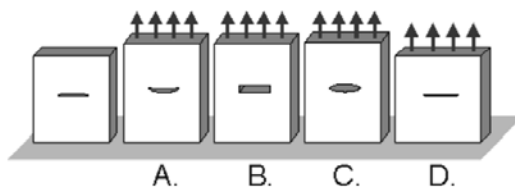
15. Какой образец точно показывает распределение силовых линий?



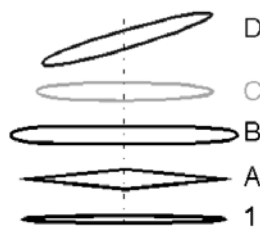
16. Отношение деформаций растяжения e_2 / e_1 равно: А. - 0,25. В. - 0,5. С. - 1. D. - 2. E. - 4. F. - 16.



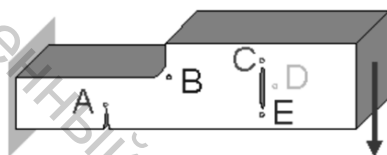
17. Какой вид имеет деформированная форма идеально упругой пластины с центральной трещиной?



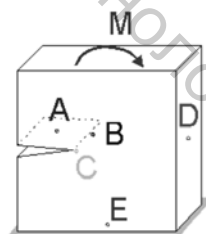
18. Схема 1 показывает первоначальную форму и размер трещины в резиновом листе. После растяжения в вертикальном направлении форма изменилась. Какова новая форма трещины?



19. В какой точке растягивающие напряжения максимальны?

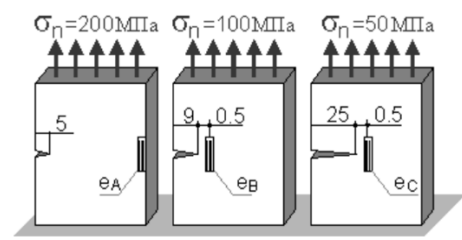


20. В какой точке растягивающие напряжения максимальны?

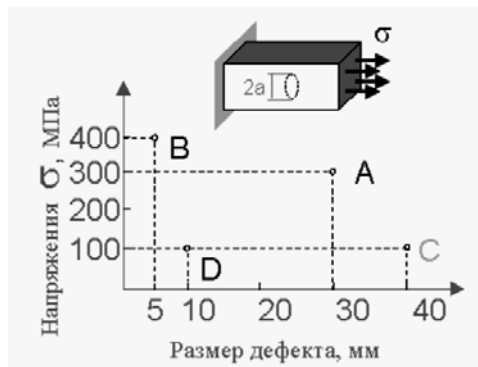


Коэффициент интенсивности напряжений

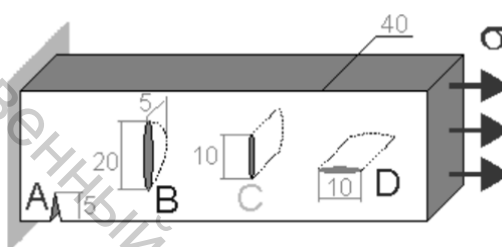
21. Тензодатчики измеряют деформацию в широкой пластине ($W=500$ мм) с трещиной. Деформация пропорциональна напряжениям. У какого из образцов самая высокая деформация?



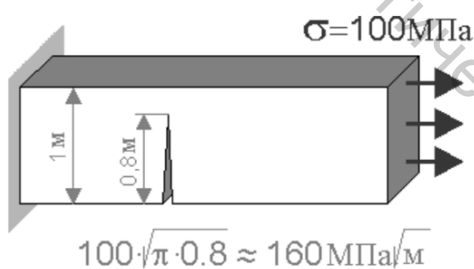
22. Неразрушающий контроль показал наличие внутренних дефектов в четырех образцах, нагруженных различными напряжениями. Для какого из образцов интенсивность напряжений в вершине трещины самая высокая?



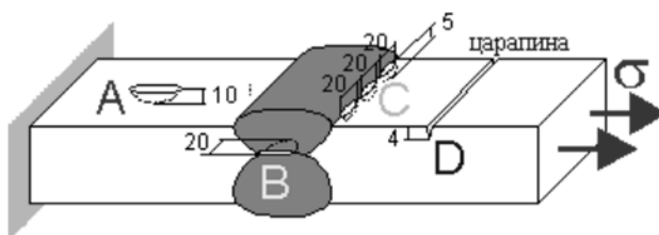
23. Для какого случая коэффициент интенсивности напряжений самый высокий?



24. Коэффициент интенсивности напряжений приблизительно равен: **A.** – $160 \text{ МПа м}^{1/2}$, **B.** – $160 * 1.12 = 179.2 \text{ МПа м}^{1/2}$, **C.** – $160 * 1.5 = 240 \text{ МПа м}^{1/2}$, **D.** – $> 240 \text{ МПа м}^{1/2}$.



25. Какой из дефектов является наиболее опасным?



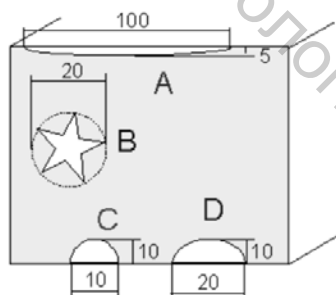
26. Напряжения, возникающие в вершине трещины в пластине, работающей на растяжение. Все размеры даны в миллиметрах. Напряжение в отмеченной точке равно:

A. 100 МПа B. 144 МПа C. 200 МПа
 D. 400 МПа E. >400 МПа

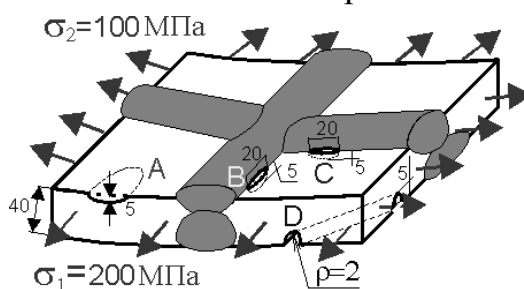
27. Выбрать правильно написанные единицы измерения коэффициента интенсивности напряжений и определить наибольший из них.

A. – 100 МПа; B. – 100 МПа м^{1/2}; C. – 99 кгс см^{1/2}; D. – 111 КН/м^{1/2}; E. – 200 ГПа; F. – 1000 Па м^{1/2}.

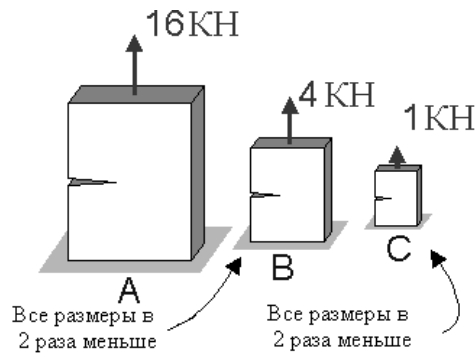
28. Неразрушающий контроль показал наличие четырех дефектов в поперечном сечении. Какой дефект наиболее опасный, судя по коэффициенту интенсивности напряжений?



29. Сварное соединение сосуда давления с дефектом коррозии А, поверхностными трещинами В, С и царапиной D. Схема нагрузки – двухосное растяжение. Все размеры в мм. Какой дефект имеет самый высокий коэффициент интенсивности напряжений?

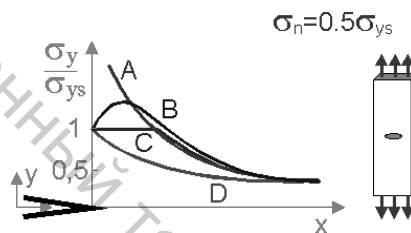


30. Какой образец имеет самый высокий коэффициент интенсивности напряжений?

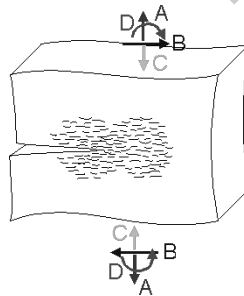


Пластичность

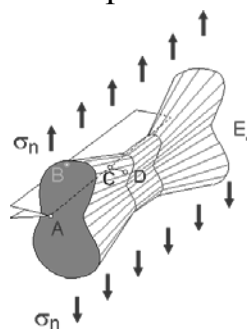
31. Какое распределение напряжений на линии роста трещины в центре толстой стальной пластины? σ_{ys} – предел текучести.



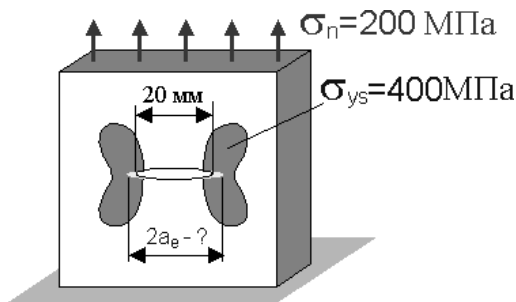
32. Имеется рябь на полированной поверхности толстой пластины из низкоуглеродистой стали, которая отражает внутренние пластические деформации. Как испытывался образец?



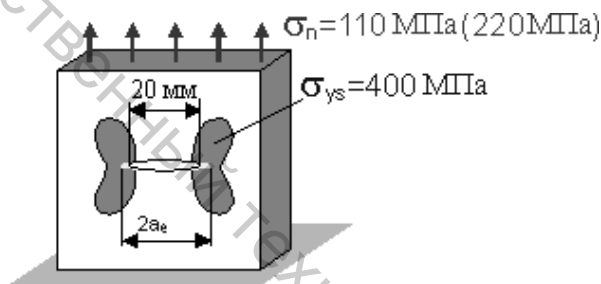
33. На рисунке показана пластическая область в толстой стальной пластине. В какой точке напряжение максимальное?



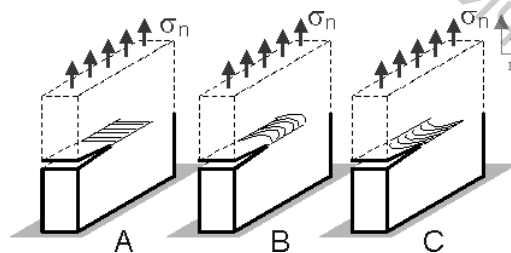
34. Эффективный размер трещины $2a_e$, который составляет пластическую деформацию, равен: А. – 20 мм, В. – 21 мм, С. – 22.5 мм, D. – 25 мм.



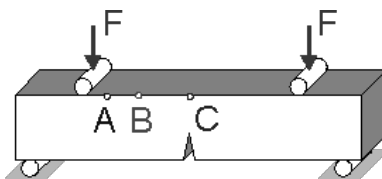
35. Коэффициент интенсивности напряжений для стальной пластины, нагруженной напряжением 110 МПа, равен $19.5 \text{ МПа м}^{1/2}$. Номинальное напряжение увеличивается в 2 раза. Какое значение имеет коэффициент интенсивности напряжений для эффективного размера трещины при пластических деформациях? А. – $K_I = 19.5 \text{ МПа м}^{1/2}$; В. – $K_I < 39 \text{ МПа м}^{1/2}$; С. – $K_I = 39 \text{ МПа м}^{1/2}$; D. – $K_I > 39 \text{ МПа м}^{1/2}$.



36. Причина роста трещины – местная пластическая деформация. Какой ожидается форма фронта трещины в толстом стальном образце?

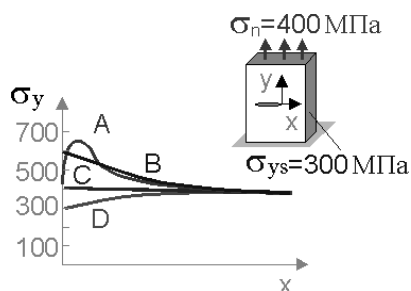


37. Какой точки пластическая зона в вершине трещины достигнет раньше?

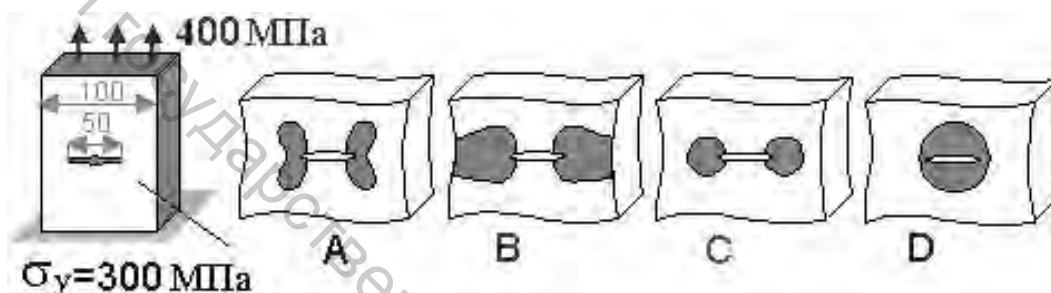


38. Низкоуглеродистая стальная пластина с трещиной в центре при растяжении. Предел текучести – 300 МПа и максимальный предел

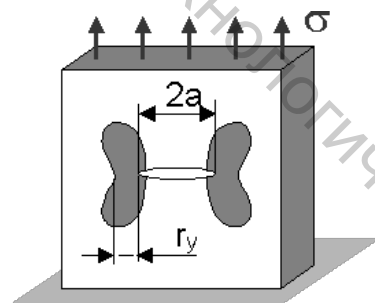
прочности – 700 МПа. Какая кривая показывает распределение напряжений по оси x?



39. Низкоуглеродистая сталь имеет предел текучести 300 МПа. Какова наиболее точная форма пластической зоны?



40. Увеличение какого параметра уменьшает размер пластической зоны r_y в вершине трещины? А. – Длина трещины a . В. – Номинальное напряжение. С. – Предел текучести. D. – Предел прочности.



Хрупкое разрушение

41. Корпус клапана с заглушкой. Неразрушающим контролем была обнаружена полуэллиптическая трещина. Специалисты считают, что коэффициент интенсивности напряжений при рабочем давлении равен $40 \text{ МПа м}^{1/2}$. Трещиностойкость материала $57 \text{ МПа м}^{1/2}$. Номинальное напряжение 200 МПа. Возможно ли увеличить давление при испытании до 2 МПа?

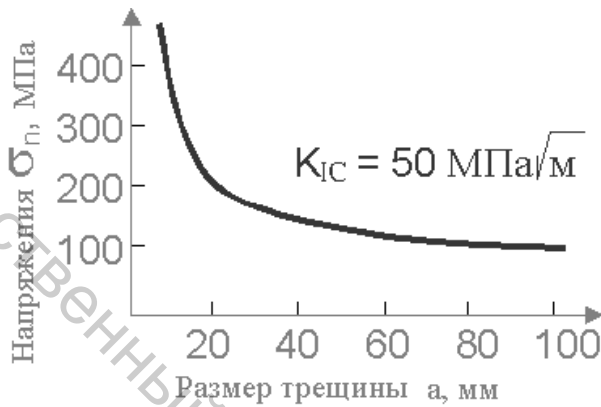
А. – Возможно. В. – Невозможно.



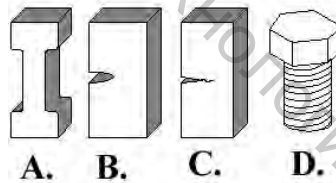
Рабочее давление 1.2 МПа
Температура > 100 °С

42. Трещиностойкость стали равна $50 \text{ МПа м}^{1/2}$. Какая комбинация напряжение – длина трещины приведет к отказу?

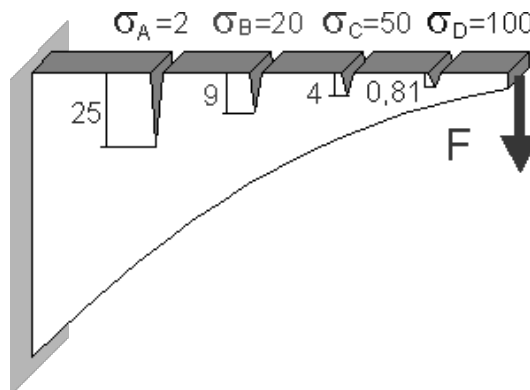
А. – 20 МПа – 100 мм. В. – 100 МПа – 60 мм. С. – 200 МПа – 40 мм. D. – 250 МПа – 10 мм. E. – 400 МПа – 1 мм.



43. Выберите образец для испытания на хрупкое разрушение?

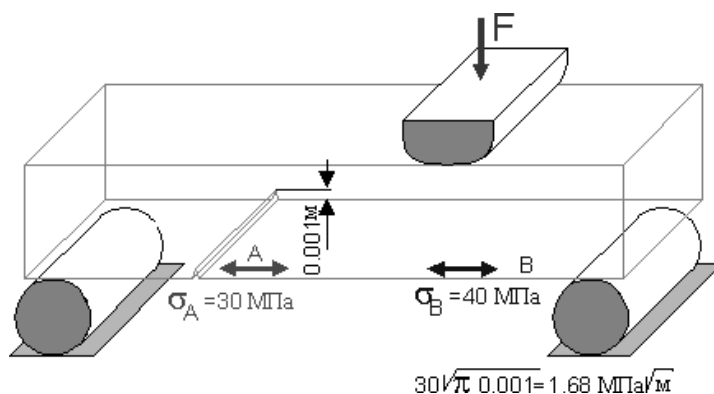


44. В какой точке в образце начнется первоначальный рост трещины, если нагрузка F увеличивается? Номинальные напряжения в соответствующей области показаны для каждой трещины.



45. Стеклопластина повреждена. Механические свойства стекла: предел прочности 50 МПа, трещиностойкость $K_{IC} = 1.7 \text{ МПа м}^{1/2}$.

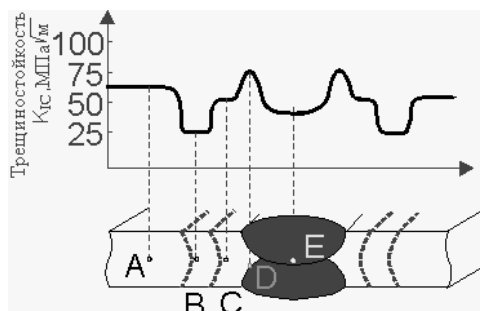
Номинальные значения напряжений для зон А и В известны. В какой точке стеклянная пластина будет разрушена? Выберите С, если вы думаете, что пластина не разрушится.



46. Выберите материал с самым большим сопротивлением хрупкому разрушению.

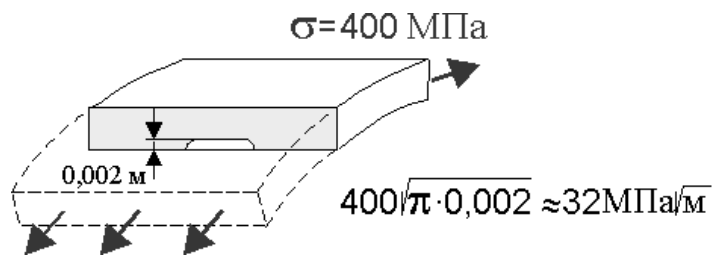
	Материал	Прикладываемая нагрузка, МПа	Предел прочности, МПа	K_{Ic} , МПа м ^{1/2}
A.	Алюминиевый сплав	450	600	30
B.	Титановый сплав	1080	1400	43.4
C.	Углеродистая сталь	280	490	127
D.	Сталь 4340	1400	1800	46

47. График показывает экспериментальные данные трещиностойкости для сварного шва. Имеются пять дефектов в сварном соединении. Коэффициент интенсивности напряжений K_I для каждого дефекта был рассчитан и показан ниже. Для какой области запас прочности будет наименьшим? A. – $K_I = 30$ МПа м^{1/2}. B. – $K_I = 20$ МПа м^{1/2}. C. – $K_I = 30$ МПа м^{1/2}. D. – $K_I = 40$ МПа м^{1/2}. E. – $K_I = 10$ МПа м^{1/2}.

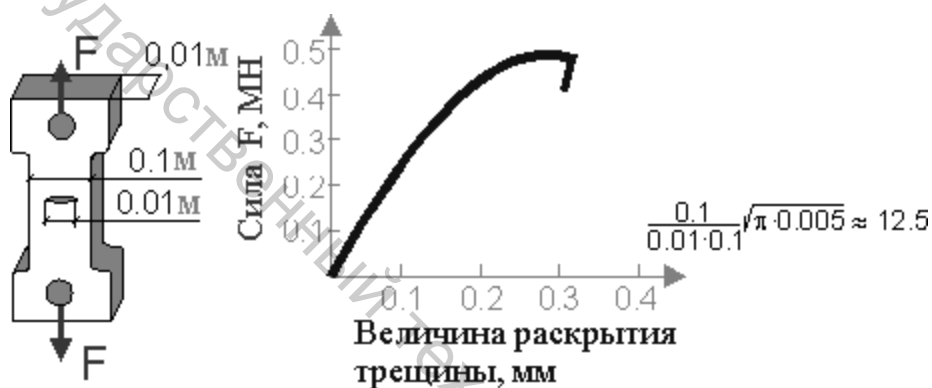


48. Периодический неразрушающий контроль может выявить поверхностные дефекты с размером трещины 0.002 м или больше в

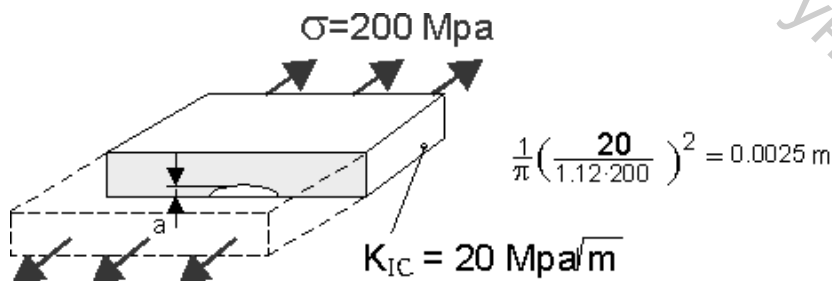
сосуде давления. Выберите лучший материал для сосуда давления. **A.** – Низко углеродистая сталь, $K_{IC} = 33 \text{ МПа м}^{1/2}$, цена: $\$ 250/\text{м}^2$. **B.** – Углеродистая сталь, $K_{IC} = 66 \text{ МПа м}^{1/2}$, цена: $\$ 500/\text{м}^2$. **C.** – Легированная сталь, $K_{IC} = 120 \text{ МПа м}^{1/2}$, цена: $\$ 1500/\text{м}^2$.



49. Испытание на хрупкое разрушение проведено на образце с начальной усталостной трещиной. Трещиностойкость материала равна: **A.** – $12.5 \text{ МПа м}^{1/2}$. **B.** – $50 \text{ МПа м}^{1/2}$. **C.** – $62.5 \text{ МПа м}^{1/2}$. **D.** – $125 \text{ МПа м}^{1/2}$.

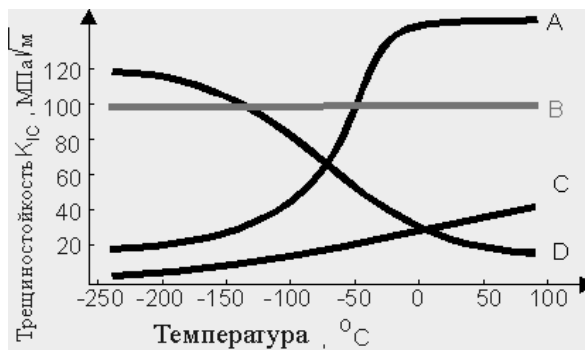


50. Трещиностойкость стали равна $20 \text{ МПа м}^{1/2}$. Имеются 4 метода неразрушающего контроля с различным разрешением (a – минимальный размер обнаруженных трещин). Выберите наилучший метод неразрушающего контроля. **A.** – $a = 0.0005 \text{ м}$, цена оборудования $\$ 18000$. **B.** – $a = 0.001 \text{ м}$, цена оборудования $\$ 14000$. **C.** – $a = 0.003 \text{ м}$, цена оборудования $\$ 6000$. **D.** – $a = 0.004 \text{ м}$, цена оборудования $\$ 3000$.

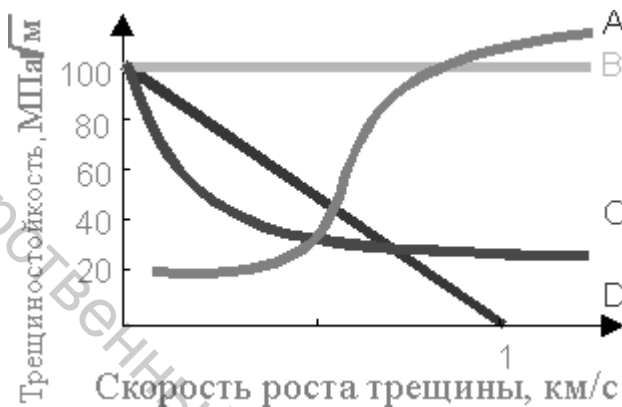


Температура и скорость деформации

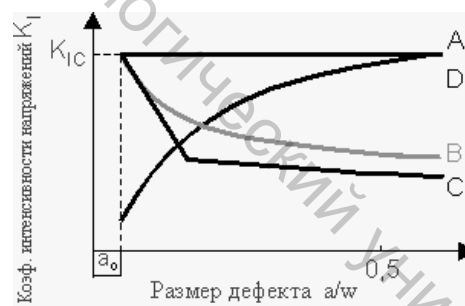
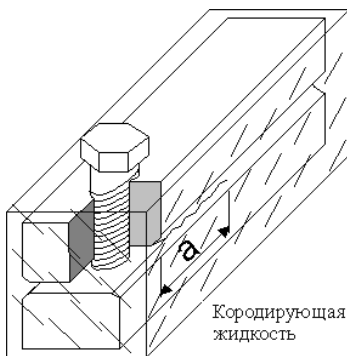
51. Какая кривая точно отражает трещиностойкость оконного стекла?



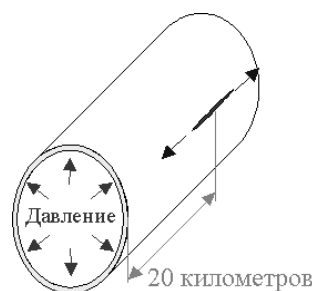
52. Какая кривая точно отражает трещиностойкость углеродистой стали?



53. Медленный рост трещины под влиянием коррозии в двухбалочном (DB) образце. Как изменится коэффициент интенсивности напряжения с ростом трещины?



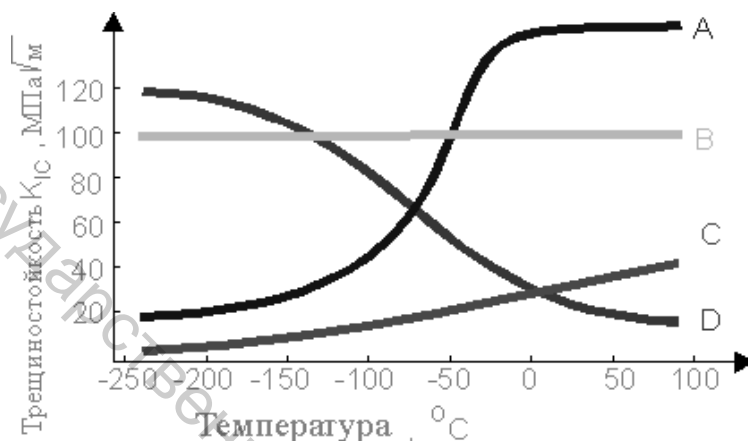
54. При какой температуре сложнее остановить бегущую трещину в газопроводе? А. – лето, +30 °С. В. – весна, 0 °С. С. – зима, -40 °С.



55. Какой механизм разрушения является типичным для быстрого роста трещины со «взрывной» скоростью в углеродистой стали?



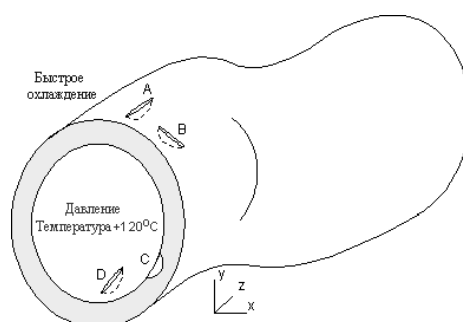
56. Какая кривая точно отражает трещиностойкость углеродистой стали?



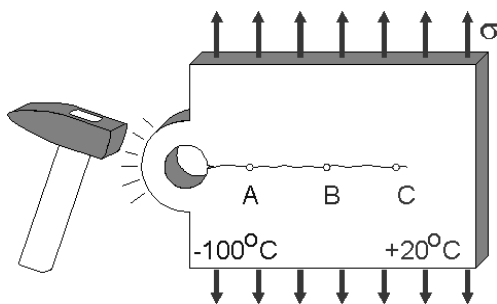
57. Испытание на трещиностойкость. Скорость увеличения напряжения постоянная. Какой образец имеет самый большой период времени между началом медленного роста трещины и окончательным разрушением?



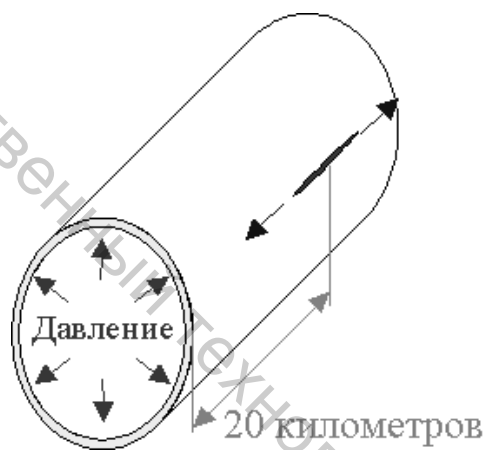
58. Быстрое охлаждение изогнутого трубопровода с паром. Имеются 4 дефекта с одинаковыми размерами. Какой дефект является наиболее опасным?



59. Испытание по Робертсону: левый конец образца охлажден до -100° . После удара молотком, трещина стартует и движется вдоль образца. В какой точке скорость роста трещины самая быстрая?

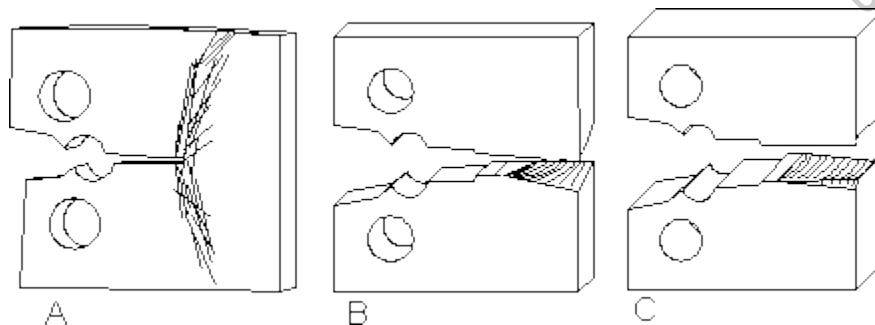


60. Сквозная трещина стартует в газопроводе. 20 км до ближайшей станции. Трещина достигнет станции через: А. – 4 секунды, В. – 20 секунд, С. – 2 минуты, D. – 20 минут.



Масштабный фактор

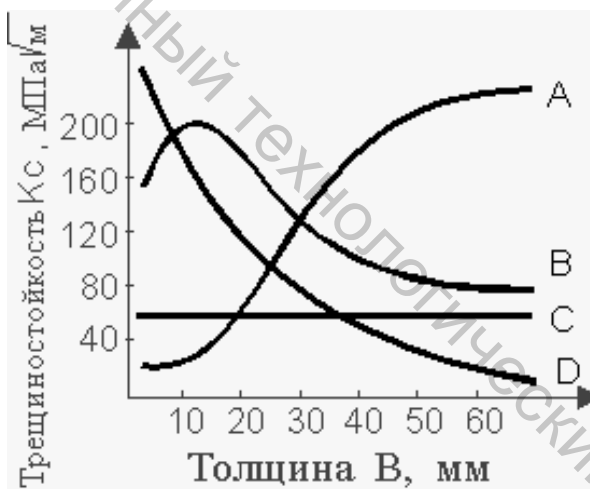
61. На рисунке изображены три образца из углеродистой стали после испытаний. Какой образец имеет самую высокую трещиностойкость K_{IC} ?



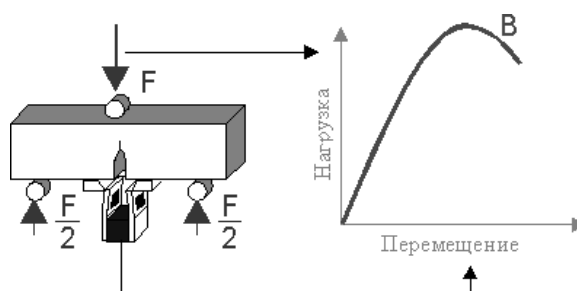
62. Высокопрочная сталь имеет хрупкие межзеренные прослойки. Какая кривая точно отражает критические напряжения в зависимости от содержания дефектов?



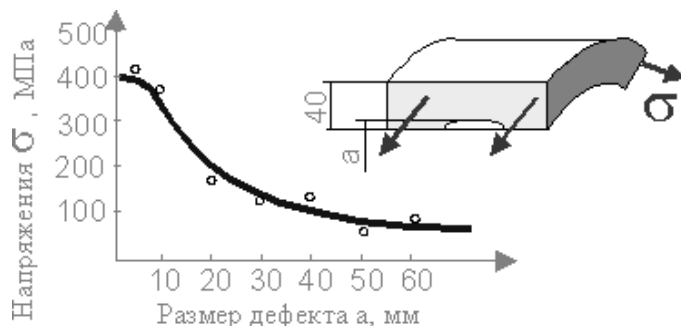
63. Какая кривая точно отражает трещиностойкость углеродистой стали?



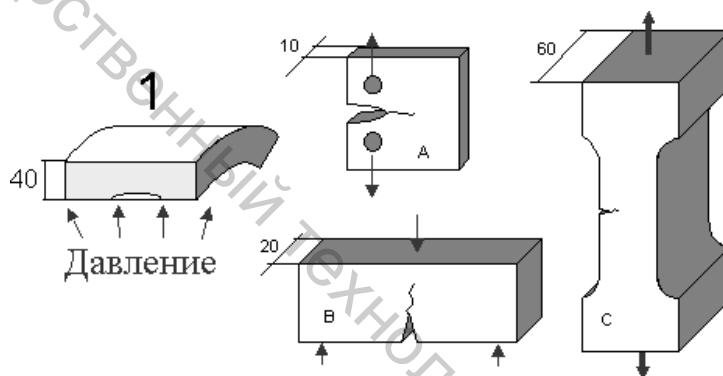
64. Увеличение какого параметра повышает трещиностойкость (вязкость разрушения) углеродистой стали? А. – Толщина. В. – Размер зерна. С. – Скорость деформирования. D. – Площадь поперечного сечения образца. E. – Температура.



65. Были испытаны семь сосудов давления с дефектами. На рисунке показаны экспериментальные данные «напряжение – размер дефекта». Какое соотношение напряжения – длина трещины не допустимо? А. – 50 МПа – 55 мм. В. – 100 МПа – 30 мм. С. – 250 МПа – 5 мм. D. – 450 МПа – 0.5 мм.



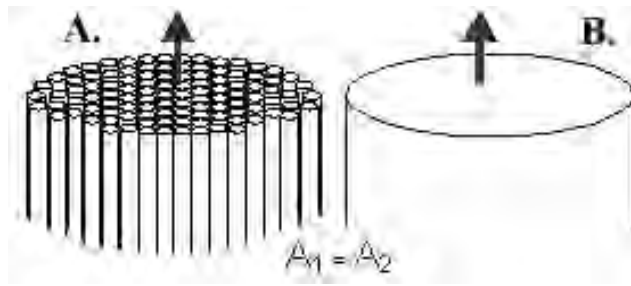
66. Выберите лучший образец для определения трещиностойкости. Данные будут использоваться для проекта сосуда давления 1.



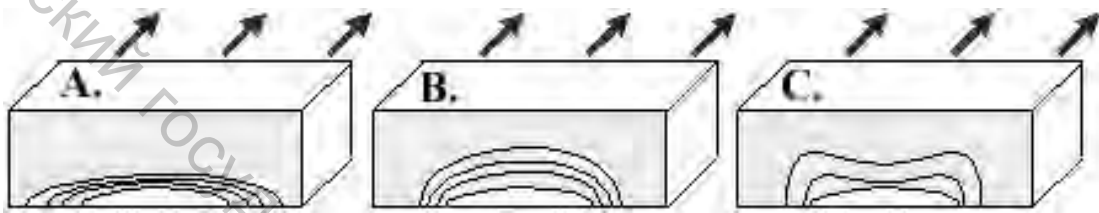
67. Для оценки долговечности сосуда давления был испытан опытный образец с пропорционально уменьшенными размером и давлением. Число циклов до образования трещины усталости данного образца 100,000. Толщина опытного образца в десять раз меньше толщины стенки сосуда. Возможно ли использовать данные этого эксперимента для оценки долговечности сосуда давления? А. Да. Это меньше 100 000. В. Да. Это больше 100 000. С. Да. Это приблизительно равно 100 000. D. Нет. Эти данные невозможно использовать.

68. Выберите для образца оптимальное сочетание (толщина * высота) для оценки вязкости разрушения при трехточечном изгибе: А. – 12.5 мм * 50 мм, В. – 25 мм * 100 мм, С. – 50 мм * 200 мм, D. – 25 мм * 450 мм.

69. Канат и прут сделаны из одинаковых материалов и имеют равные площади поперечного сечения. Какая конструкция имеет более высокую трещиностойкость?

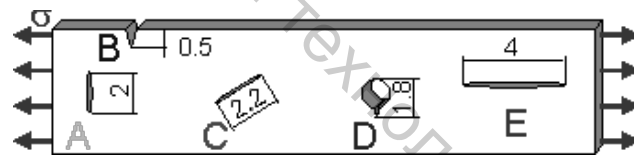


70. Изображены три варианта роста усталостной трещины в достаточно толстом стальном образце с дефектом. Какой из вариантов точно отражает фронт трещины?

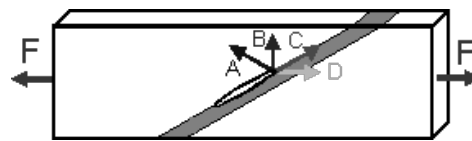


Смешанное нагружение

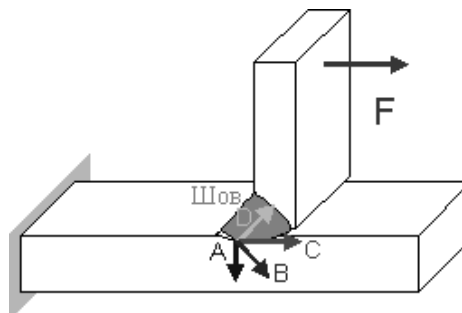
71. В каком месте произойдет разрушение?



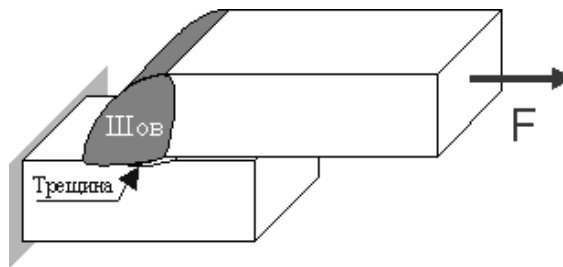
72. Две части материала соединены эпоксидной смолой. На поверхности имеется расслоение. В каком направлении произойдет разрушение, если тип разрушения – сдвиг?



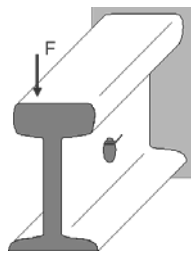
73. Вид разрушения – отрыв. В каком направлении стартует трещина?



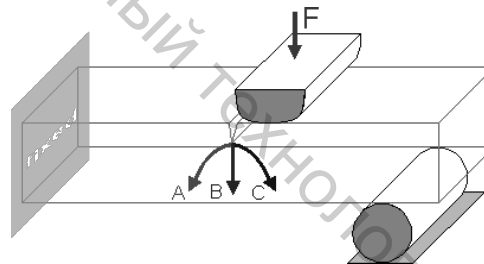
74. Какова схема нагружения в вершине трещины? А. – Раскрытие трещины I. В. – Сдвиг в плоскости II. С. – Антиплоский сдвиг III. D. – В вершине трещины нет сингулярностей.



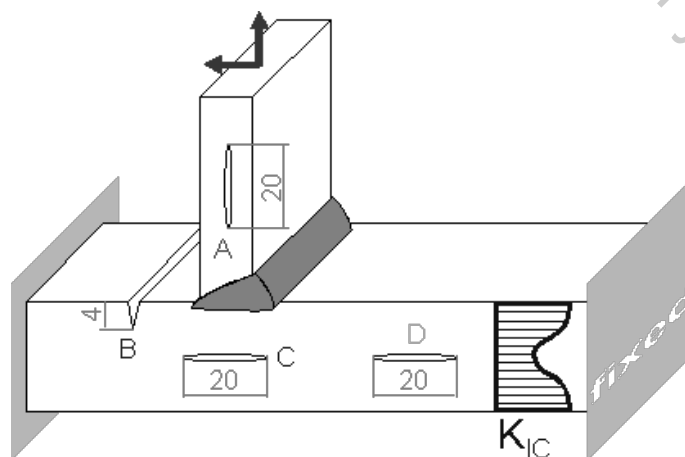
75. Что произойдет в вершине трещины? А. – I – раскрытие. В. – II – сдвиг. С. – I+II – смешанный способ. D. – Закрытие трещины.



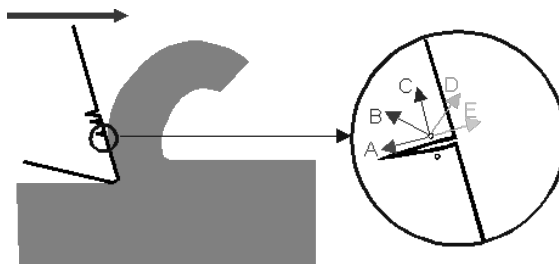
76. Как стартует трещина в стеклянном листе?



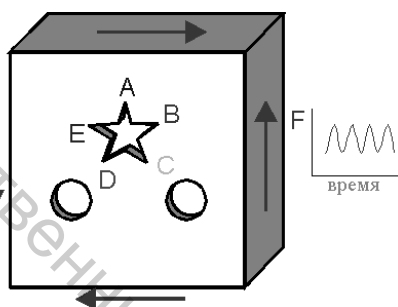
77. Трещиностойкость стали для морских буровых платформ в центре пластины в два раза ниже, чем на поверхности. Какой дефект является наиболее опасным при хрупком разрушении?



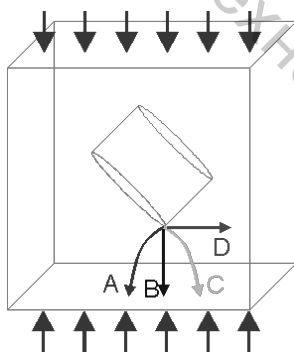
78. В резце имеются микродефекты. Как берега микротрещин перемещаются относительно друг друга? **А.** – Способ I. **В.** – Способ I+II. **С.** – Способ II. **D.** – Способ I+II. **Е.** – Способ II.



79. Три символа были отпечатаны на мягкой пластине из низкоуглеродистой стали. В какой точке стартует усталостная трещина?



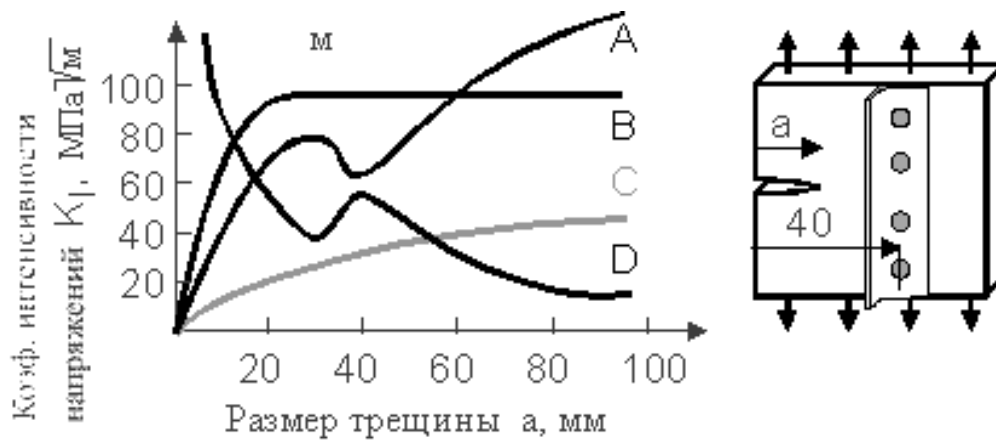
80. Как разрушится стеклянный образец?



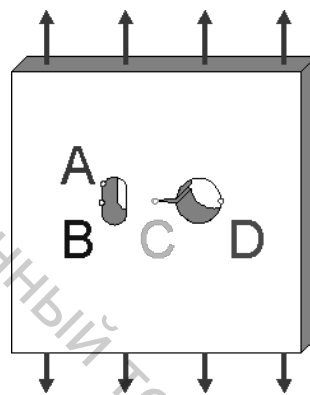
Предотвращение разрушения

81. Выберите фактор, который уменьшает трещиностойкость стального сосуда давления: **А.** – Жесткие ребра. **В.** – Биметаллические стенки (вязкость + высокая прочность). **С.** – Исправление зон с обнаруженными небольшими дефектами. **D.** – Закалка конструкции.

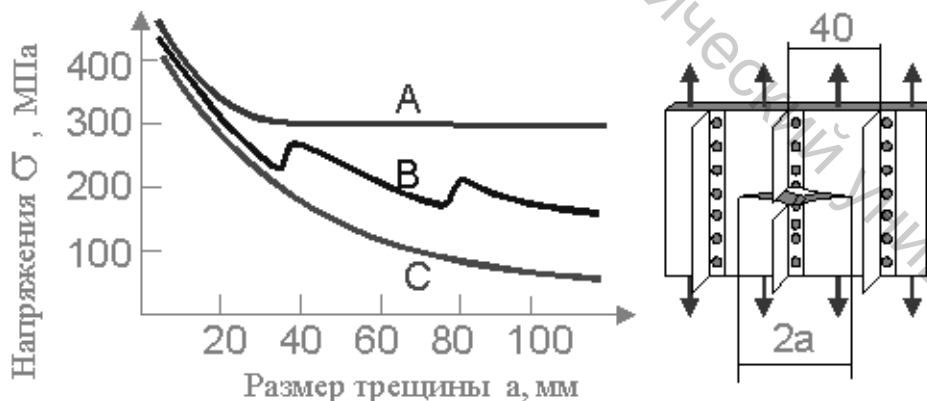
82. Какая кривая точно отражает зависимость коэффициента интенсивности напряжений от размера трещины для этой конструкции?



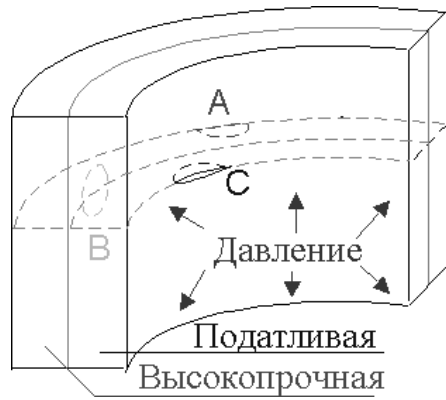
83. В какой точке конструкции растягивающие напряжения максимальны?



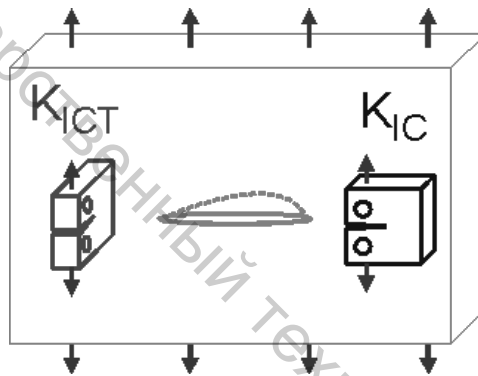
84. Усталостная трещина разрушает стрингер и растет дальше. Какая кривая точно отражает зависимость критического напряжения от размера трещины?



85. Сосуд давления с биметаллическими стенками. Три дефекта с одинаковым максимальным размером были обнаружены неразрушающим методом контроля. Какой из дефектов является наиболее опасным для хрупкого разрушения? А. – Поверхностная трещина в высокопрочной стали. В. – Межслойная эллиптическая трещина. С. – Поверхностная трещина в податливой стали.

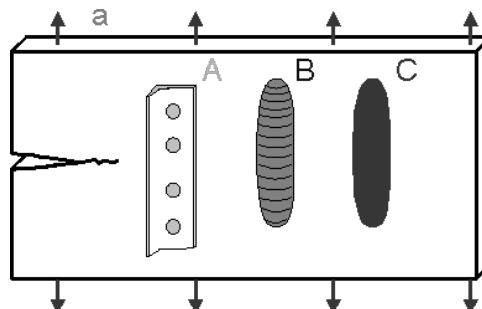


86. Две характеристики материала были получены для стенки сосуда давления. Какое соотношение является лучшим для условия Течи До-Разрушения? **A.** – $K_{IC} / K_{IC} = 0.5$. **B.** – $K_{IC} / K_{IC} = 1.0$. **C.** – $K_{IC} / K_{IC} = 2.0$.



87. После 100.000 часов работы турбина была остановлена для плановой проверки. В ходе проверки были замечены маленькие коррозионные трещины в центральной части поверхности ротора, с максимальной глубиной 2.8 мм. Возможно ли продлить жизнь ротора? **A.** – Да, заварив все дефекты. **B.** – Да, отшлифовав поверхность, срезав 3 мм. **C.** – Да, отшлифовав поверхность, срезав 6 мм. **D.** – Нет, упомянутые методы не помогут.

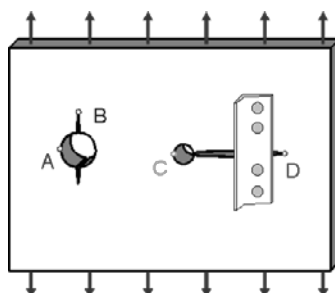
88. Что может остановить бегущую трещину в стальном листе? **A.** – Алюминиевый стрингер. **B.** – Наплавка сваркой. **C.** – Местное увеличение жесткости. **D.** – Ни один из вышеупомянутых.



89. Для какого типа укладки слоев трещиностойкость выше?

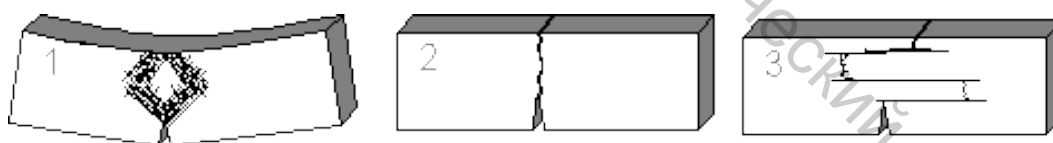


90. В какой точке конструкции растягивающие напряжения максимальны?

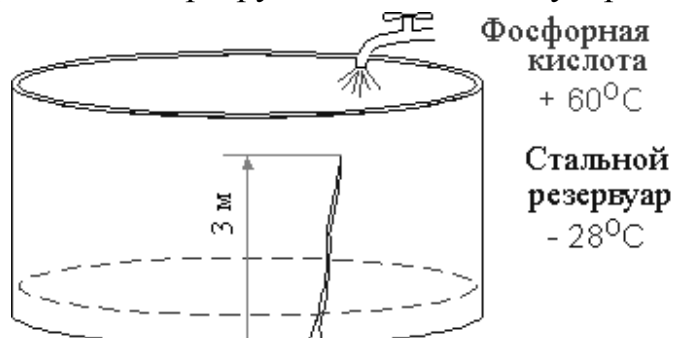


Анализ разрушения

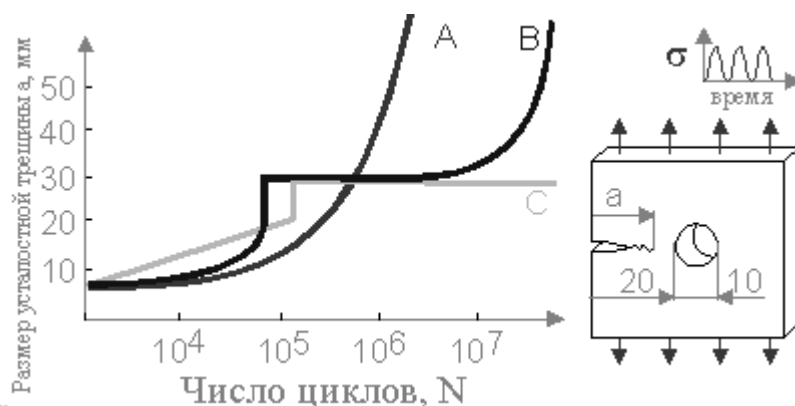
91. Три образца с трещинами из низкоуглеродистой стали, инструментальной стали и однонаправленного алюминий-бор композита были исследованы. Какой тип разрушения соответствует каждому материалу? **А.** 1 – композит, 2 – низкоуглеродистая сталь, 3 – инструментальная сталь. **В.** 1 – инструментальная сталь, 2 – композит, 3 – низкоуглеродистая сталь. **С.** 1 – низкоуглеродистая сталь, 2 – композит, 3 – инструментальная сталь. **Д.** 1 – низкоуглеродистая сталь, 2 – инструментальная сталь, 3 – композит.



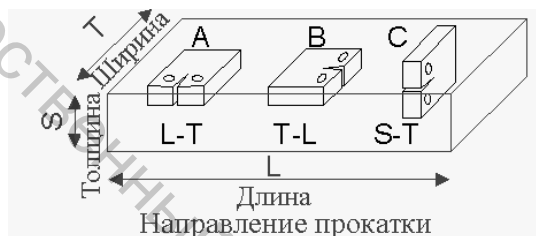
92. После ремонта стальной резервуар был наполнен доверху горячей фосфорной кислотой. Была зима и не было тепловой изоляции, хрупкая трещина разрушила конструкцию. Что было главной причиной аварии? **А.** Коррозия. **В.** Перегрузка. **С.** Тепловой удар. **Д.** Усталость.



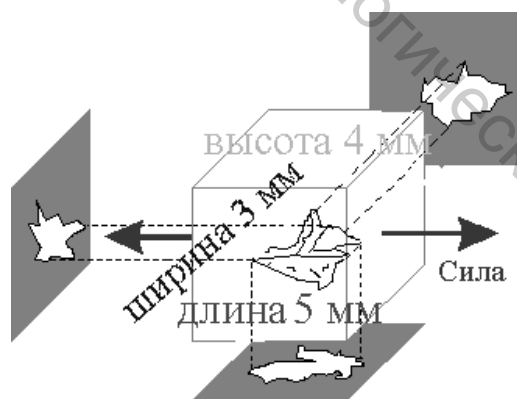
93. Какая линия точнее отражает зависимость длины усталостной трещины от числа циклов до разрушения?



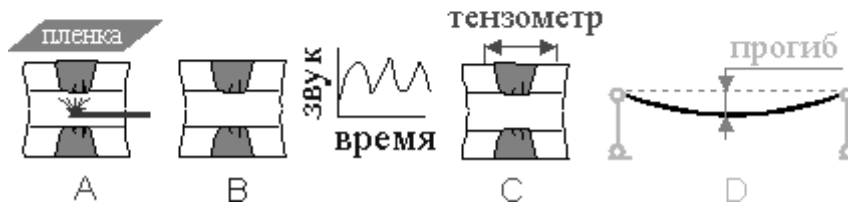
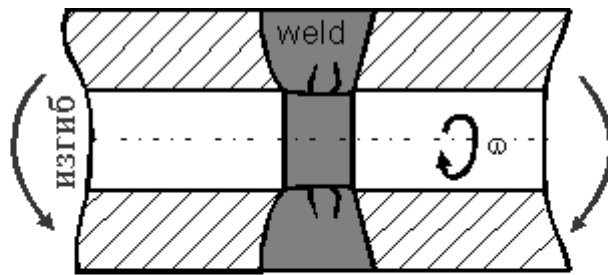
94. Для какого направления трещиностойкость высокопрочного алюминиевого сплава максимальна? А. L – T. ● В. T – L. ● С. S – T.



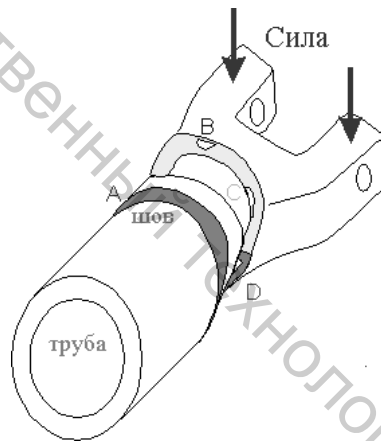
95. Трещина с острыми углами была обнаружена в отливке на рентген-фотографии. Дефект аппроксимирован как круговая трещина. Диаметр трещины: А. – 3 мм. В. – 4 мм. С. – 5 мм.



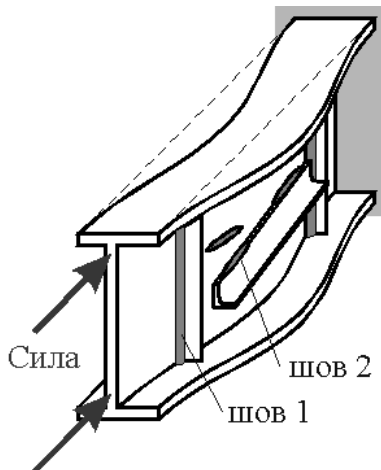
96. Усталостные трещины на внутренней поверхности основного сварного шва в высокоскоростном роторе. Выбрать лучший метод для обнаружения трещины. А. – Рентген фотография. В. – Вибродиагностика. С. – Периодическое измерение удлинения на внешней поверхности. D. – Периодическое измерение прогиба ротора.



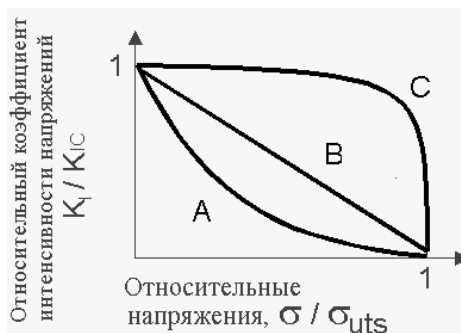
97. Схема показывает разрушенную стрелу экскаватора. Какая главная причина разрушения? **А.** – Плохое качество сварного шва. **В.** – Дефект верхней части отливки. **С.** – Дефект на внутренней поверхности отливки. **Д.** – Дефект в сварном шве.



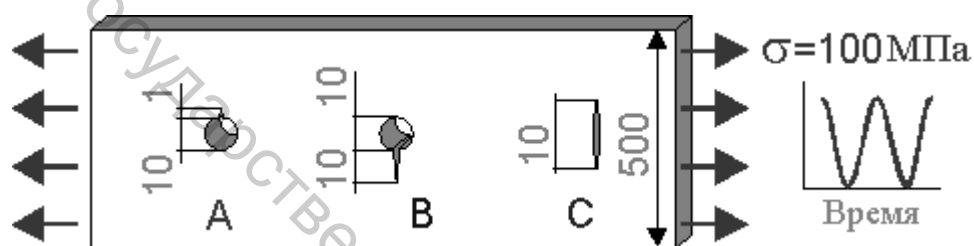
98. Почему конструкция разрушилась?
А. – Неправильный выбор сварного шва 1. **В.** – Неправильный выбор сварного шва 2. **С.** – Внутренние дефекты в стальном листе.



99. Какая кривая показывает критическое состояние материалов?



100. Для какого случая скорость усталостной трещины наивысшая? Все размеры в мм.



ОТВЕТЫ К ТЕСТАМ

1. Балка изгибается, верхний слой растягивается, нижний слой сжимается. Отсутствуют нормальные напряжения на нейтральной линии. А. *Неверно*. Трещина на нейтральной линии. Здесь отсутствуют растягивающие напряжения. В. *Неверно*. Трещина под сжатием. С. *Неверно*. Внутренний дефект менее опасен, чем поверхностный дефект D. **Д. Верно**. Этот дефект самый опасный. **Правильный ответ D.**

2. Трещины самые опасные дефекты. Трещина, перпендикулярная растягивающему усилию является самой опасной. **Правильный ответ E.**

3. А. *Неверно*. При контроле такой шов будет забракован. В. *Неверно*. Это не типично для сварного шва. С. *Неверно*. Это не типично для сварного шва. **Д. Верно**. Существуют такие дефекты в сварных швах. **Правильный ответ D.**

4. Существуют поверхностные дефекты в точках В, С, D. Но литые поры (А) могут иметь большие размеры. **Правильный ответ А.**

5. Утонение оболочки (А, В) опасно, но эти дефекты не острые, поэтому концентрация напряжений не высокая для этих дефектов. Растягивающие напряжения действуют вдоль дефекта D. **Самый опасный дефект С.**

6. Через сквозную трещину допускается просачивание нефти. Это лучший метод для обнаружения такого дефекта. Другие дефекты могут быть обнаружены неразрушающими методами. **Правильный ответ В.**

7. Аппроксимация площади дефекта эллиптической и полу – эллиптической кривыми показывает, что дефект В имеет большую площадь. **Правильный ответ В.**

8. Существуют циклические касательные нагрузки. Линия максимальных касательных напряжений в толстой оболочке наклонена к силе F под углом 45° . Дефект С перпендикулярен максимальным касательным напряжениям. **Правильный ответ С.**

9. А. *Неверно*. Дефект не имеет острых углов. Б. *Неверно*. Дефект опасен, но трещина в сварном шве – наиболее серьезный дефект. **В. Верно**. Дефект в зоне термического влияния от сварного тепла.

Внутренние силовые линии проходят через сварной шов. Г. *Неверно*. Трещина не находится в поле растягивающих напряжений. **Правильный ответ В.**

10. Трещины, перпендикулярны растягивающим напряжениям, являются самыми опасными дефектами (А, В). Существуют отверстия в вершине трещины А, поэтому они становится концентратором напряжений, не трещина. **Правильный ответ В.**

11. А. Верно. Максимальные напряжения в вершине трещины, это предельный концентратор. В. *Неверно*. Напряжения малы. С. *Неверно*. Высокая концентрация напряжения, но напряжение меньше, чем в точке А. D. *Неверно*. В точке нет никакого напряжения. Е. *Неверно*. В этой точке напряжение номинальное. **Правильный ответ А.**

12. Правильный ответ С. $e_2 / e_1 = \frac{\sigma_2 \sqrt{a_2} / \sqrt{2r_2}}{\sigma_1 \sqrt{a_1} / \sqrt{2r_1}} = \frac{\sqrt{a_2}}{\sqrt{a_1}} = \frac{\sqrt{20}}{\sqrt{5}} = 2 \quad e_1 = 2$

13. Правильный ответ А. $e_1 > e_2$

$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{\sigma_2 \sqrt{a_2} / \sqrt{2r_2}}{\sigma_1 \sqrt{a_1} / \sqrt{2r_1}} = \frac{\sigma_2 \sqrt{a_2}}{\sigma_1 \sqrt{a_1}} = \frac{100 \sqrt{0,01}}{50 \sqrt{0,09}} = \frac{2}{3} \rightarrow e_1 > e_2$$

14. А. Верно. Напряжения стремятся к бесконечности в вершине трещины, они равны номинальному напряжению вдали от трещины. В. *Неверно*. Эта эпюра типична для концентрации напряжения вокруг отверстия. С. *Неверно*. Эта эпюра характерна для однородного растяжения без трещины. D. *Неверно*. Эта эпюра типична для изгиба. **Правильный ответ – А.**

15. А. *Неверно*. Силовые линии не могут прерываться. В. **Верно**. Существует концентрация в вершине трещины. С. *Неверно*. Нет концентрации силовых линий. D. *Неверно*. Силовые линии не могут касаться друг друга. **Правильный ответ В.**

16. Правильный ответ Е $\frac{e_2}{e_1} = \frac{\sigma_2 \sqrt{a_2} / \sqrt{2r_2}}{\sigma_1 \sqrt{a_1} / \sqrt{2r_1}} = \frac{\sqrt{r_1}}{\sqrt{r_2}} = \frac{\sqrt{0,16}}{\sqrt{0,01}} = 4$

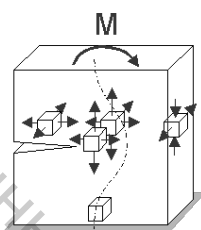
17. А. *Неверно*. Форма не симметрична относительно горизонтальной оси. В. *Неверно*. Форма имеет 4 острых угла. С. Верно. Форма трещины эллиптическая. D. *Неверно*. Форма типична для сжатия. **Правильный ответ С.**

18. А. *Неверно*. Новая форма не может иметь так много острых углов. В. *Неверно*. Новая форма не может иметь больший размер. С.

Верно. Форма – более короткий эллипс. D. *Неверно*. Форма не симметрична относительно вертикальной оси. **Правильный ответ С.**

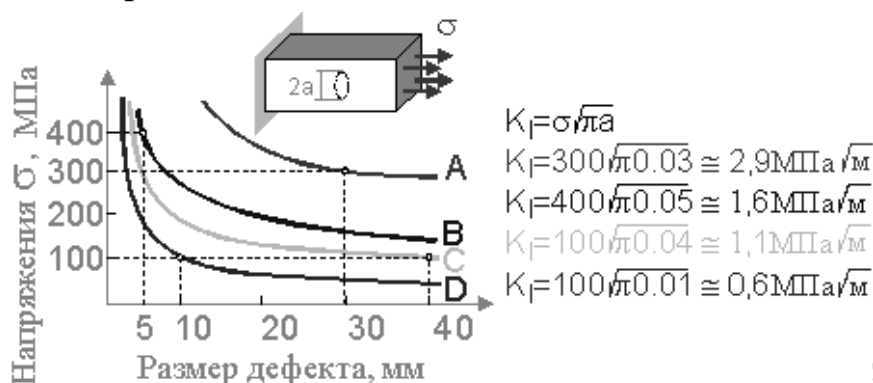
19. Балка изгибается и сдвигается. Верхний слой растянут, нижний слой сжат. A. *Неверно*. Эта точка находится в зоне сжатия. B. *Неверно*. Напряжения в этой зоне концентрации меньше чем в вершине трещины. C. Верно. Вершина трещины находится в растягиваемой зоне. D. *Неверно*. Напряжения в точке вдоль вертикальной оси не сингулярны. E. *Неверно*. Вершина трещины находится в зоне сжатия. **Правильный ответ С.**

20. Пунктирная кривая показывает нейтральную ось. Самое большое напряжение находится в вершине трещины. Напряжения в центре образца больше, чем на поверхности, они образуют объемное напряженное состояние. **Правильный ответ В.**



21. Самое высокое напряжение в вершине трещины. Тензодатчик А не покажет максимальной деформации. Сравнивая коэффициенты интенсивности напряжений K_I , получаем, что тензодатчик, установленный на расстоянии 0.5 мм от вершины трещины, будет замерять максимальную деформацию в случае B. $K_I = 1.12\sigma_n\sqrt{\pi a}$. B: $K_I = 1.12 * 100\sqrt{\pi 9} = 594.7 \text{ МПа}\sqrt{\text{мм}}$. C: $K_I = 1.12 * 50\sqrt{\pi 25} = 495.6 \text{ МПа}\sqrt{\text{мм}}$. **Правильный ответ В.**

22. Интенсивность напряжений самая высокая для дефекта с самым высоким коэффициентом интенсивности напряжений. Можно предположить, что вариант А имеет самый высокий коэффициент интенсивности напряжений. Вычисления подтверждают интуитивное предположение. **Правильный ответ А.**



23. Коэффициент интенсивности напряжений вычисляется по одной и той же формуле, где $a = 0.005\text{м}$, а поправочная функция F_I определяется отдельно для каждого дефекта. А. $F_I = 1.12$. В. $F_I < 1.12$. С. $F_I = 1.0$. D. $F_I = 0.0$ (трещина – вдоль силовых линий). **Правильный ответ А.**

24. В этом случае поправочная функция $F_I > 1.5$, значит, значение коэффициента интенсивности напряжений больше $240\text{ МПа м}^{1/2}$. **Правильный ответ D.**

25. Наиболее опасный дефект имеет самый высокий коэффициент интенсивности напряжений. Трещины А и В расположены вдоль растягивающих напряжений – коэффициент интенсивности напряжений приблизительно равен нулю. Ряд эллиптических дефектов может быть описан одной эллиптической трещиной с длиной более 60 мм и глубиной 5 мм . Поправочная функция приблизительно равна 1.12 . Кроме того, здесь имеется концентрация напряжений. Такой же дефект D имеет меньшую глубину. **Правильный ответ С.**

26. Правильный ответ С.

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}, K_I = \sigma_n \sqrt{\pi a}, \sigma_y = \frac{\sigma_n \sqrt{\pi a}}{\sqrt{2\pi r}} = \sigma_n \sqrt{\frac{a}{2r}} = 100 \cdot \sqrt{\frac{0.008}{2 \cdot 0.001}} = 100 \cdot \sqrt{4} = 200\text{ МПа}$$

27. А. – 100 МПа *Неверно*. Это единица измерения напряжения. В. – $100\text{ МПа м}^{1/2}$. *Верно*. С. – $99\text{ кгс см}^{1/2}$. *Неверно*. D. – $111\text{ КН/м}^{1/2}$. *Неверно*. E. – 200 ГПа . *Неверно*. Это единицы измерения напряжения. F. – $1000\text{ Па м}^{1/2}$. *Верно*. $1000\text{ Па м}^{1/2} = 0.001\text{ МПа м}^{1/2}$. **Правильный ответ В.**

28. Коэффициент интенсивности напряжений (КИН): А. – *Неверно* – КИН меньше, чем в случаях С, D ($5 < 10$); В. – *Неверно* – КИН меньше, чем в случаях С или D, которые имеют одинаковую длину $a = 10$ и большую поправочную функцию $F_I = 1.12$. Сложная форма трещины не увеличивает КИН; С. – *Неверно*. Полуэллиптическая трещина с большей шириной ($c = 20$ в варианте D) имеет большую поправочную функцию; D. – *Верно*. Поправочная функция максимальна для этого варианта. **Правильный ответ D.**

29. Коррозионная раковина и царапина не самые опасные дефекты. Самый большой коэффициент интенсивности напряжений имеет полуэллиптическая трещина, которая расположена перпендикулярно максимальным растягивающим напряжениям – дефект С. **Правильный ответ С.**

30. Площадь поперечного сечения (ширина * толщина): $A_A = 4 A_B = 16 A_C$. Номинальные напряжения (сила/площадь): $S_A = S_B = S_C$. Коэффициент интенсивности напряжений: напряжение * (r * длина трещины)^{1/2}: $K_I(A) = 2 K_I(C)$. Коэффициент интенсивности напряжений самый большой в случае А. **Правильный ответ А.**

31. А. Неверно. Это – упругое распределение напряжений. В. Верно. Это – распределение напряжений для толстой стальной пластины. С. Неверно. Это – распределение напряжений для тонкой пластины из идеально пластического материала. D. Неверно. Это – распределение напряжений при большой их концентрации. **Правильный ответ В.**

32. А. Неверно. Это неправильная форма пластической области для растяжения. В. Верно. Это – типичная форма пластической области при чистом сдвиге. С. Неверно. Форма пластической зоны при сжатии занимает все сечение. D. Неверно. Формы области при растяжении и изгибе подобны. **Правильный ответ В.**

33. Наибольшие напряжения при растяжении возникают в точках С, D. В точке С напряжение равно пределу текучести. В точке D напряжение самое высокое. **Правильный ответ D.**

34. Правильный ответ С.

$$2a_e = 2a + r_y = 2a + \left(\frac{\sigma_n}{\sigma_{ys}}\right)^2 a = 20 + \left(\frac{200}{400}\right)^2 \cdot 10 = 22,5 \text{ mm}$$

35. Интенсивность напряжений увеличивается по крайней мере в 2 раза, с 19.5 МПа м^{1/2} до 39 МПа м^{1/2}. Пластическая зона в вершине трещины увеличивается вместе с напряжением. Увеличение размера трещины увеличивает величину интенсивности напряжений. КИН больше чем 39 МПа м^{1/2}. **Правильный ответ D.**

36. Вид фронта трещины зависит от интенсивности напряжения перед трещиной. Интенсивность напряжений выше в центре толстого стального образца. Трещина будет расти быстрее там. **Правильный ответ В.**

37. Пластическая зона в вершине трещины не достигает точки А. «Пластический шарнир» является типичным примером пластической зоны под изгибом. **Правильный ответ С.**

38. А. Верно. Такая концентрация напряжений характерна для упругопластического материала. В. Неверно. Эта эпюра не отражает влияния пластической зоны. С. Неверно. Эта эпюра не отражает

присутствие трещины. D. *Неверно*. Эта эпюра не отражает наличие трещин. **Правильный ответ А.**

39. Номинальное напряжение равно 400 МПа. Это больше предела текучести. Пластическая зона наиболее правильно показана в случае В. **Правильный ответ В.**

40. А. *Неверно*. Увеличение длины трещины увеличивает размер пластической зоны в вершине трещины. В. *Неверно*. Увеличение номинального напряжения увеличивает размер пластической зоны в вершине трещины. С. Верно. Увеличение предела текучести уменьшает этот размер. D. *Неверно*. Увеличение предела прочности не влияет на этот размер. **Правильный ответ С.**

41. Увеличение давления от 1.2 до 2.0 МПа увеличивает номинальное напряжение и коэффициент интенсивности напряжений более чем в 1.5 раза. Это означает, что коэффициент интенсивности напряжений превышает сопротивление росту трещины: $40 * 1.5 = 60 > 57$ МПа м^{1/2}. **Правильный ответ В.**

42. Имеется только одна точка, которая находится выше кривой $K_{IC} = 50$ МПа м^{1/2} – точка С 200 МПа – 40 мм. **Правильный ответ С.**

43. А. *Неверно*. Это образец для испытания на прочность. В. *Неверно*. Это образец типа Шарпи. С. Верно. Это образец для трех точечного изгиба на трещиностойкость. D. *Неверно*. Это не образец, это болт. **Правильный ответ С.**

44. Трещина с самым высоким коэффициентом интенсивности напряжений стартует первой, или другими словами, трещина с самым высоким напряжением*(длина трещины)^{1/2}: А: $2 * (25)^{1/2} = 10$, В: $20 * (9)^{1/2} = 60$, С: $50 * (4)^{1/2} = 100$. Верно. D: $100 * (0.81)^{1/2} = 90$. **Правильный ответ С.**

45. А. Верно. Коэффициент интенсивности напряжений для деформированной зоны равен $K_I = F_I \sigma (\pi a)^{1/2} = 1.12 * 1.68 > 1.7$ МПа. Значение больше чем трещиностойкость стекла. Лист разрушается в точке А. В. *Неверно* Номинальное напряжение 40 МПа – меньше чем предел прочности материала. С. *Неверно*. **Правильный ответ А.**

46. Материал с самым высоким сопротивлением хрупкому разрушению имеет наиболее высокую трещиностойкость K_{IC} . **Правильный ответ С.**

47. Примерные значения запаса прочности равны: А. $60 / 30 = 2$. В. $25 / 20 = 1.25$. С. $55 / 30 = 1.8$. D. $76 / 40 = 1.9$. Е. $40 / 10 = 4$. В случае В запас прочности наименьший. **Правильный ответ В.**

48. Максимальный коэффициент интенсивности напряжений для обнаруженного дефекта: $K_I = 1.12 \cdot \sigma \cdot (\pi a)^{1/2} = 1.12 \cdot 400 \cdot (\pi \cdot 0.002)^{1/2} = 35.5 \text{ МПа м}^{1/2}$. А. *Неверно*. Изделие может быть разрушено до обнаружения дефекта. В. Верно. Это лучшая комбинация сопротивления хрупкому разрушению и цены. С. *Неверно*. Это дорогой материал. **Правильный ответ В.**

49. Максимальная сила 0.5 МН. Максимальное значение коэффициента интенсивности напряжений и сопротивления материала равно $5 \cdot 12.5 = 62.5 \text{ МПа м}^{1/2}$. **Правильный ответ С.**

50. А. *Неверно*. Дорогой метод. В. Верно. Лучшая комбинация высокого разрешения и цены. С. *Неверно*. Разрешение не достаточно, чтобы обнаружить дефект с глубиной 2.5 мм. D. *Неверно*. Разрешение не достаточно, чтобы обнаружить дефект с глубиной 2.5 мм. **Правильный ответ В.**

51. А. *Неверно*. Кривая типична для углеродистой стали. В. *Неверно*. Линия не учитывает влияния температуры. С. Верно. Стекло хрупкое в этом диапазоне температуры. D. *Неверно*. Трещиностойкость не уменьшается так сильно при большой температуре. **Правильный ответ С.**

52. А. *Неверно*. Трещиностойкость не может увеличиваться при высоких скоростях деформации. В. *Неверно*. Линия не учитывает скорости роста трещины. С. Верно. Трещиностойкость уменьшается до K_{ID} . D. *Неверно*. Трещиностойкость не может быть равна нулю. **Правильный ответ С.**

53. А. *Неверно*. Жесткость образца уменьшается «быстрее» чем увеличивается $(\text{размер трещины})^{1/2}$ – интенсивность напряжений становится меньше с большим размером трещины. В. **Верно**. Уменьшение коэффициента интенсивности напряжения приводит к остановке трещины. С. *Неверно*. Процесс и параметры не имеют существенных изменений с острыми углами на кривой. D. *Неверно*. Жесткость образца уменьшается «быстрее» чем увеличивается $(\text{размер трещины})^{1/2}$ – интенсивность напряжений уменьшается. **Правильный ответ В.**

54. Низкая температура «делает» металл хрупким. Низкая температура уменьшает податливость. В зимние дни труднее остановить бегущую трещину. **Правильный ответ С.**

55. А. *Неверно.* Пересечение трещин не типично для макротрещины. В. *Неверно.* Это типично для некоторых многослойных композитов. С. Верно. Угол 15° типичен для материала. D. *Неверно.* Материал не идеален и не имеет никакой симметрии в реальных материалах. **Правильный ответ С.**

56. А. Верно. Кривая типична для углеродистой стали. *Неверно.* Линия не учитывает влияния температуры. С. *Неверно.* Параметр не изменяется существенно. D. *Неверно.* Трещиностойкость не уменьшается так резко при большой температуре. **Правильный ответ А.**

57. Время пропорционально разнице напряжений между двумя точками. Разница больше в случае В. **Правильный ответ В.**

58. Быстрое охлаждение приводит к растягивающим напряжениям на внешней поверхности и сжимающим напряжениям на внутренней поверхности. В изогнутой трубе напряжение по оси z меньше чем касательное. Дефект А перпендикулярен к максимальному растягивающему напряжению. Тем не менее, внутренние дефекты чаще встречаются в таких конструкциях. **Правильный ответ А.**

59. Различные температуры на концах образца вызывают различную вязкость материала. Вязкость увеличивается с повышением температуры. Скорость трещины выше в хрупком материале, точка А. **Правильный ответ А.**

60. А. 4 секунды. *Неверно.* Это время соответствует теоретической скорости 5 км / секунду. В. 20 секунд. Верно. Это время соответствует фактической скорости в стали, 1 км / секунду. С. 2 минуты. *Неверно.* За это время давление в трубе упадет. D. 20 минут. *Неверно.* За это время давление в трубе упадет. **Правильный ответ В.**

61. Высокая трещиностойкость K_{IC} соответствует более высокой вязкости. Образец А демонстрирует это свойство наиболее ярко. **Правильный ответ А.**

62. Дефекты не несут нагрузку – они могут рассматриваться как трещины. Кривые трещиностойкости вогнутые. **Правильный ответ С.**

63. А. *Неверно*. Тонкие образцы обычно демонстрируют высокую трещиностойкость. В. Верно. После уменьшения, параметр становится устойчивым. С. *Неверно*. Трещиностойкость зависит от толщины. D. *Неверно*. Трещиностойкость не может уменьшаться до нуля. **Правильный ответ В.**

64. Кроме температуры (Е) все факторы уменьшают крутизну излома углеродистых сталей. **Правильный ответ Е.**

65. Все соотношения кроме D находятся ниже экспериментальной кривой. Случай D не допустим: $450 \text{ МПа} - 0.5 \text{ мм}$. Напряжение превышает предел прочности. **Правильный ответ D.**

66. Образец с большей толщиной дает более надежную оценку сопротивления развитию трещины. Лучше использовать образец с похожей схемой нагружения и большой толщиной – образец С. **Правильный ответ С.**

67. У опытного образца и сосуда различные времена инициирования усталостной трещины и её роста, различные сопротивления росту трещины и сценарии разрушения. Невозможно использовать циклическую долговечность опытного образца для оценки этого параметра у десятикратно увеличенного объекта. **Правильный ответ D.**

68. Более консервативная оценка данной характеристики будет получена при испытании образца с большей толщиной и площадью поперечного сечения. Первый параметр (толщина) более важен. **Правильный ответ С.**

69. Трещиностойкость выше для малой площади поперечного сечения. В случае А имеется множество «крошечных» составляющих с маленькими площадями поперечного сечения. **Правильный ответ А.**

70. Усталостная трещина растет быстрее в направлении трещины из-за объемного напряженного состояния и меньшей трещиностойкости. Обычно, полуэллиптическая трещина в однородном материале быстрее растет в центре. **Правильный ответ В.**

71. А. Верно. Трещина имеет самый большой размер. В. *Неверно*. Коэффициент интенсивности напряжений меньше, чем для трещины А. С. *Неверно*. Проекция трещины на вертикальную ось $2.2 * \cos 45$ меньше, чем размер трещины А 2 мм. D. *Неверно*. Поперечный размер

меньше, чем размер в случае А. Е. *Неверно*. Проекция трещины на вертикальную ось равна 0. **Правильный ответ А.**

72. А. *Неверно*. Касательное напряжение мало для этого направления. В. *Неверно*. Это направление типично для хрупкого разрушения. С. Верно. Касательное напряжение максимально для этого направления. D. *Неверно*. Касательное напряжение мало для этого направления. **Правильный ответ С.**

73. Трещина стартует в направлении, перпендикулярном растягивающему напряжению. **Правильный ответ В.**

74. Берега трещины перемещаются относительно друг друга в плоскости. Сдвиг в плоскости – преобладающий тип нагружения в вершине трещины. **Правильный ответ В.**

75. Балка работает на изгиб. В вершине трещины имеются как сдвиг, так и растягивающее напряжение. Смешанный способ I+II. **Правильный ответ С.**

76. А. Верно. Основная схема нагружения в вершине трещины - сдвиг. Раскрытие трещины будет происходить перпендикулярно максимальным касательным напряжениям. Тип разрушения - отрыв. В. *Неверно*. Это направление подраста трещины типично для пластичных материалов. С. *Неверно*. Это направление не типично, оно проходит перпендикулярно сжимающим напряжениям. **Правильный ответ А.**

77. Дефекты А, В и D в вершинах трещины имеют главным образом касательное напряжение. В случае С в вершине трещины имеется растягивающее напряжение. Это наиболее опасный случай при хрупком разрушении. **Правильный ответ С.**

78. В вершине трещины способами деформации являются раскрытие и сдвиг. Верхний берег стремится переместиться наружу. **Правильный ответ D.**

79. Точки возникновения трещины находятся на линии, перпендикулярной максимальным (растягивающим) напряжениям: точки А, Е и С. Близлежащее к точке С отверстие увеличивает напряжение. Максимальное растягивающее напряжение будет в точке С, возникает усталостная трещина. **Правильный ответ С.**

80. Подрос трещины в хрупком материале происходит перпендикулярно максимальным тангенциальным (растягивающим) напряжениям. А. Верно. Напряжение максимально. В. *Неверно*. Это направление будет верно при отсутствии начальной трещины. С. *Неверно*. Это направление для максимального касательного напряжения. D. *Неверно*. Сжимающее напряжение максимально для этого направления. **Правильный ответ А.**

81. А. *Неверно*. Жесткие ребра обычно не уменьшают трещиностойкость. В. *Неверно*. Биметаллические стенки обычно не уменьшают трещиностойкость. С. *Неверно*. Исправления обычно увеличивают трещиностойкость. D. Верно. Закалка может уменьшить трещиностойкость. **Правильный ответ D.**

82. А. Верно. КИН увеличивается и «опускается» в продольной балке (стрингере). В. *Неверно*. Стрингер не может остановить увеличение КИН. С. *Неверно*. Обычная зависимость для неукрепленной конструкции. D. *Неверно*. КИН не может уменьшаться для увеличившейся в размерах трещины. **Правильный ответ А.**

83. Максимальные напряжения возникают в предельном концентраторе напряжений – в вершине трещины. **Правильный ответ С.**

84. А. *Неверно*. Размер трещины должен влиять на критическое напряжение. В. Верно. На кривой должны быть два пика критического напряжения, когда трещина достигает стрингеров. С. *Неверно*. Зависимость типична для листа без стрингеров. **Правильный ответ В.**

85. Межслойный дефект параллелен растягивающему напряжению, поэтому он не опасен. Среди двух полуэллиптических трещин самая опасная находится в более хрупком материале. **Правильный ответ А.**

86. Если K_{IC} меньше чем K_{IC} , то полуэллиптическая трещина может прорасти сквозь стенку и остановиться. Это условие требует низкого значения отношения K_{IC} / K_{IC} . **Правильный ответ А.**

87. А. *Неверно*. Сварные соединения – источник остаточных и тепловых трещин. В. Верно. Опыты показывают, что этот способ продлевает усталостную жизнь ротора. С. *Неверно*. Нет необходимости срезать так много металла. D. *Неверно*. Метод В продлевает усталостную жизнь конструкции. **Правильный ответ В.**

88. А. – *Неверно*. Жесткость алюминия в три раза ниже, чем стали. В. – *Неверно*. Сварное соединение – источник тепловых и остаточных напряжений. С. – *Неверно*. Трещиностойкость уменьшается для жестких материалов. D. – Верно. Упомянутые методы недостаточно увеличивают трещиностойкость конструкции. **Правильный ответ D.**

89. А. *Неверно*. Слои «раскалывают» трещину, но не останавливают ее. В. Верно. Слои являются препятствием на пути трещины. С. *Неверно*. Слои не влияют на трещину или уменьшают трещиностойкость. **Правильный ответ В.**

90. Максимальные напряжения возникают в предельном концентраторе, перпендикулярном растягивающим напряжениям. **Правильный ответ D.**

91. Вязкий излом (1) – общий с низкоуглеродистыми сталями, хрупкий излом (2) – типичный для высокопрочных материалов таких, как инструментальные стали, а межслоевое расщепление типично для однонаправленных композитов 3. **Правильный ответ D.**

92. А. *Неверно*. Коррозия – процесс, происходящий в течение длительного времени. В. *Неверно*. Резервуар был не полностью наполнен. С. Верно. Высокая разность температур. Вязкость разрушения уменьшаются при отрицательных температурах. D. *Неверно*. Усталость – процесс, происходящий в течение длительного времени. **Правильный ответ С.**

93. А. *Неверно*. Кривая не показывает влияния отверстия. Зависимость типична для пластины с отверстиями. В. Верно. Трещина ускоряется, когда движется к отверстию и замедляется в отверстии. С. *Неверно*. Нет инициирования новых трещин из отверстия в течение длительного периода времени. **Правильный ответ В.**

94. Пример: алюминиевый сплав 7079-T651 (толщина 45 мм)
 $K_{IC} = 29.7 \text{ МПа м}^{1/2} \text{ (L-T)}$. Относительная трещиностойкость:
L - T: 100 %; T - L: 80 %; S - T: 55 %. **Правильный ответ А.**

95. Круглая трещина перпендикулярная растягивающей силе. Максимальный размер в плоскости 4мм. **Правильный ответ В.**

96. А. *Неверно*. Дефекты параллельны рентген лучам. В. Верно. Изменение частоты отражает изменение в конструкции. С. *Неверно*. Дефекты не создают больших изменений в параметре. D. *Неверно*.

Дефекты не создают больших изменений в прогибе ротора.
Правильный ответ В.

97. А. *Неверно*. Поверхность разрушения проходит в основном по отливке. В. Верно. Дефекты в поле растягивающих напряжений. С. *Неверно*. Предельные растягивающие напряжения ниже, чем в случае В. D. *Неверно*. Дефект был захвачен на финальной стадии аварии.
Правильный ответ В.

98. А. *Неверно*. Сварной шов не разрушен. В. Верно. Здесь лучше использовать непрерывный сварной шов. С. *Неверно*. Нет явных внутренних дефектов.
Правильный ответ В.

99. Все точки под кривой С безопасны.
Правильный ответ С.

100. Усталостная трещина растет пропорционально с интенсивностью напряжений. А. Коэффициент концентрации напряжений = 3. $K_I = 100 * 3 * (\pi * 0.001)^{1/2} = 100 * (\pi * 0.009)^{1/2}$. В. Действительный размер трещины равен сумме диаметра и размера трещины: $K_I = 100 * (\pi * (0.01+0.01)/2)^{1/2} = 100 * (\pi * 0.01)^{1/2}$. С. $K_I = 100 * (\pi * 0.005)^{1/2}$. Трещина растет быстрее в случае В.
Правильный ответ В.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Смирнов, А. Ф. Сопротивление материалов / А. Ф. Смирнов. – Москва : Высшая школа, 1975. – 479 с.
2. Феодосьев, В. И. Сопротивление материалов / В. И. Феодосьев. – Москва : Наука, 1996. – 560 с.
3. Рузга, З. Электрические тензометры сопротивления / З. Рузга. – Москва : Госэнергоиздат, 1961. – 335 с.
4. Лабораторный практикум по сопротивлению материалов : учеб. пособие / Н. Н. Черноусов [и др.]. – Липецк : Изд-во ЛГТУ, 2016. – 114 с.
5. Черноусов, Н. Н. Механика разрушения. Ч.1. Механика разрушения металлов : лабораторный практикум / Н. Н. Черноусов, Р. Н. Черноусов. – Липецк : Изд-во ЛГТУ, 2017. – 132 с.
6. Черноусов, Н. Н. Механика разрушения. Ч.2. Механика разрушения композиционных материалов : лабораторный практикум / Н. Н. Черноусов, Р. Н. Черноусов. – Липецк : Изд-во ЛГТУ, 2018. – 89 с.
7. Херцберг, Р. В. Деформация и механика разрушения конструкционных материалов / Р. В. Херцберг. – Москва : Металлургия, 1989. – 576 с.
8. Панасюк, В. В. Механика разрушения и прочность материалов: справочное пособие / В. В. Панасюк. – Киев : Наукова думка, 1988–1990. – 620 с.
9. Броек, Д. Основы механики разрушения / Д. Броек. – Москва : Высшая школа, 1980. – 368 с.
10. Партон, В. З. Механика упругопластического разрушения: Основы механики разрушения : учеб. пособие / В. З. Партон, Е. М. Морозов. – Москва : Издательство ЛКИ, 2008. – 352 с.
11. ГОСТ 25.506-85. Методы механических испытаний металлов; введ. 1986-01-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1986. – 142 с.
12. Терентьев, В. Ф. Циклическая прочность металлических материалов : учеб. пособие / В. Ф. Терентьев, А. А. Оксогоев. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2001. – 61 с.
13. Пестриков, В. М. Механика разрушения на базе компьютерных технологий. Практикум / В. М. Пестриков, Е. М. Морозов. – Санкт-Петербург, 2007. – 464 с.
14. Пестриков, В. М. Механика разрушения : курс лекций / В. М. Пестриков, Е. М. Морозов. – Санкт-Петербург, изд-во ЦОП «Профессия», 2012. – 552 с.
15. ГОСТ 29167-91. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении; введ. 1992-07-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1992. – 17 с.

16. СТО НОСТРОЙ 2.27.125-2013. Конструкция транспортных тоннелей из фибробетона. Правила проектирования и производства работ; введ. 2013-12-13. – Москва : Изд-во Национальное объединение строителей, 2013.– 105 с.

Витебский государственный технологический университет

Учебное издание

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ

Практикум для лабораторных и практических занятий

Составители:

Сакевич Валерий Николаевич
Федосеев Гелий Николаевич

Редактор *Т.А. Осипова*
Корректор *А.В. Пухальская*
Компьютерная верстка *Сакевич В.Н.*

Подписано к печати 20.02.2020. Формат 60x90¹/₁₆. Усл. печ. листов 11,0.
Уч.-изд. листов 10,6. Тираж 30 экз. Заказ № 62.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.