

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА (НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ)» (СГАУ)

Ю.Л. Тарасов

Конструкционная прочность
Конспект лекций

направление

151600.68 Прикладная механика

магистерская программа

"Прочность конструкций летательных аппаратов"

Самара 2013

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

1 ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ

1.1 Направления обеспечения конструкционной прочности

1.2. Экспериментальное изучение свойств материалов. Диаграмма растяжения

1.3. Диаграммы растяжения (сжатия) материалов и их схематизация

1.4 Влияние эксплуатационных и технологических факторов на свойства материалов

1.4.1 Влияние скорости деформации $\dot{\epsilon}$

1.4.2 Радиоактивное облучение

1.4.3 Влияние термообработки

1.4.4 Влияние температуры

1.4.5 Влияние коррозии

1.5. Пластичность и хрупкость. Твердость

1.6 Несущие свойства элементов конструкции при нагреве

2 ПРОЧНОСТЬ ПРИ ОДНОКРАТНЫХ НАГРУЖЕНИЯХ

2.1 Расчет по допускаемым напряжениям

3 ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ

3.1 Усталостное разрушение материала и его причины

3.2. Характеристики циклов напряжений

3.3 Кривые усталости. Предел выносливости

3.4 Диаграмма предельных амплитуд

3.5 Факторы, влияющие на усталостную прочность материала

3.5.1 Концентрация напряжений

3.5.2 Масштабный фактор

3.5.3 Качество поверхности

3.5.4 Внешняя среда

3.6 Коэффициент запаса при циклическом нагружении

3.7 Усталостная прочность при нестационарных нагружениях

3.8 Малоцикловая усталость

3.8.1 Зависимость между напряжениями и деформациями при малоцикловой усталости

3.8.2 Оценка долговечности элементов конструкций, работающих в условиях малоцикловой усталости

4 МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КОНСТРУКТИВНОЙ НАДЕЖНОСТИ

4.1 Подходы к оценке прочности конструкций

4.2 Связь коэффициента безопасности с показателями уровня прочностной надежности (вероятности безотказной работы)

5 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПРОЧНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

5.1. Концентрация напряжений и деформаций в элементах конструкции машин

5.2 Технологические методы повышения долговечности, надежности и ресурса

5.2.1 Остаточные напряжения

5.2.2 Упрочнение деталей машин поверхностным пластическим деформированием

6 ПУТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

6.1 Выбор материала для конструкции по критериям механики разрушения. Диаграммы сравнительного анализа

6.2 Использование механики разрушения при проектировании и расчете конструкции. Определение критических размеров дефектов и установление условий нестабильного роста трещин

6.3 Определение запаса прочности конструкций по критическим размерам трещины, по числу циклов (или длительности) нагружения

6.4 Прогнозирование срока службы конструкций

6.5 Прогнозирование разрушения цилиндров, нагружаемых внутренним давлением

6.6 Обеспечение надежности конструкции пробного испытания

6.7 Анализ аварийных разрушений методами механики разрушения

6.8 Корреляция вязкости разрушения с другими механическими свойствами

6.9 Основные способы повышения вязкости разрушения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

Реализация прогресса в технике сопровождается формированием рабочих процессов, повышением уровня напряжений в элементах конструкций при одновременном повышении требований к обеспечению надежности и ресурса создаваемых изделий.

Выполнение растущих требований к ресурсу и надежности может быть достигнуто за счет разработки оптимальных конструкций, устранения избыточных запасов прочности, максимального использования возможностей материалов и технологий.

Обеспечение высокой и стабильной конструкционной прочности – одно из направлений решения проблемы.

1 ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ

1.1 Направления обеспечения конструкционной прочности

Под конструкционной прочностью понимается прочность деталей, элементов конструкций в реальных условиях эксплуатации с учетом металлургических и конструктивно-технологических факторов. Структурная схема обеспечения конструкционной прочности приведена на рисунке 1.1.

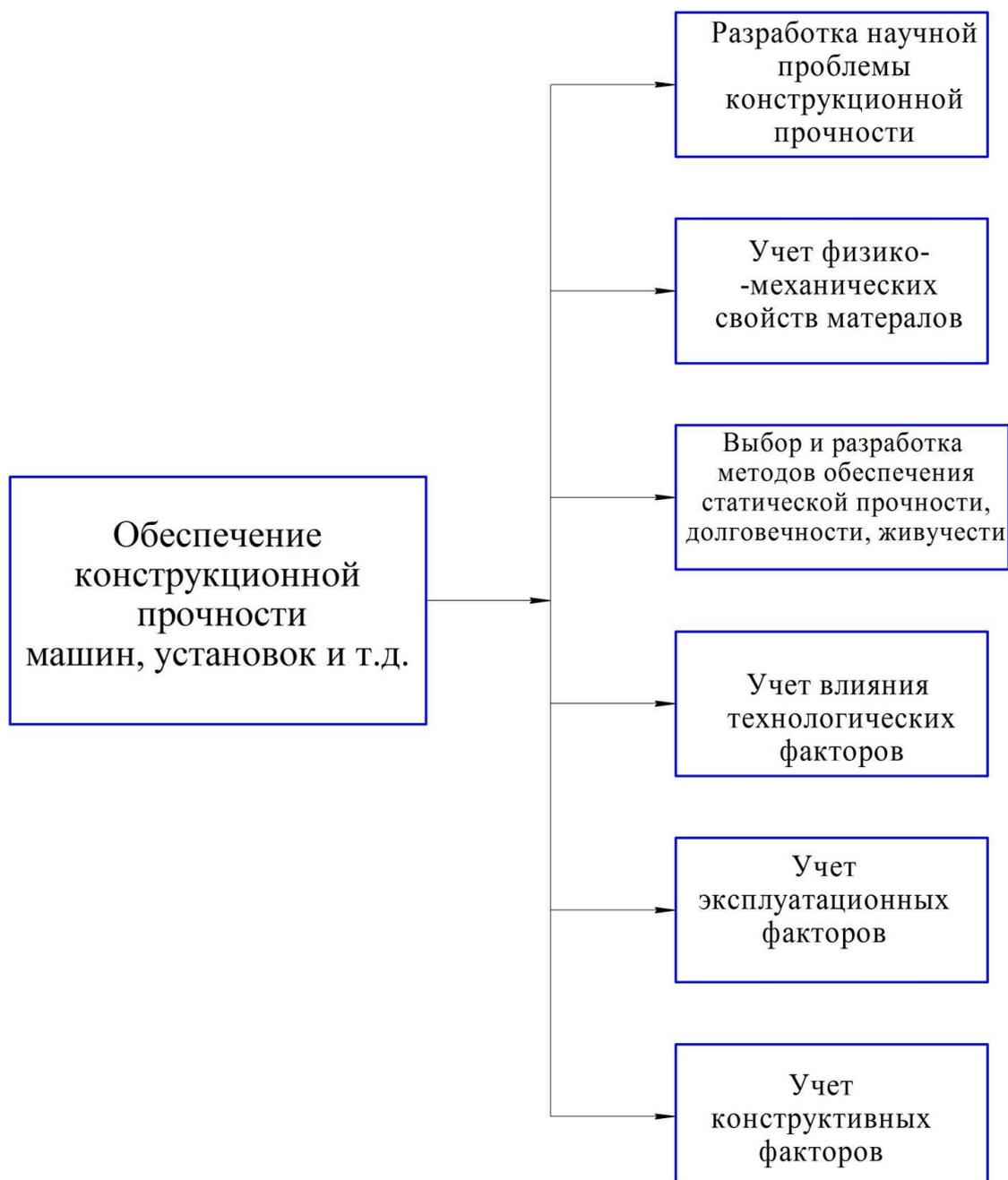


Рисунок 1.1 – Структурная схема обеспечения конструкционной прочности

Для обеспечения конструкционной прочности необходимо эту научную проблему решать применительно к различным объектам машиностроения - самолетам, ракетно-космической технике, энергетическим установкам (реакторы, турбины), нефте-химическим перерабатывающим установкам, морской надводной и подводной техники, нефтегазовым трубопроводам и т.д.

Решение этой научной проблемы начинается с учета свойств материалов. Материалы могут быть высокопрочными, но склонными к крупному разрушению, они могут обладать свойствами достаточной пластичности, вязкости, но иметь низкую прочность. Материалы по-разному переносят тепловые воздействия, могут иметь различные характеристики коррозионной стойкости.

Выбор методов расчета по обеспечению прочности, долговечности, жесткости, живучести занимает важное место в решении проблемы прочности.

В настоящее время существуют достаточно обоснованные, дающие высокую точность методы расчета. Аналитические методы расчета тонкостенных конструкций, основанные на моментной теории оболочек, безмоментной (балочной) теории. Созданы численные методы – МКЭ, методы интегрирующих матриц и т.д. На основе МКЭ созданы программные комплексы NASTRAN, ANSYS, AUTOPIPE и т.д.

Методы расчета живучести, долговечности позволяют оценить накопление повреждений, рост повреждений металлургических, технологических, усталостных. При решении проблемы необходимо учитывать технологические факторы, зависящие от технологических способов получения деталей элементов конструкции таких, как сварка, штамповка, механическая обработка, термообработка. При производстве элементов конструкций меняются физико-механические свойства материала, появляются остаточные напряжения и т.д.

Обеспечение конструкционной прочности приводит к необходимости учета эксплуатационных факторов. Это виды нагрузок – распределенные и сосредоточенные, статические и меняющиеся во времени – динамические, повторно статические, ударные. Это и воздействия температурных факторов, коррозионной среды, водородной среды, радиационных факторов, усталостных повреждений.

Учет повреждений металлургических, технологических и усталостных очень важен. Например, в гражданской авиации реализуется принцип эксплуатации воздушных судов – «безопасное разрушение». В этом случае необходим контроль состояния основных систем элементов, мониторинг повреждений. Введено понятие о регламентированных повреждениях. Вид этих повреждений представлен на рисунке 1.2.

Важное место в решении проблемы занимает учет конструкционных факторов. Силовые схемы конструкций состоят из различных элементов – стержней, балок, валов, тонкостенных пластин, оболочек. Эти элементы могут иметь вырезы, подкрепления, концентраторы и т.д.

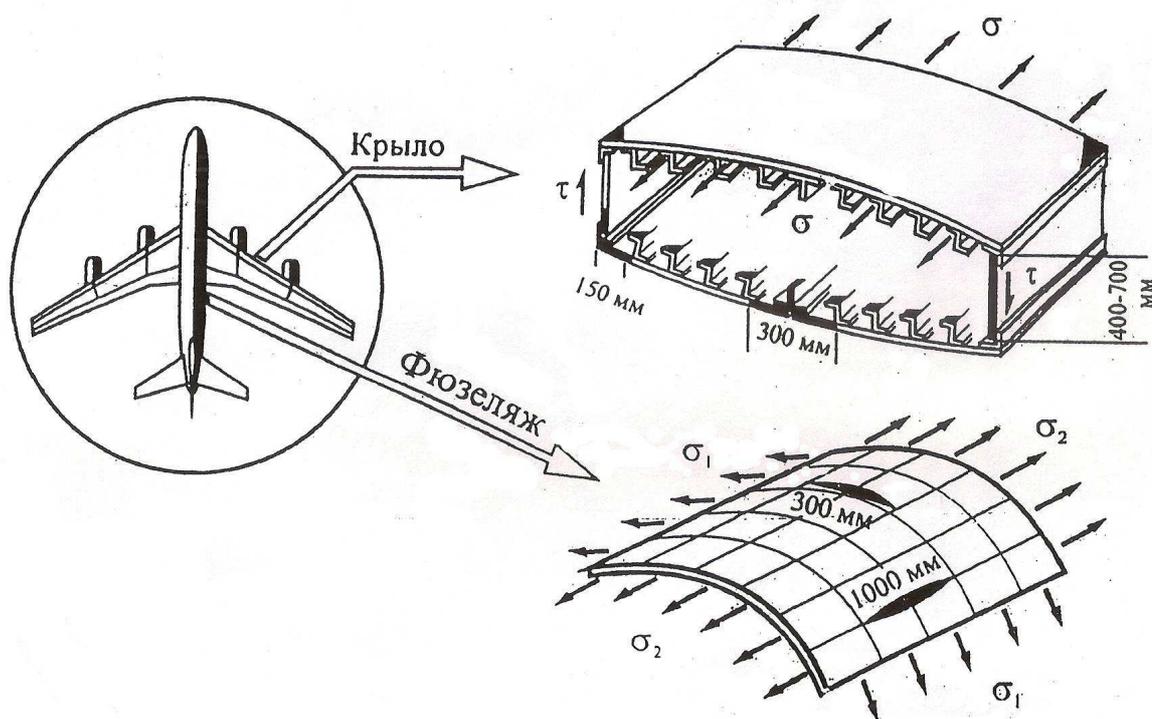


Рисунок 1.2 – Регламентированные повреждения крыла и фюзеляжа

На рисунке 1.3 приведен перечень и объем прочностных дефектов и недостатков в опытных изделиях. Их объем в общей системе отказов составляет 61,04%.

Это те отказы, дефекты и недостатки опытного изделия, которые устранялись в процессе доводки изделий. Эти данные приведены по материалам СНТК имени Н.Д. Кузнецова.

В заключение этого раздела приведем данные по содержанию работы по обеспечению прочности и безопасности конструкций современных самолетов. Эти работы занимают важное место среди общего перечня работы по этапам создания самолета.

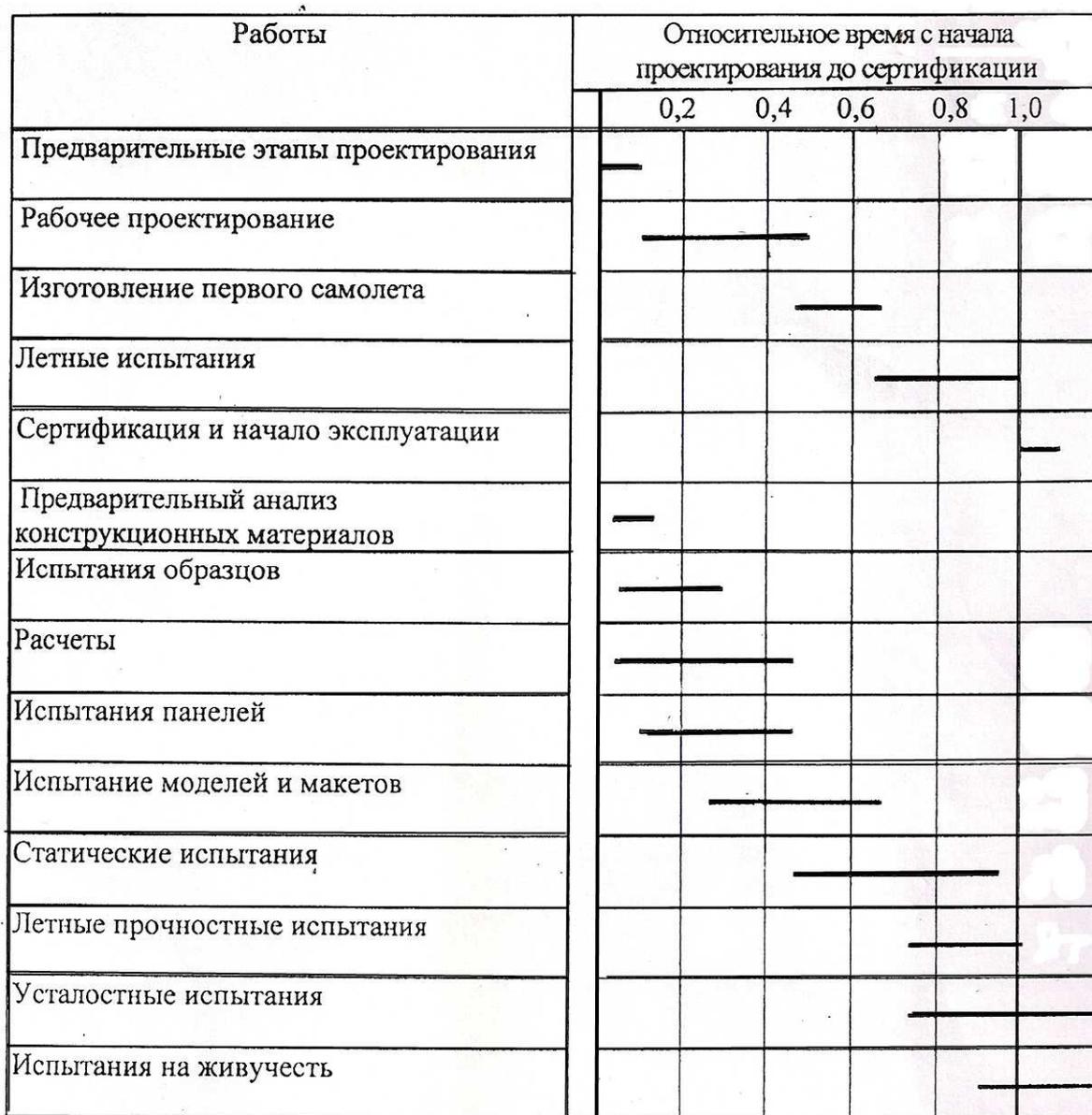


Рисунок 1.3 – Отказы, дефекты и недостатки опытного изделия, устраненные в процессе доводки (по материалам СНТК им. Н.Д. Кузнецова)

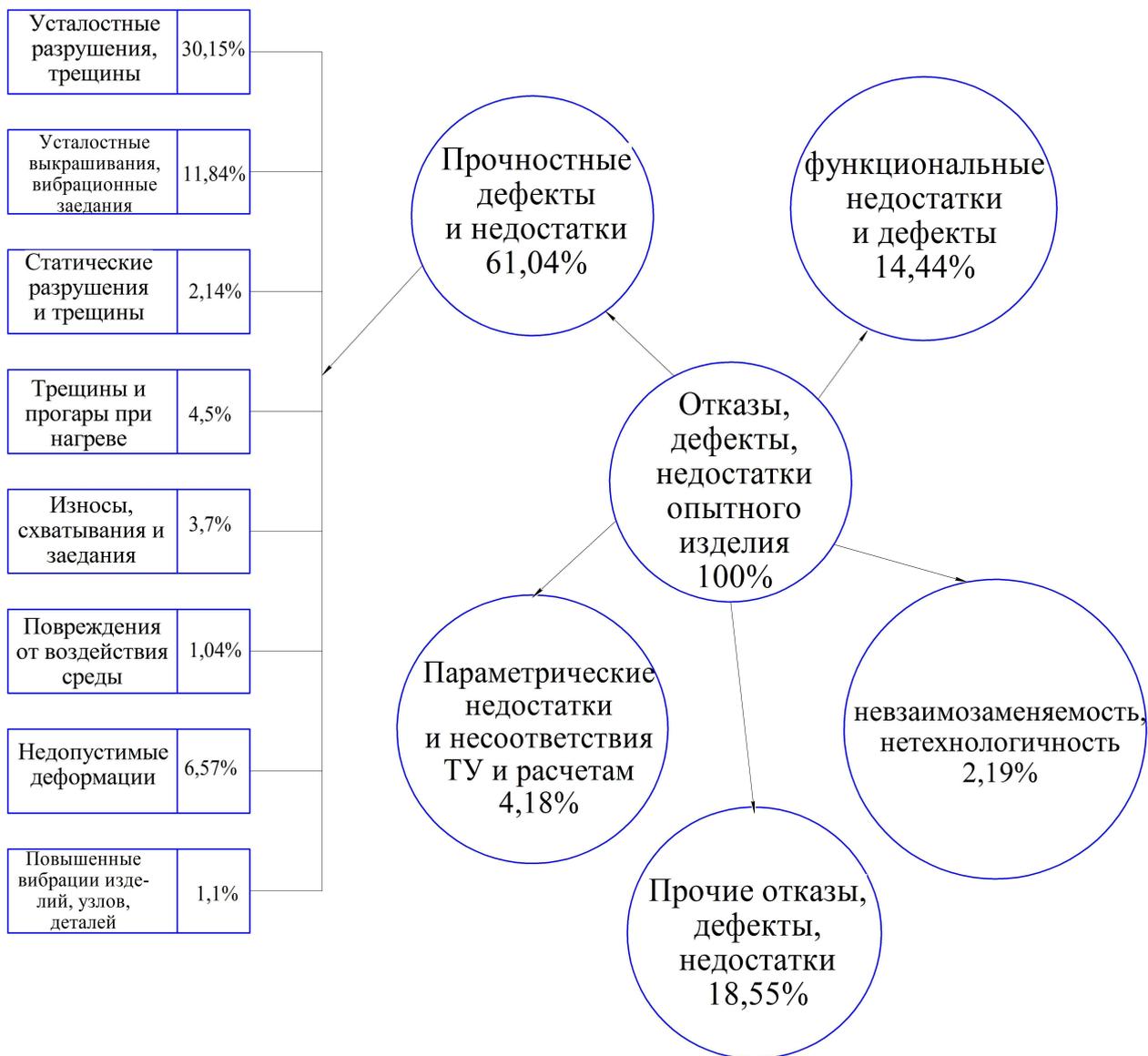


Рисунок 1.4 – Объем работы по обеспечению прочности конструкции самолета

Работы по обеспечению прочности конструкции ведутся от начала разработки проекта летательного аппарата до его списания. Эта система позволяет поддерживать высокий уровень безопасности летательного аппарата в течение всего срока его эксплуатации.

1.2. Экспериментальное изучение свойств материалов. Диаграмма растяжения

Для удовлетворения требований, предъявляемых к элементам конструкций, необходимо знать свойства материалов, из которых они изготавливаются.

Механические свойства материалов исследуются при испытании их под нагрузкой. Наиболее распространенным испытанием материалов является испытание на растяжение. Результаты этих испытаний позволяют достаточно верно судить о поведении материалов при сжатии, кручении, изгибе.

Поведение материала при растяжении исследуется экспериментально и представляется в виде диаграммы растяжения материала, которая устанавливает зависимость между растягивающей нагрузкой, действующей на образец, и получающимся удлинением образца. Диаграмма в координатах $P, \Delta l$ будет зависеть от размеров образца. Для того, чтобы диаграммы не зависели от размеров образцов и были сравнимы для различных материалов, на оси ординат откладываются не силы P , а напряжения, равные

$$\sigma = \frac{P}{F_0} \quad (1.1)$$

где F_0 – первоначальная площадь поперечного сечения.

По оси абсцисс откладываются соответствующие напряжениям относительные удлинения ε (рисунок 1.5).

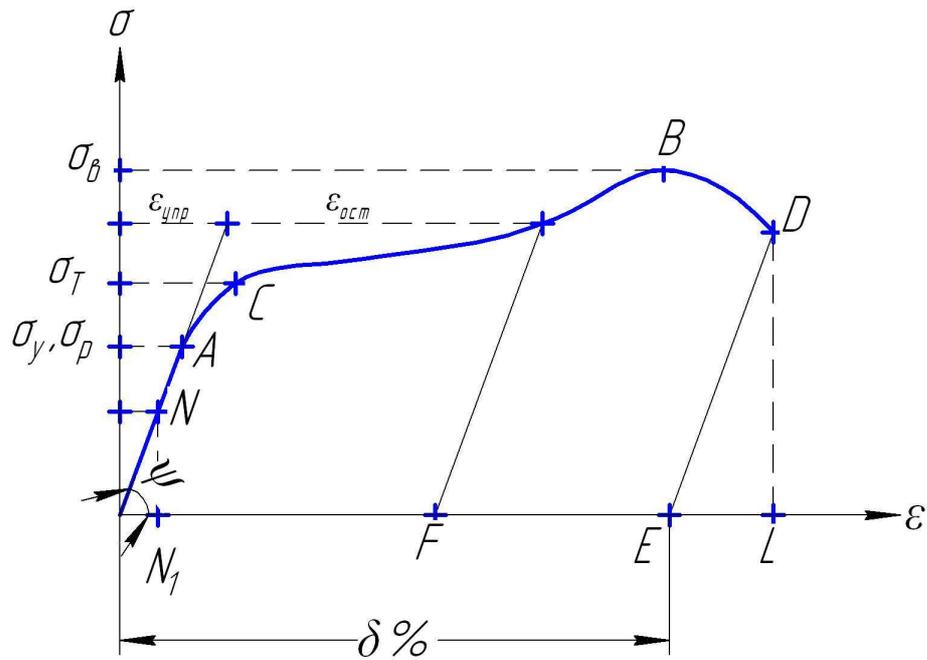


Рисунок 1.5 – Вид диаграммы σ - ε

Отметим на диаграмме характерные точки и дадим определения соответствующих им числовых величин.

Точке А соответствует наибольшее напряжение, до которого материал следует закону Гука, называемое пределом пропорциональности (σ_n). На участке ОА имеет место зависимость $\sigma = E\varepsilon$ и $\operatorname{tg}\phi = \frac{\sigma}{\varepsilon}$.

Следующей важной характеристикой является предел текучести. Это напряжение, при котором происходит рост деформации без заметного увеличения нагрузки.

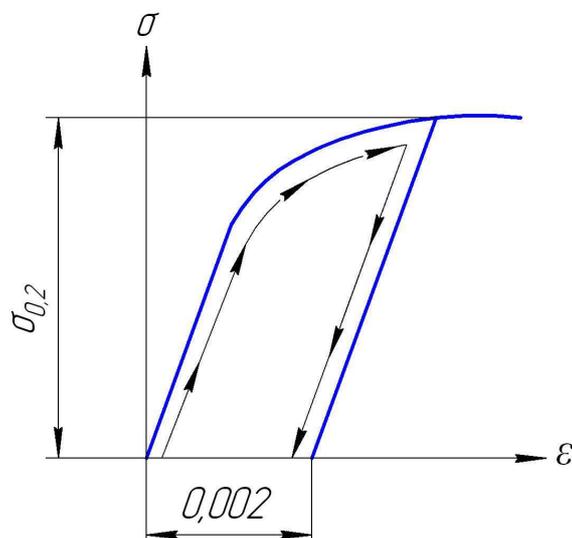


Рисунок 1.6 – Схема определения условного предела текучести

В тех случаях, когда отсутствует на диаграмме явно выраженная площадка текучести, то за предел текучести принимается условная величина напряжений при которой величина деформации $\varepsilon_{ост}=0,002$ или 0,2%. Условный предел текучести обозначается $\sigma_{0,2}$ (рисунок 1.6).

Отношение максимальной силы, которую способен выдержать образец, к его начальной площади поперечного сечения носит название предела прочности, или временного сопротивления σ_B .

При испытании на растяжение определяется ещё одна характеристика материала. Это – так называемое удлинение при разрыве $\delta\%$. Удлинение при разрыве представляет величину средней остаточной деформации к моменту разрыва на определенной стандартной длине образца. Удлинение при разрыве будет следующим:

$$\delta\% = \frac{\Delta l_0}{l_0} 100\% \quad (1.2)$$

здесь $\Delta l_0 = l_k - l_0$.

В таблице 1.1 представлены основные механические характеристики некоторых конструкционных материалов. Эти характеристики дают представления о таких свойствах этих материалов, как прочность, пластичность.

Таблица 1.1 – Основные механические характеристики конструкционных материалов

материал	МПа				$\delta\%$
	E	σ_{mp}	σ_B	σ_{mc}	
Сталь 45 Незакаленная	$2 \cdot 10^5$	370	620	370	24
Сталь 45 закаленная	$2 \cdot 10^5$	1040	1080	970	13
Сталь 30ХГСА закаленная	$2 \cdot 10^5$	1400	1620	1400	10
Титан технический	$1,1 \cdot 10^5$	520	600	520	23
Бронза	$1,2 \cdot 10^5$	110	136	110	7,5
Дюраль	$0,75 \cdot 10^5$	340	540	340	13

1.3. Диаграммы растяжения (сжатия) материалов и их схематизация

На рисунке 1.7 представлены диаграммы 1 и 2.

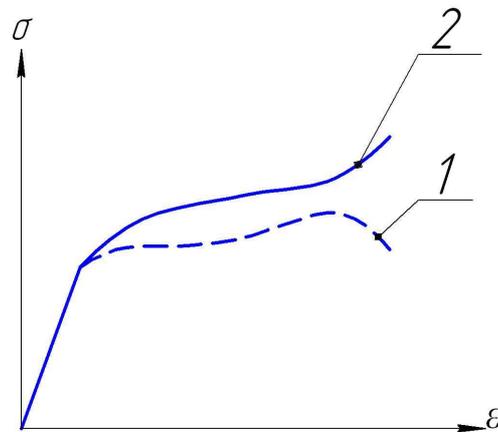


Рисунок 1.7 – Диаграмма условных и истинных напряжений

1 – диаграмма условных напряжений (усилие, деленное на начальную площадь поперечных сечений);

2 – диаграмма истинных напряжений (усилие, деленное на фактическую площадь сечения в данный момент времени).

Рассмотрим некоторые аппроксимации диаграмм $\sigma(\epsilon)$. Рассмотрим диаграммы OM и OM_1 на рисунке 1.8.

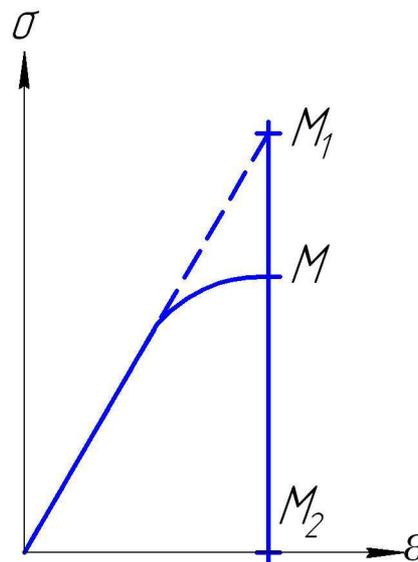


Рисунок 1.8 – Схематизация диаграммы

Ордината $M_2M_1 = E\epsilon$ представляет собой напряжения, соответствующее идеально упругому материалу, а MM_1 – та часть

напряжения, на которую оно понижается за счет пластических свойств материала.

Пусть
$$MM_1 = E\varepsilon \cdot \omega(\varepsilon), \quad (1.3)$$

где $\omega(\varepsilon)$ – коэффициент понижения, величина которого изменяется в пределах
$$0 \leq \omega(\varepsilon) \leq 1. \quad (1.4)$$

Причем, $\omega = 0$ - соответствует упругому участку диаграммы, $\omega = 1$ - соответствует идеальной пластичности.

Итак,
$$\sigma = M_2M_1 - MM_1 = E\varepsilon - E\varepsilon\omega = E\varepsilon(1 - \omega). \quad (1.5)$$

Здесь $\omega(\varepsilon)$ - функция А.А.Ильюшина.

На рисунке 1.9 показана диаграмма упруго-пластического тела с линейным упрочнением.

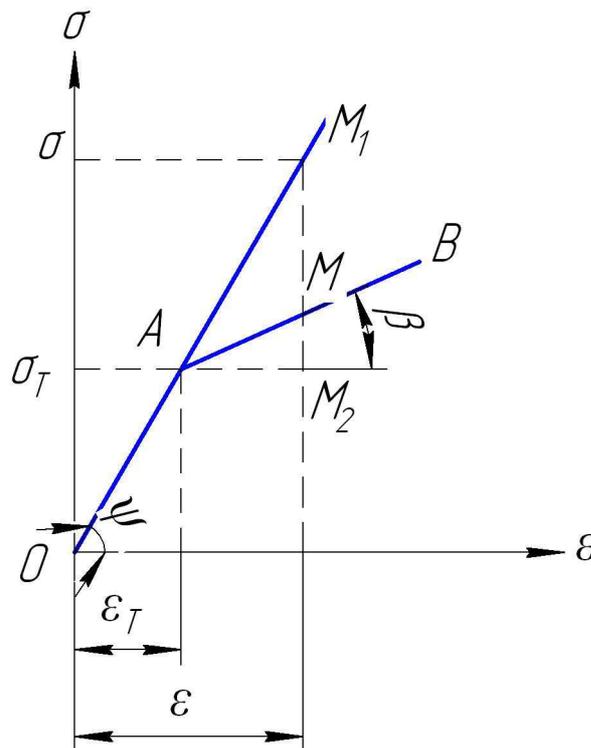


Рисунок 1.9 – Диаграмма упруго-пластического тела с линейным упрочнением

Диаграмма $\sigma(\varepsilon)$ приближенно заменяется ломаной линией OAB . Здесь OA – упругое поведение материала, а AB – пластическое.

Точка перелома A условно соответствует пределу текучести σ_T .

Имеются два модуля: $E = tg\psi$ - модуль упругости, а на участке АВ имеется модуль упрочнения $E' = tg\beta$.

Понижение напряжений за счет пластической деформации относительно идеально упругого напряжения равна:

$$MM_1 = M_2M_1 - M_2M = E(\varepsilon - \varepsilon_T) - E'(\varepsilon - \varepsilon_T) = (E - E')(\varepsilon - \varepsilon_T),$$

или

$$MM_1 = E\varepsilon \left(\frac{E - E'}{E} \right) \left(1 - \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon} \right). \quad (1.6)$$

Относительное понижение модуля упругости λ при переходе в пластическую область равно

$$\lambda = \frac{E - E'}{E} = 1 - \frac{E'}{E}. \quad (1.7)$$

Например, для материала Ст.3 $\lambda = 1 - \frac{1,05 \cdot 10^6 \text{ Ё} / \tilde{m}^2}{2,1 \cdot 10^7 \text{ Ё} / \tilde{m}^2} = 1 - 0,05 = 0,95$.

С учетом (1.7)

$$\dot{\sigma} \dot{\sigma}_1 = \dot{\sigma} \varepsilon \lambda \left(1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \right). \quad (1.8)$$

Коэффициент понижения напряжений за счет пластической деформации при диаграмме *OAB* выражается так:

$$\omega = \lambda \left(1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \right). \quad (1.9)$$

Диаграммы растяжения, как это представлено на рисунке 1.10, сводятся к двум основным типам: к диаграммам с площадкой текучести и диаграммам без площадок текучести.

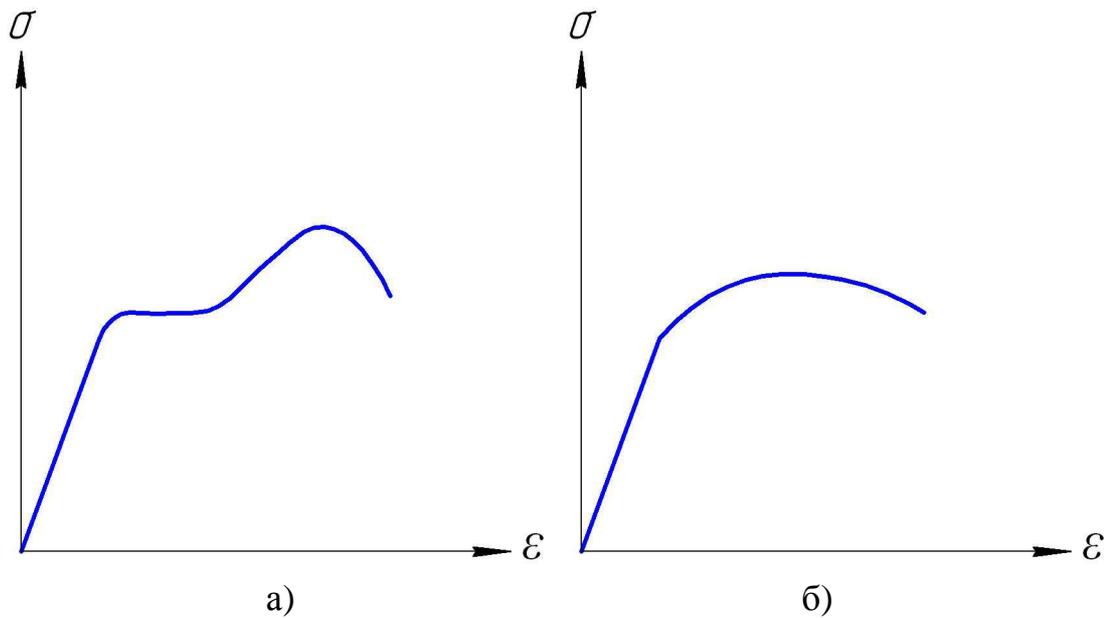


Рисунок 1.10 – Диаграммы $\sigma(\varepsilon)$: а) с площадкой текучести, б) без площадки текучести

В расчетах с высокой степенью точности следует использовать реальные диаграммы без аппроксимации какими-либо уравнениями. Но это часто усложняет расчеты, в связи с этим диаграммы схематизируются, то есть заменяются кривыми или прямыми, имеющими достаточно простое выражение и в то же время хорошо совпадающими с экспериментально полученными диаграммами.

Например, диаграмма растяжения с площадкой текучести (рисунок 1.11) может быть представлена ломаной линией, состоящей из отрезков OA , AB и BC .

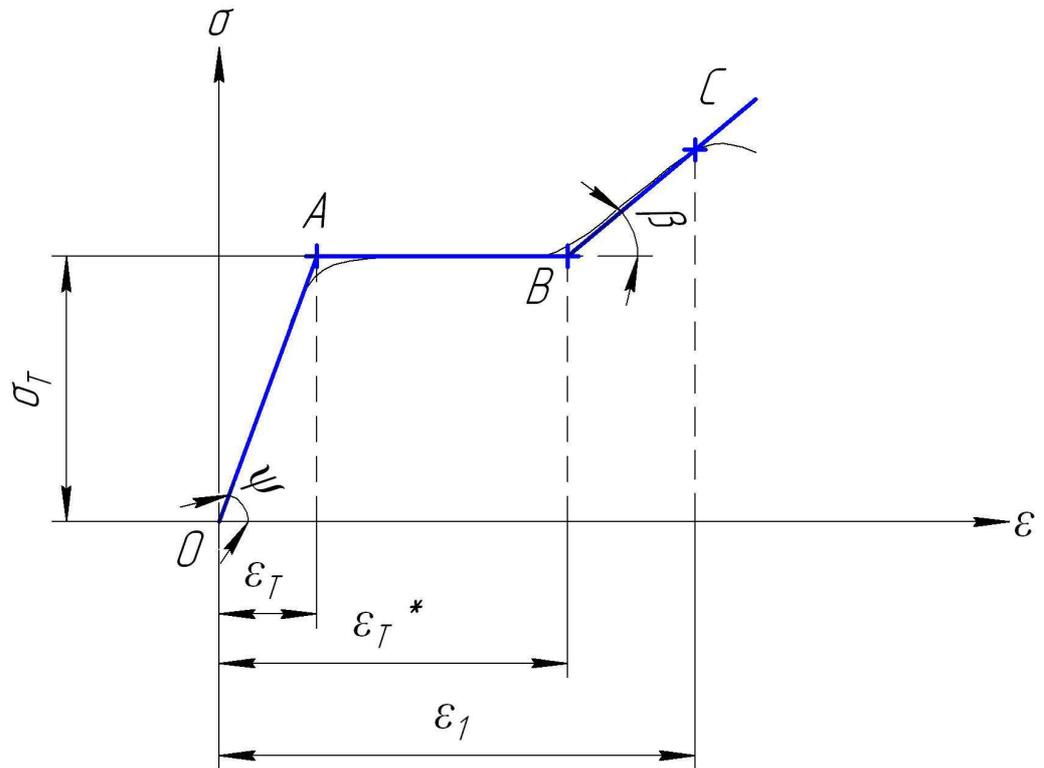


Рисунок 1.11 – Диаграмма растяжения с площадкой текучести и с линейным упрочнением

$$\text{Для участка } 0 \leq \epsilon \leq \epsilon_\delta = \frac{\sigma_\delta}{\dot{A}}, \quad \sigma = \dot{A}\epsilon \quad \text{и} \quad \omega = 0. \quad (1.10)$$

$$\text{При } \epsilon_\delta \leq \epsilon \leq \epsilon_\delta^*, \quad \sigma = \sigma_\delta \quad \text{и} \quad \omega = 1 - \frac{\epsilon_\delta}{\epsilon}, \quad (1.11)$$

$$\text{а при } \epsilon > \epsilon_\delta^*, \quad \sigma = \sigma_\delta + \dot{A}_\delta (\epsilon - \epsilon_\delta^*) \quad (1.12)$$

$$\text{и} \quad \omega = \lambda - \frac{\epsilon_\delta}{\epsilon} + (1 - \lambda) \frac{\epsilon_\delta^*}{\epsilon}. \quad (1.13)$$

Здесь ϵ_δ^* - деформация, соответствующая началу упрочнения, E_1 - модуль упрочнения материала, равный $tg\beta$, $\lambda = 1 - \frac{\dot{A}_1}{\dot{A}}$ - параметр упрочнения.

Диаграмма может быть использована при деформациях, не превышающих ϵ_1 . При больших деформациях участок BC проводится при меньшем угле наклона β .

Рассмотрим диаграмму $\sigma(\epsilon)$ с площадками текучести и степенным упрочнением (рисунок 1.12).

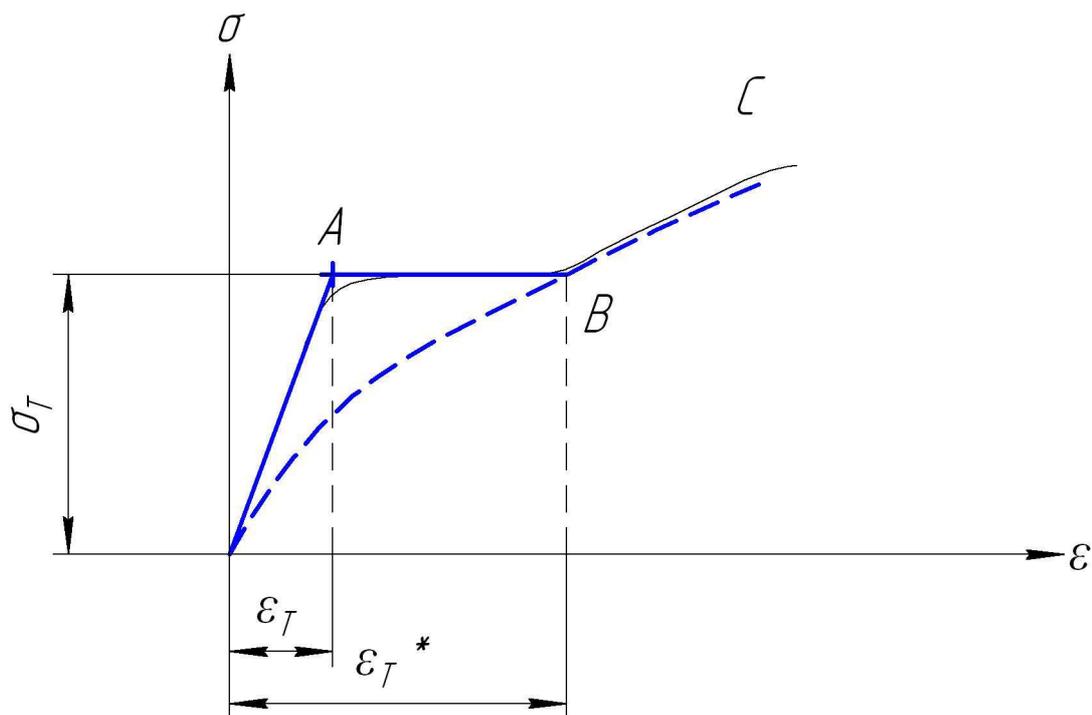


Рисунок 1.12 – Диаграмма растяжения с площадкой текучести и степенным упрочнением

Для расчета за пределами упругости для большей степени точности схематизируется тот участок экспериментально полученной диаграммы, который используется в расчете. При схематизации диаграмм исчезает различие между σ_{δ} и σ_{δ} .

$$\text{Для участка } 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\delta}, \quad \sigma = A\varepsilon \quad \text{и} \quad \omega = 0. \quad (1.14)$$

$$\text{При } \varepsilon_{\delta} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{\delta}^*, \quad \sigma = \sigma_{\delta}, \quad \omega = 1 - \frac{\varepsilon_{\delta}}{\varepsilon}. \quad (1.15)$$

$$\text{Для } \varepsilon > \varepsilon_{\delta}^*, \quad \sigma = \sigma_{\delta} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\delta}^*} \right)^m, \quad (1.16)$$

$$\text{и} \quad \omega = 1 - \frac{\varepsilon_{\delta} \varepsilon^{m-1}}{(\varepsilon_{\delta}^*)^m}. \quad (1.17)$$

Диаграмма растяжения без площадки текучести может быть схематизирована ломаной линией, состоящей из двух прямых или ломаной, состоящей из прямой и участка параболы (рисунок 1.13).

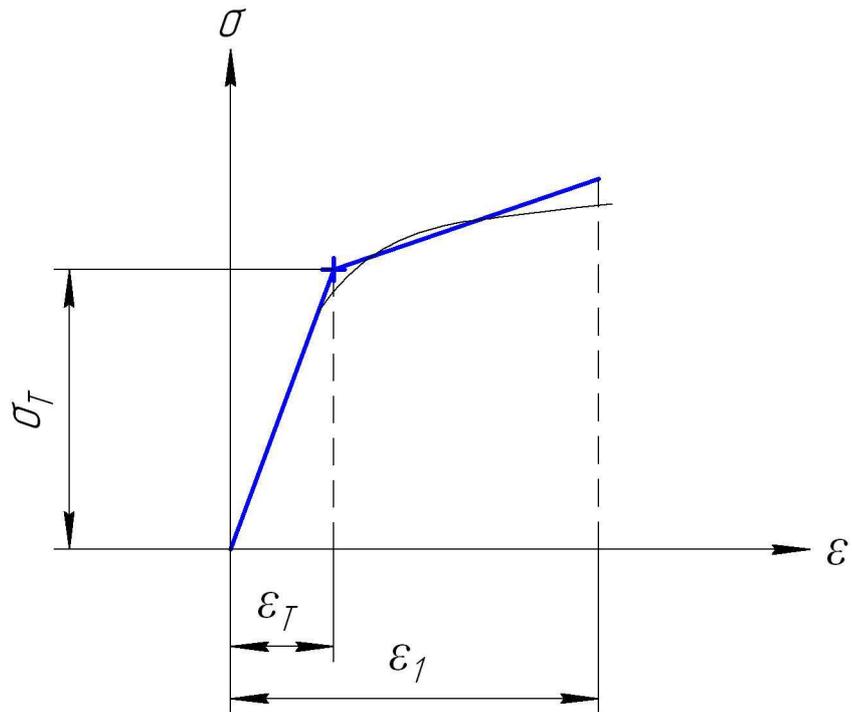


Рисунок 1.13 – Диаграмма растяжения с линейным упрочнением

Для диаграммы с линейным упрочнением:

$$\text{при } 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_0, \quad \sigma = \dot{A}\varepsilon \quad \text{и} \quad \omega = 0, \quad (1.18)$$

$$\text{а при } \varepsilon \geq \varepsilon_0, \quad \sigma = \sigma_0 + \dot{A}_1(\varepsilon - \varepsilon_0) \quad (1.19)$$

$$\text{и} \quad \omega = \lambda \left(1 - \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \right). \quad (1.20)$$

Для диаграммы со степенным упрочнением:

$$\text{при } 0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_0 = \frac{\sigma_0}{\dot{A}}, \quad \sigma = \dot{A}\varepsilon \quad \text{и} \quad \omega = 0. \quad (1.21)$$

$$\text{При } \varepsilon > \varepsilon_0^*, \quad \sigma = \sigma_0 \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^m, \quad \omega = 1 - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right)^{m-1}. \quad (1.22)$$

Иногда для упрощения расчета зависимость напряжений от деформаций не только в области упрочнения, а во всем интервале изменения деформаций аппроксимируется степенной функцией (рисунок 1.14):

$$\sigma = \dot{A}\varepsilon^m, \quad (1.23)$$

при чем $0 < m < 1$.

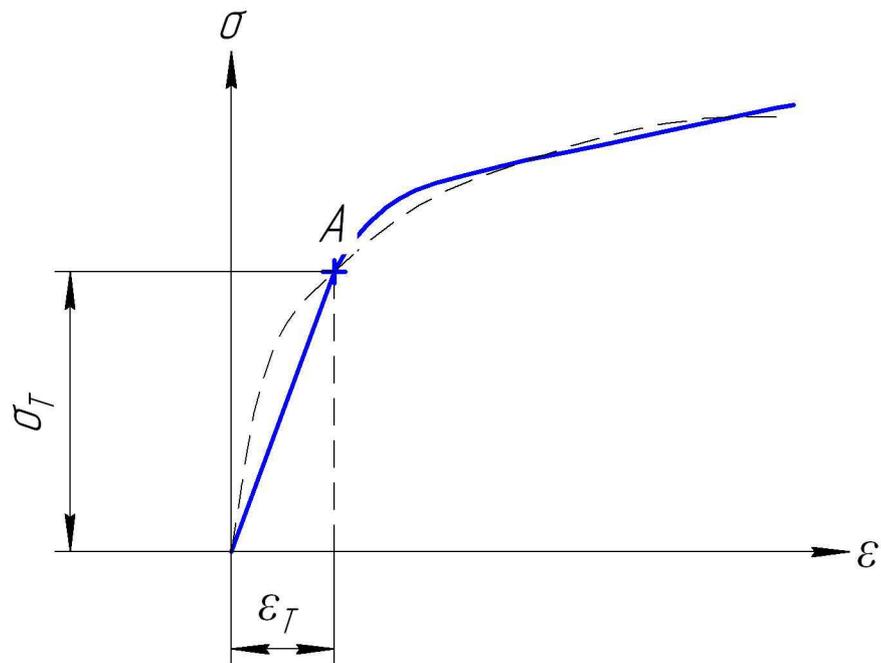


Рисунок 1.14 – Схематизация диаграммы растяжения диаграммой со степенным упрочнением

Схематизация искажает экспериментально полученную диаграмму при малых деформациях. При этом для $\varepsilon = 0$ $\frac{d\sigma}{d\varepsilon} = 0$, а не E , как это имеет место в действительности.

Частным случаем диаграммы с линейным упрочнением является диаграмма без упрочнения (рисунок 1.15), то есть диаграмма совершенно упруго-пластического тела, для которого модуль упрочнения $\dot{A}_1 = 0$.

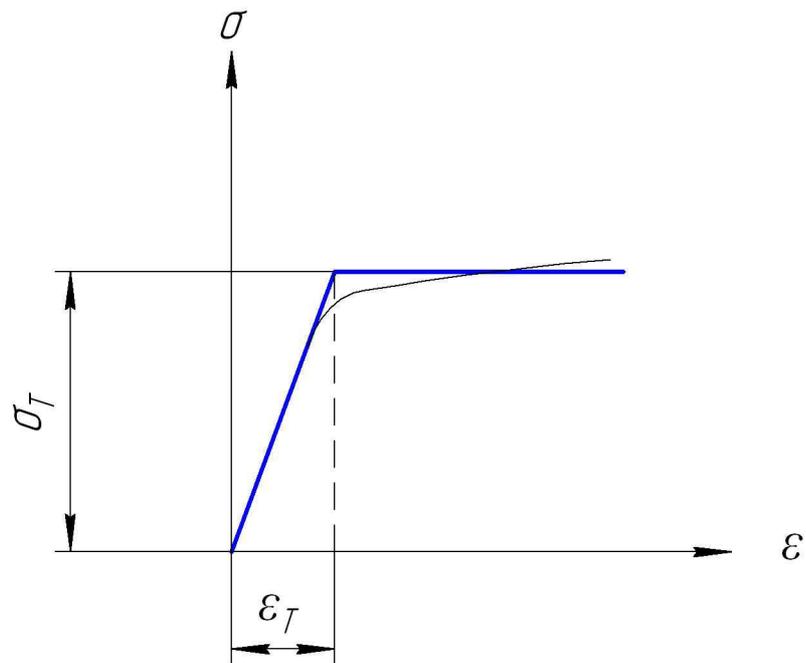
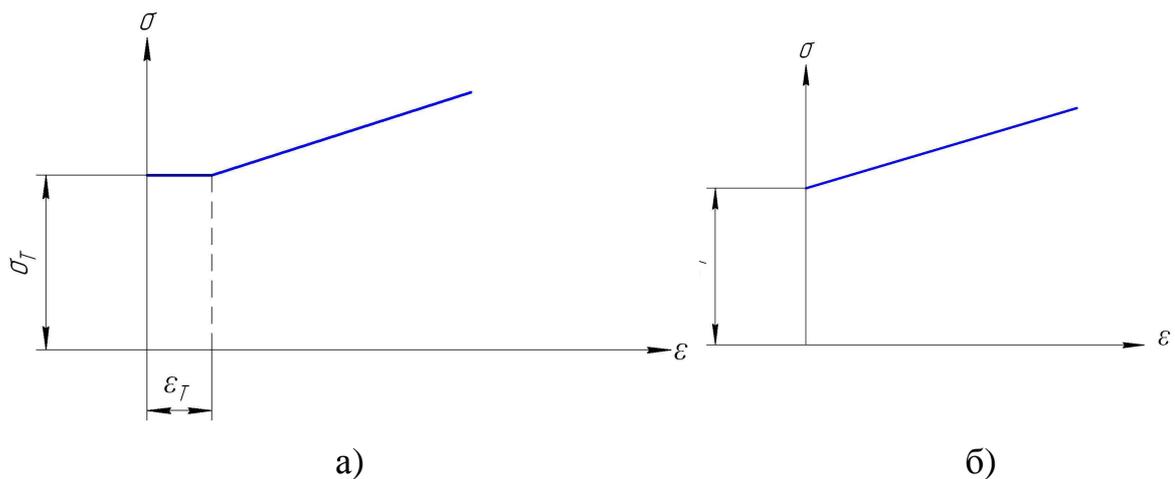


Рисунок 1.15 – Схематизация диаграммы растяжения диаграммой без упрочнения – диаграмма растяжения совершенно упруго-пластического тела (диаграмма Прандтля)

Для упрощения расчетов за пределами упругости иногда модулю упругости придают бесконечное значение, то в итоге получаются схематизированные диаграммы соответствующие жестко упрочняющемуся телу с площадкой текучести (рисунок 1.16, а), жестко упрочняющемуся телу (рисунок 1.16, б), жестко пластическому телу (рисунок 1.16, в).



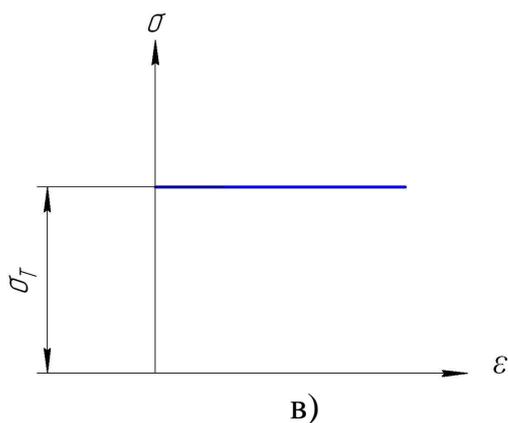


Рисунок 1.16 – Схема диаграмм $\sigma(\varepsilon)$ без упругой области деформирования

Использование этих диаграмм в расчетах равносильно пренебрежению упругой областью по сравнению с пластической.

1.4 Влияние эксплуатационных и технологических факторов на свойства материалов

На свойства и характеристики конструкционных материалов оказывают влияние эксплуатационные и технологические факторы. При воздействии этих факторов изменяются характеристики прочности и жесткости, изменяются пластические свойства, вязкость, твердость и т.д.

1.4.1 Влияние скорости деформации $\dot{\varepsilon}$

Скорость деформирования при испытании равна: $\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{d\Delta l}{l_0 dt} = \frac{v}{l}$.

На рисунке 1.17а показано влияние скорости нагружения на вид диаграмм $\sigma(\varepsilon)$. Видно, что упругие участки диаграмм совпадают, площадки текучести исчезают, а σ_B и σ_T повышаются.

На рисунке 1.17б представлен вид диаграмм $\sigma(\varepsilon)$, полученных при статическом и динамическом приложении нагрузок.

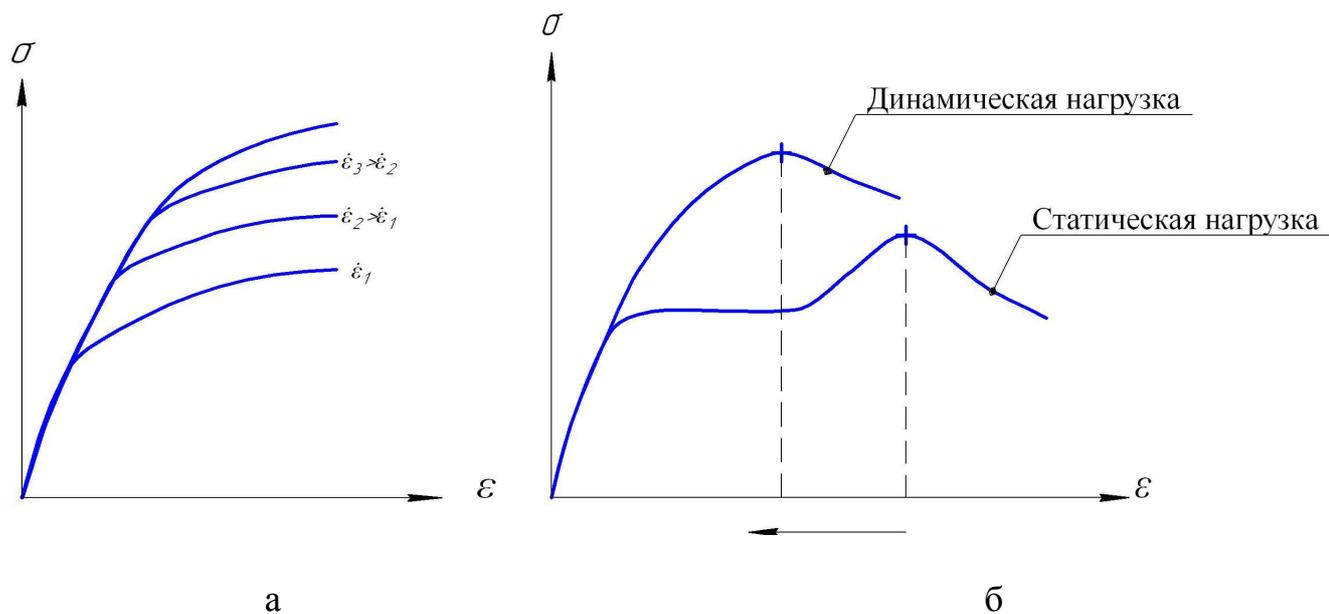


Рисунок 1.17 – Влияние скорости деформирования

1.4.2 Радиоактивное облучение

Радиоактивное облучение необходимо учитывать при создании атомных реакторов, атомных двигателей, приборов, использующих радиоактивные эффекты. Проникающее нейтронное облучение вызывает смещение атомов, что изменяет пластические свойства материалов. При этом повышаются σ_B и σ_T , площадка текучести становится более короткой (рисунок 1.18)

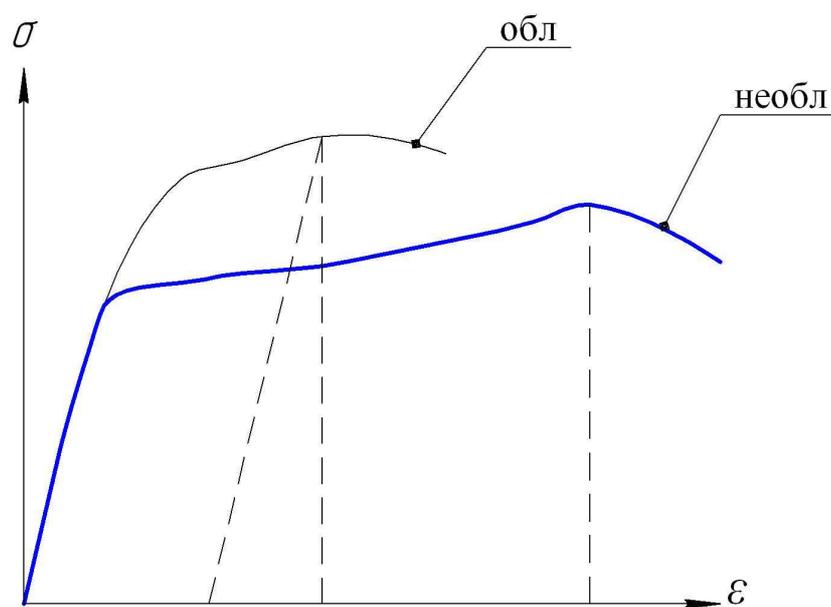


Рисунок 1.18 – Влияние радиоактивного облучения на диаграмму $\sigma(\epsilon)$

1.4.3 Влияние термообработки

Характеристики металла данного химического состава сильно зависят от той термической обработки, которой он был подвергнут. Назначение термообработки состоит в том, чтобы путем определенного режима нагрева и охлаждения добиться изменения микроструктуры, а тем самым, изменения физико-механических свойств металла.

Так, при закалке повышаются σ_B и σ_T , снижаются пластические свойства, при нормализации улучшаются механические свойства и структура.

1.4.4 Влияние температуры

Во многих отраслях современной технике – в газотурбостроении, двигателестроении, реакторостроении, в ракетостроении элементы конструкций работают в условиях высоких температур, от которых существенно зависят механические свойства материалов.

Изменение температур влияет на σ_B , σ_T , пластичность, а также и на упругие свойства материалов – на E , μ . Общая тенденция влияния температуры на свойства материала такова, что с повышением температуры σ_T вначале иногда несколько повышается, а затем понижается, еще быстрее понижается σ_B , так что упрочнение становится все меньше. При достаточно высокой температуре предел прочности σ_B становится равным пределу текучести. Это создает благоприятные условия для горячей обработки металлов давлением.

Итак, при повышении температуры характеристики прочности уменьшаются, при понижении повышаются.

Так и Ст.3 при $t^\circ=500^\circ\text{C}$ предел текучести $\sigma_T=140\text{ МПа}$, а $\sigma_B=250\text{ МПа}$, соответственно при $t^\circ=600^\circ\text{C}$ $\sigma_T=40\text{ МПа}$, а $\sigma_B=150\text{ МПа}$, при $t^\circ=600\dots650^\circ\text{C}$. Эта температура является температурой пластичности. При отрицательных температурах у стали повышается хрупкость, при $t^\circ<-45^\circ\text{C}$

Ст.3 становится хрупкой. Это свойство хладноломкости. Влияние низких температур показано на рисунке 1.19.

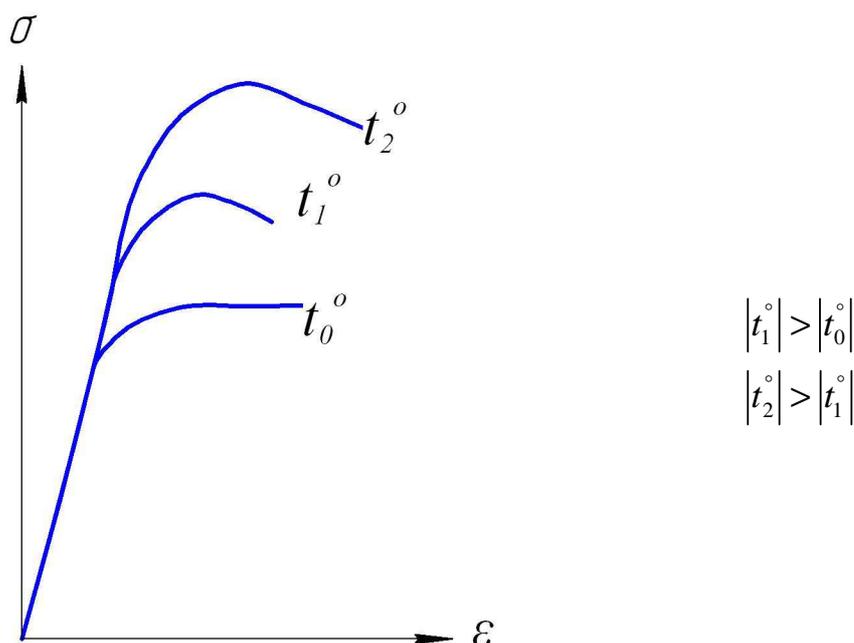


Рисунок 1.19 – Вид диаграмм $\sigma(\varepsilon)$ при низких температурах (t_1 и t_2 температуры отрицательные)

1.4.5 Влияние коррозии

Возникновению и развитию повреждений при переменном во времени нагружении способствует коррозионная активность рабочей среды, которая приводит к уменьшению толщины стенки элемента, к снижению сопротивления материала циклическим воздействиям, к образованию дополнительных поверхностных концентраторов напряжений в виде язв, питтингов и т.п.

Явление коррозионного растрескивания стали, вызываемое сероводородом, может иметь два проявления:

- водородное растрескивание (блистеринг), обозначаемое в технической литературе НИС;

- сульфидное коррозионное растрескивание под напряжением, обозначаемое в технической литературе SSCC.

Вид кривых усталости без коррозии (б.к.) и в коррозионных условиях (к.у.) представлен на рисунке 1.20.

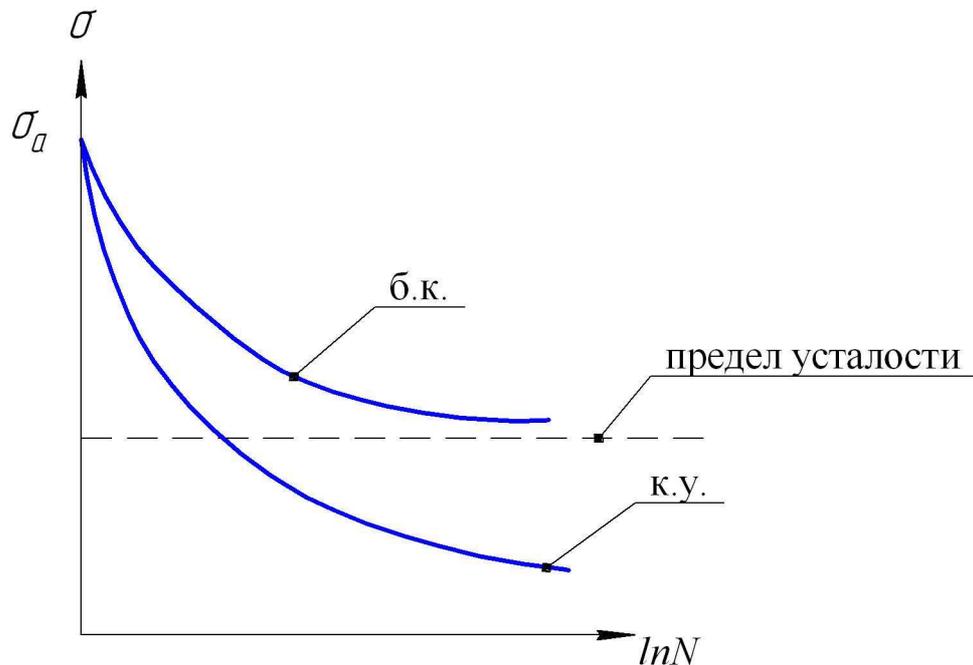


Рисунок 1.20 – Влияние коррозии на усталостные свойства материала (N-число циклов нагрузок)

1.5. Пластичность и хрупкость. Твердость

Пластичность – способность материала получать большие деформации, не разрушаясь. Свойство пластичности используется в таких технологических операциях, как штамповка, вытяжка, гибка.

Мерой пластичности является удлинение δ при разрыве. Пластичные материалы – медь, алюминий, низкоуглеродистая сталь.

Противоположным свойству пластичности является свойство хрупкости, т.е. способность материала разрушаться без заметных остаточных деформаций.

Материалы, обладающие этими свойствами, называются хрупкими. Для хрупких материалов δ не превышает 2...5%, а в ряде случаев измеряется

долями процента. К таким материалам относятся чугун, высокоуглеродистая сталь, стекло.

Предел прочности для весьма хрупких материалов практически совпадает с пределом текучести.

Пластичные и хрупкие материалы по-разному ведут себя и при испытании на сжатие. Эти испытания проводятся на коротких цилиндрических образцах, располагаемых между параллельными плитами. Для малоуглеродистой стали диаграмма сжатия образца, как и при растяжении имеет площадку текучести с постепенным переходом к зоне упрочнения. Однако дальше нагрузка в отличие от растяжения растет. Это происходит из-за увеличения площади поперечного сечения. Образец вследствие трения на торцах принимает бочкообразную форму. Довести образец из пластичного материала до разрушения не удастся, цилиндр сжимается в диск. Поэтому предел прочности при сжатии для некоторых материалов не может быть найден.

Диаграмма сжатия хрупких материалов сохраняет качественные особенности диаграммы растяжения. Предел прочности хрупкого материала при сжатии определяется так же, как и при растяжении. Разрушение образца происходит с образованием трещин по наклонным или продольным плоскостям. Сопоставление предела прочности хрупких материалов при растяжении $\sigma_{\delta\delta}$ с пределом прочности при сжатии $\sigma_{\delta\bar{n}}$ показывает, что эти материалы обладают, как правило, более высокими прочностными показателями при сжатии, чем при растяжении.

Так величина отношения $\frac{\sigma_{\delta\delta}}{\sigma_{\delta\bar{n}}}$ для чугуна колеблется в пределах 0,2...0,4, для керамических материалов 0,1...0,2.

Для пластичных материалов сопоставление прочностных характеристик на растяжение и сжатие ведется по пределу текучести ($\sigma_{\delta\delta}$ и $\sigma_{\delta\bar{n}}$). Принято считать, что $\sigma_{\delta\delta} \approx \sigma_{\delta\bar{n}}$.

Известны технологические средства для изменения свойств материалов в нужных направлениях. Так один из видов термообработки – закалка повышает прочностные характеристики стали и одновременно снижает её пластические свойства.

Для большинства материалов хорошо известны нужные термообработки, которые обеспечивают получение необходимых механических характеристик материала.

Испытание образцов на растяжение и сжатие даёт объективную оценку свойств. Но на производстве имеет ряд неудобств.

На практике прибегают к сравнению свойств материалов при помощи пробы на твёрдость.

Твёрдость – способность материала противодействовать механическому проникновению в него посторонних тел.

Показатель твердости связан с показателями прочности и пластичности.

Распространены пробы по Бринеллю и по Роквеллу. В первом случае вдавливаются стальной шарик $d=10\text{мм}$, во втором – острый алмазный наконечник. По размерам отпечатка судят о твердости материала, а при помощи переводных таблиц получают предел прочности, не разрушая детали.

1.6 Несущие свойства элементов конструкции при нагреве

При нагреве изменяются свойства конструкционных материалов – снижаются прочностные и жесткостные характеристики. Наиболее резко в зависимости от нагрева снижаются свойства дюралевого сплава Д16АТ. Как видно из таблицы 1.2, предельной температурой для этого сплава будет $t^{\circ}=150^{\circ}\text{C}$.

Таблица 1.2 – Значение предельных температур нагрева для конструкционных материалов

Материал	Предельная температура	Предельное число М	
		H=0	H=20км
Алюминиевые сплавы Д16АТ	150°	1,7	2,4
Титановые сплавы ВТ-5	400°	2,7	3,7
Нержавеющие сплавы 1Х18Н9Т	700°	3,6	5,3

Титановые сплавы ВТ5 и нержавеющие хромоникелевые стали 1Х18Н9Т, как видно из таблицы 1.2 имеют значительно более высокие характеристики при нагреве.

Нагрев элементов конструкции приводит к возникновению ползучести – непрерывному росту деформаций с течением времени при неизменной нагрузке. График изменения деформаций при ползучести в зависимости от времени показан на рисунке 1.21. Участок ОА представляет собой мгновенную упругую деформацию, на участке АВ происходит нарастание ползучести с переменной скоростью, ВС – установившаяся ползучесть, СД – ускоренная ползучесть, приводящая к разрушению.

Для дюралевых сплавов ползучесть наступает при $t^{\circ}=100-150^{\circ}\text{C}$.

Временное сопротивление материала при ползучести снижается и зависит от температуры t° и времени τ теплового воздействия (рисунок 1.22). в этих условиях происходит уменьшение и критических напряжений потери устойчивости элементов конструкции в зависимости от времени (рисунок 1.23).

Обозначим через $\tau_{\partial\partial}$ - критическое время от момента приложения нагрузки к элементу конструкции до ее разрушения от ползучести или время достижения предельной остаточной деформации при ползучести или потери устойчивости.

Учтем упругую деформацию и установившуюся ползучесть, то есть рассмотрим ползучесть, соответствующую участкам OA и BC (рисунок 1.21).

Изменение деформации здесь может быть представлено в виде

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{A} + \dot{A}\sigma^n \tau \quad (1.26)$$

где A, n – коэффициенты, зависящие от свойств материала, τ – время, ч.

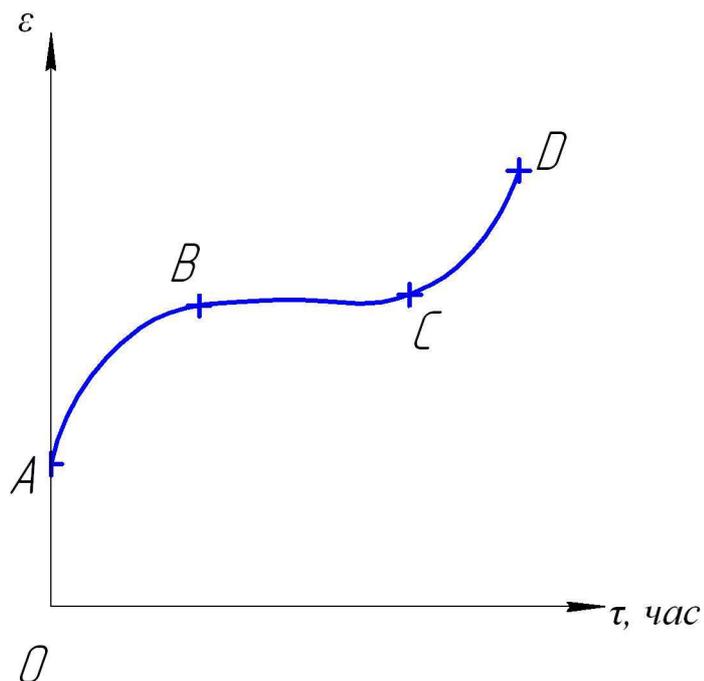


Рисунок 1.21 – График изменения деформации при ползучести в зависимости от времени

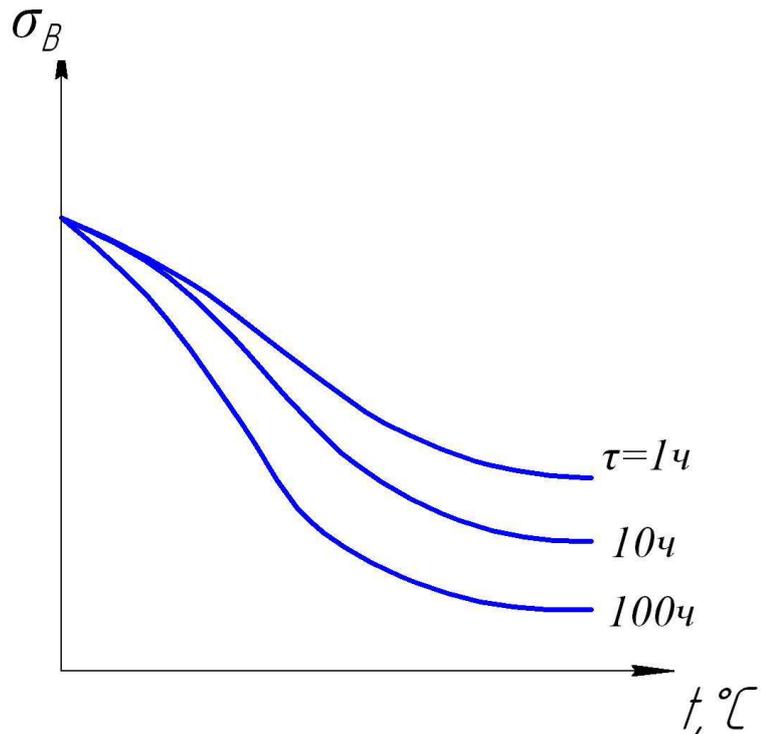


Рисунок 1.22 – Зависимость временного сопротивления материала при ползучести от температуры t°, C и времени τ теплового воздействия

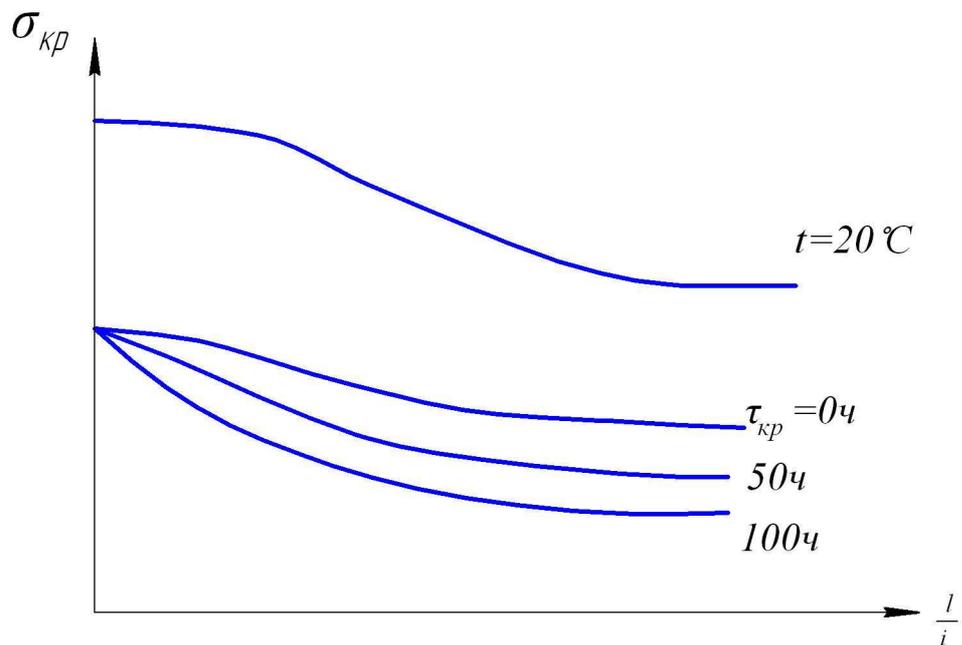


Рисунок 1.23 – Критические напряжения потери устойчивости элементов конструкции при ползучести

Приближенно определим критическое напряжение, полагая, что элемент конструкции теряет устойчивость и разрушается при достижении его деформацией ползучести критической величины $\epsilon_{\text{до}}$:

$$\varepsilon = \varepsilon_{\dot{\varepsilon}\dot{\delta}}. \quad (1.27)$$

Величину критической деформации найдем как деформацию, соответствующую критическому напряжению в элементе:

$$\varepsilon_{\dot{\varepsilon}\dot{\delta}} = \frac{\sigma_0}{\dot{A}}, \quad (1.28)$$

где σ_0 - критическое напряжение элемента (стрингера, пояса, панели обшивки), определяемое по известным формулам строительной механике.

Подставив выражения (1.26) и (1.28) в (1.27), получим

$$\frac{\sigma_{\dot{\varepsilon}\dot{\delta}.i.}}{\dot{A}} + \dot{A}\sigma_{\dot{\varepsilon}\dot{\delta}.i.}^n \tau = \frac{\sigma_0}{\dot{A}}. \quad (1.29)$$

Напряжения $\sigma_{\dot{\varepsilon}\dot{\delta}.i.}$ входящее в уравнение (1.29), является критическим напряжением элемента при ползучести. Его можно определить, задаваясь сроком службы τ . Наиболее просто решается уравнение графически.

Для этого в координатах ε - σ строятся функции $\dot{A}\sigma^n \tau$ и $\frac{\sigma_0 - \sigma}{\dot{A}}$ (рисунок 1.24).

Абсцисса точки пересечения этих кривых дает искомое значение критического напряжения $\sigma_{\dot{\varepsilon}\dot{\delta}.i.}$ элемента ползучести.

Задаваясь критическим напряжением ползучести $\sigma_{\dot{\varepsilon}\dot{\delta}.i.}$ можно из (1.29) определить критическое время:

$$\tau_{\dot{\varepsilon}\dot{\delta}} = \frac{\sigma_0 - \sigma_{\dot{\varepsilon}\dot{\delta}.i.}}{\dot{A}\dot{A}\sigma_{\dot{\varepsilon}\dot{\delta}.i.}^n}. \quad (1.30)$$

Если пренебречь упругой деформацией по сравнению с пластической, то есть принять $\frac{\sigma_{\dot{\varepsilon}\dot{\delta}.i.}}{\dot{A}} = 0$, то из уравнения (1.29) можно найти

$$\sigma_{\dot{\varepsilon}\dot{\delta}.i.} = \sqrt[i]{\frac{\sigma_0}{\dot{A}\dot{A}\tau}}, \quad (1.31)$$

или

$$\tau_{\dot{\varepsilon}\dot{\delta}} = \frac{\sigma_0}{\dot{A}\dot{A}\sigma_{\dot{\varepsilon}\dot{\delta}.i.}^i}. \quad (1.32)$$

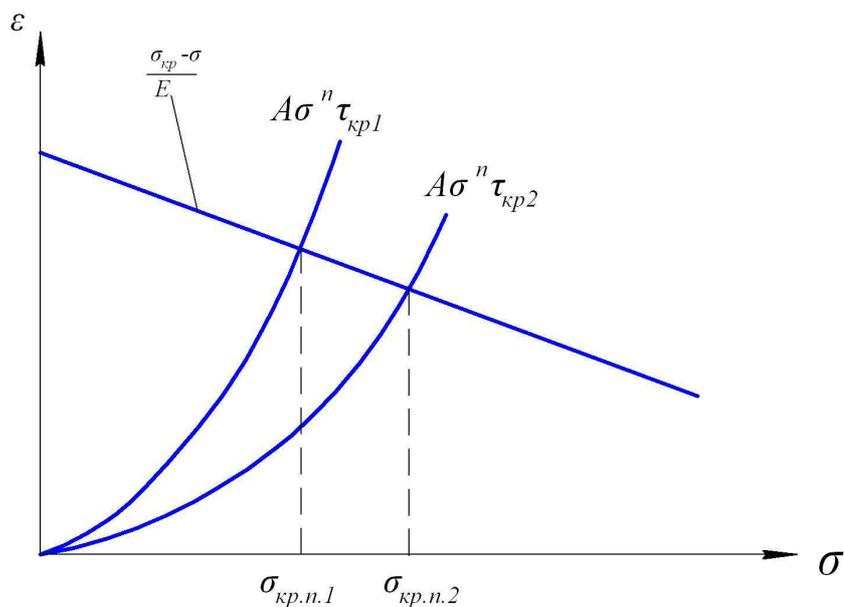


Рисунок 1.24 – Схема определения критических напряжений при ползучести $\sigma_{\text{ед.т.}}$ в зависимости от времени теплового воздействия

Предельно допустимые деформации ползучести устанавливают из условия, чтобы при этих деформациях конструкция планера сохраняла бы свои эксплуатационные показатели в заданных пределах, то есть чтобы в конструкции не возникало признаков повреждения и не происходило бы существенного изменения формы. Это требование удовлетворяется, если принять в качестве предельной деформации 0,2%, которая не должна быть превышена за срок службы самолета. Оценку напряжения при заданном сроке службы конструкции или критического времени при заданном рабочем напряжении можно произвести по формулам (1.31) и (1.32), приняв

$$\varepsilon = \frac{\sigma_0}{A} = 0,002.$$

2 ПРОЧНОСТЬ ПРИ ОДНОКРАТНЫХ НАГРУЖЕНИЯХ

2.1 Расчет по допускаемым напряжениям

Согласно этому методу расчет на прочность ведется по наибольшему напряжению σ_{\max} , возникающему в некоторой точке (или в сечении) элемента конструкции.

Напряжение σ_{\max} называется максимальным рабочим напряжением. Оно не должно превышать определенной величины, характерной для данного материала и условиям работы конструкции.

При выполнении расчетов, связанных с подбором сечений элементов (площади поперечных сечений стержневых элементов, моментов сопротивления балочных элементов, толщины обшивки или стенок тонкостенных элементов) вначале формулируется условие прочности:

$$\sigma_{\text{д до}} \leq [\sigma], \quad (2.1)$$

где
$$[\sigma] = \frac{\sigma_L}{\eta}, \quad (2.2)$$

$[\sigma]$ – допускаемое напряжение, η – коэффициент запаса прочности, σ_L – предельное напряжение.

Необходимые сечения силовых элементов подбираются из условия

$$\sigma_{\text{д до}} \leq \frac{\sigma_L}{\eta}. \quad (2.3)$$

В качестве σ_L берется величина, равная временному сопротивлению материала, то есть $\sigma_L = \sigma_{\hat{A}}$ в случае высокопрочного материала, на диаграмме $\sigma(\varepsilon)$ для которого нет характерной площадки текучести (рисунок 2.1 а).

Для того, чтобы избежать заметных остаточных деформаций, за величину σ_L для пластических материалов берут предел текучести, то есть $\sigma_L = \sigma_{\text{д}}$ (рисунок 2.1 б).

При проведении поверочных расчетов подсчитывается величина фактического запаса прочности

$$\eta = \frac{\sigma_L}{\sigma_{\delta \dot{\alpha} \ddot{\sigma}}}. \quad (2.4)$$

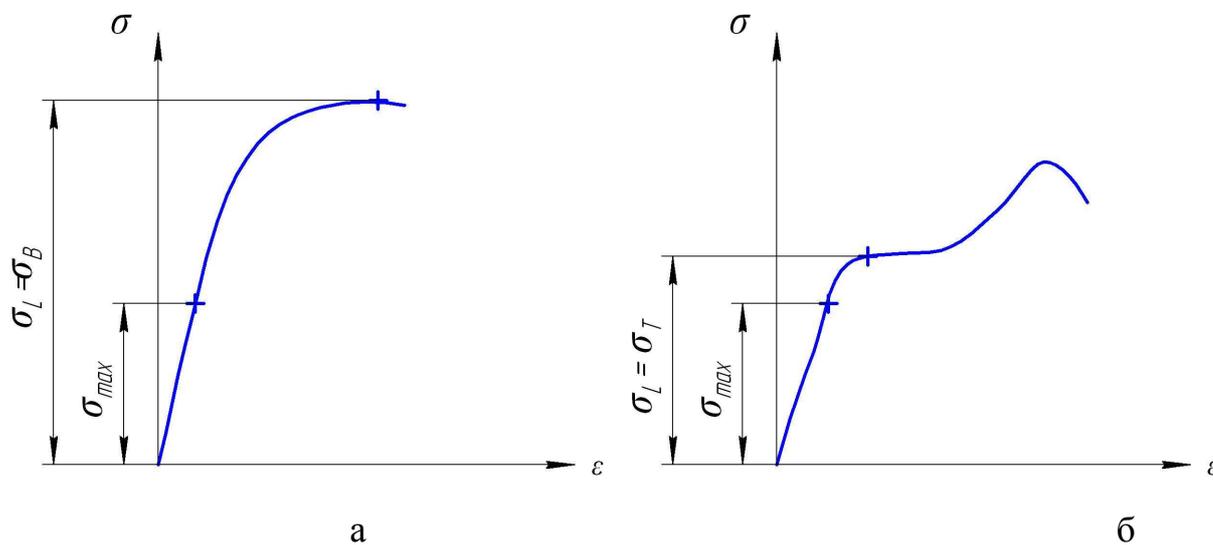


Рисунок 2.1 – Диаграммы $\sigma(\epsilon)$: а) для высокопрочных материалов, б) для пластичных материалов

3 ПРОЧНОСТЬ МАТЕРИАЛОВ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ

3.1 Усталостное разрушение материала и его причины

Элементы конструкций, различные детали машин, сооружений, приборов в процессе эксплуатации подвергаются действию нагрузок, изменяющихся во времени. Если уровень напряжений, вызванных этими нагрузками, превышает определенный предел, то в материале реализуются необратимые процессы накопления повреждений, которые приводят к образованию трещины. Концентрация напряжений по краю трещины способствует дальнейшему её развитию.

Чаще трещины возникают у поверхности элемента, но иногда – и в толще материала. При этом ослабляется сечение, с течением времени трещина достигает критической длины и происходит разрушение. Как правило, при разрушении не возникают остаточные деформации, даже если элементы выполнены из пластических материалов. Под воздействием переменных напряжений материал как бы «устаёт».

Процесс накопления повреждений в материале под действием переменных напряжений, приводящих к образованию трещины и разрушению, называется усталостью материала.

Свойство материала противостоять усталости называется выносливостью.

Физическая природа усталостного разрушения свидетельствует о том, что материал неоднороден микро-и макроскопически. У материалов эта неоднородность обусловлена случайными вариациями размеров и очертаний отдельных зёрен металла, их кристаллографической ориентации, наличием случайных включений, дефектов решетки.

Вследствие неоднородности при переменных напряжениях, даже не превосходящих предела пропорциональности в отдельных неблагоприятно ориентированных зернах возникает пластическая деформация. Она связана с

деформацией сдвига по некоторым кристаллографическим плоскостям. При этом прочность некоторых зёрен (кристаллов) нарушается, что приводит к образованию микротрещины по одной из плоскостей скольжения.

Образование трещин связано с касательными напряжениями, а их развитие определяется, в основном, нормальными напряжениями.

Слияние микротрещин создает условия для появления и развития макротрещин. Наличие начальных дефектов ускоряет данный процесс.

В настоящее время теория усталостной прочности развивается путём наложения экспериментальных данных, которые служат основой правил расчетов на выносливость.

3.2. Характеристики циклов напряжений

Усталостная прочность материалов при переменных напряжениях от вида напряженного состояния и характера изменения напряжений во времени.

Рассмотрим случай одноосного напряженного состояния, например, при изгибе балки, нагруженной силой $P(t) = P \sin \omega t$ или при вращении вала с равномерной угловой скоростью ω (рисунок 3.1).

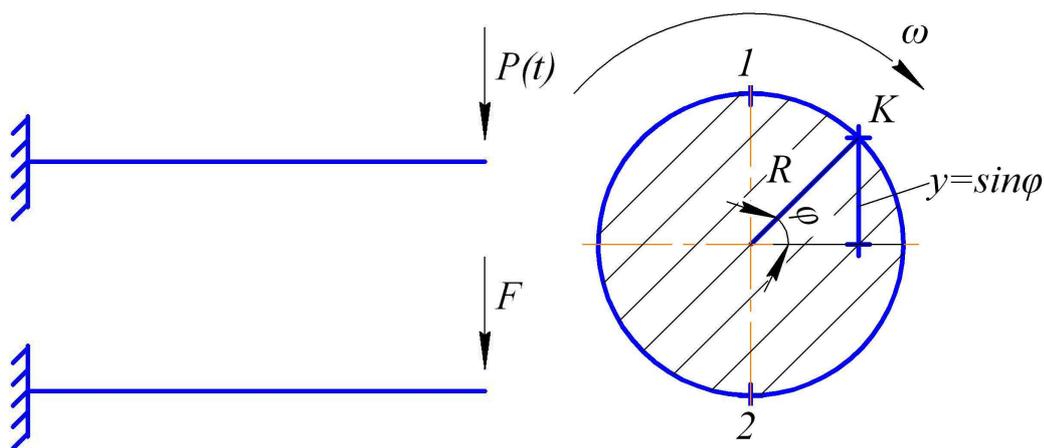


Рисунок 3.1 – Нагружение балки и вала, приводящее к появлению напряжений $\sigma(t)$

Напряжения в сечении балки и вала можно определить по формуле

$$\sigma(t) = \sigma_a \sin \omega t. \quad (3.1)$$

Наибольшие напряжения возникают при этом в точках 1 и 2 сечения (рисунок 3.1 б)

Равенству (3.1) соответствует график изменения напряжений σ , приведённый ниже.

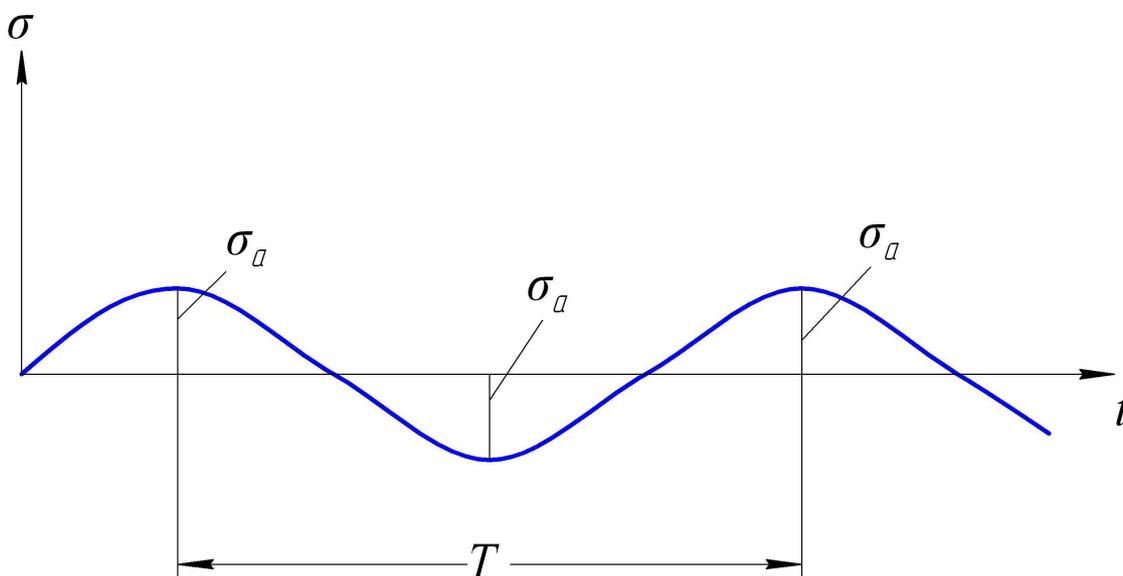


Рисунок 3.2 – Симметричный цикл $\sigma(t) = \sigma_a \sin \omega t$

Наибольшие напряжения возникают в точках 1 и 2 поперечных сечений балки и вала (рисунок 3.1). Напряжения изменяются во времени с периодом T . Через промежуток времени T напряжение принимает одно и тоже значение.

Различным законам напряжений соответствуют различные виды циклов.

Если вдоль оси или балки приложена сила N (рисунок 3.3) – растягивающая или сжимающая, то нормальные напряжения в одной и той же точке определяются выражением

$$\sigma = \sigma_m + \sigma_a \sin \omega t, \quad (3.2)$$

где
$$\sigma_m = \frac{N}{F}. \quad (3.3)$$



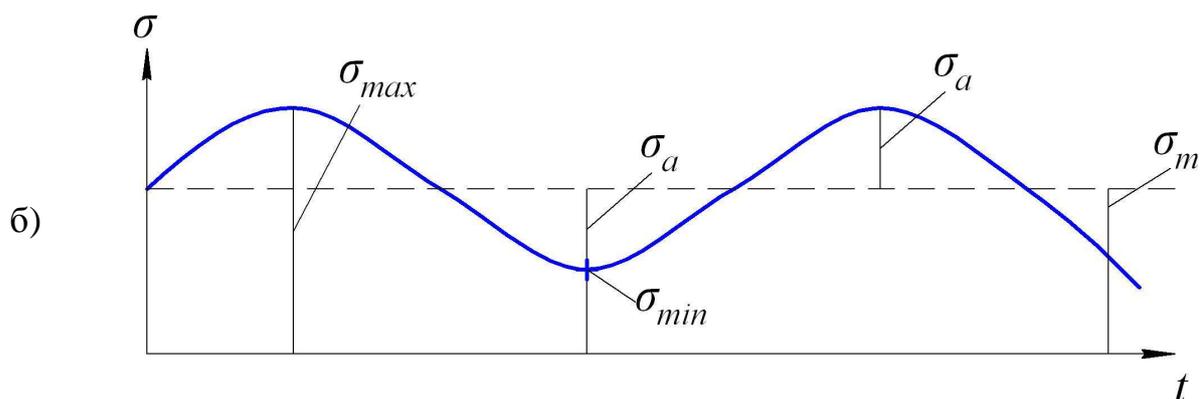
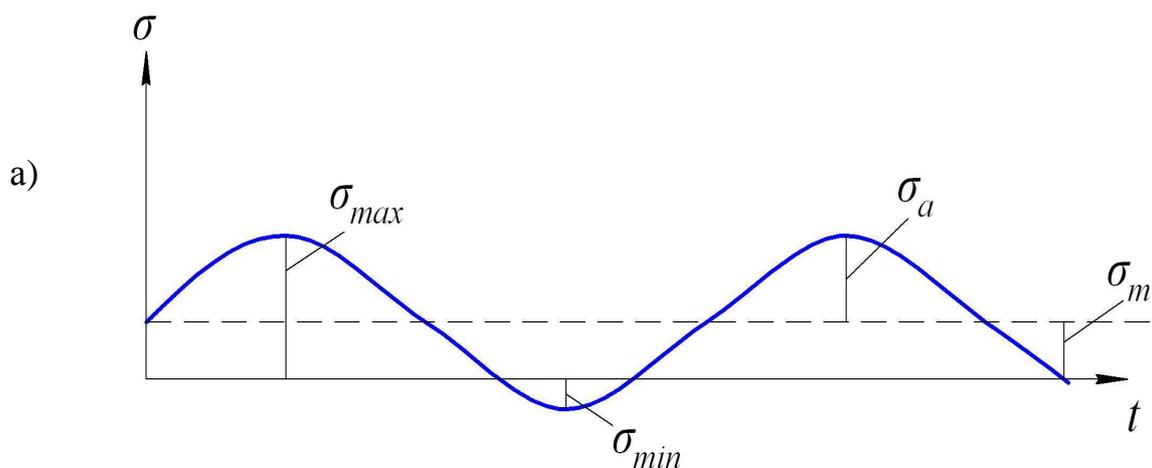
Рисунок 3.3 – Нагружение балки силами $P(t)$ и N

В зависимости от значения силы N график изменения σ может иметь асимметричный цикл, для которого максимальные и минимальные напряжения по абсолютному значению различны. Если знаки σ_{\max} и σ_{\min} различны, то цикл называется знакопеременным (рисунок 3.4 а). При одинаковых знаках – знакопостоянным (рисунок 3.4 б). Когда одно из напряжений (σ_{\max} или σ_{\min}) равно нулю – цикл пульсационный или отнулевой (рисунок 3.4 в).

Любой цикл характеризуется двумя параметрами:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \text{ - среднее напряжение цикла, (3.4)}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \text{ - амплитуда переменных напряжений цикла. (3.5)}$$



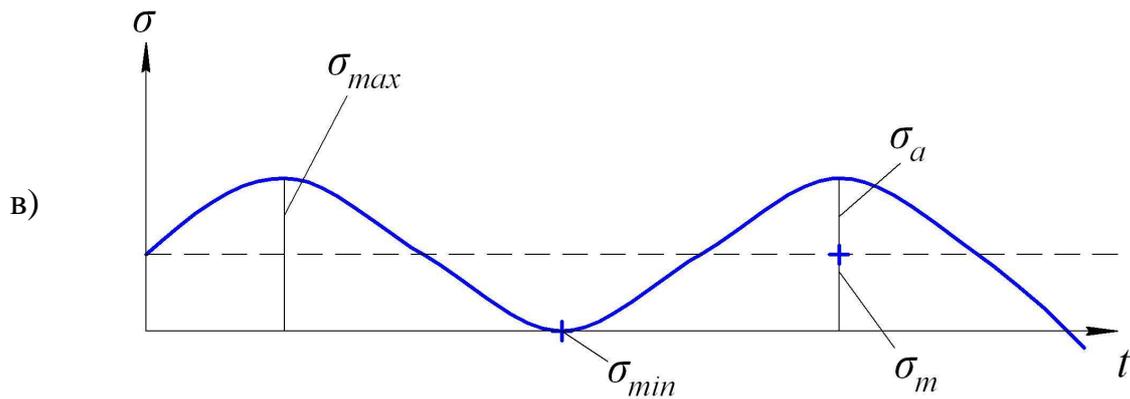


Рисунок 3.4 – Циклы изменения напряжений: а) знакопеременный, б) знакопостоянный, в) отнулевой

Разность $\sigma_{\max} - \sigma_{\min} = 2\sigma_a$, называется размахом напряжений.

Отношение напряжений

$$\frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = r \quad (3.7)$$

называется коэффициентом асимметрии цикла.

При равнозначных напряжениях r принимается со знаком «-».

Для симметричного цикла $\sigma_m = 0$, $\sigma_{\max} = \sigma_a = -\sigma_{\min}$, $r = -1$. Поэтому в обозначениях величин, соответствующих симметричному циклу, вводится индекс -1.

Для отнулевого (пульсационного) цикла, характерного, например, для изгиба зубьев зубчатых колес $\sigma_{\min} = 0$, $\sigma_m = \sigma_a = \frac{1}{2}\sigma_{\max}$, $r = 0$.

Циклы, имеющие одинаковые значение коэффициента асимметрии, называются подобными.

3.3 Кривые усталости. Предел выносливости

Основной характеристикой сопротивляемости материала действию переменных напряжений, то есть характеристикой выносливости материала, является получаемая экспериментальным путем кривая усталости.

Ординаты этой кривой – значения максимальных напряжений или амплитуды цикла при симметричном цикле, при которых происходит разрушение детали, а абсцисса – число циклов N , которое выдержала деталь до разрушения. Кривые усталости носят название кривых Велера (А.Велер – немецкий инженер (1819-1914 гг)).

По оси абсцисс, а иногда и по оси ординат для удобства откладывают значения lgN и $lg\sigma$.

Для проведения испытаний используются специальные машины, которые подразделяются по виду нагружения образцов на машины для испытаний при изгибе, кручении, растяжении – сжатии, сложном напряженном состоянии, а также универсальные.

Первую машину для испытаний построил А.Велер, который занимался исследованием усталостной прочности осей подвижного состава железных дорог. Сам А.Велер не пользовался кривой усталости, но тем не менее кривые усталости носят его имя.

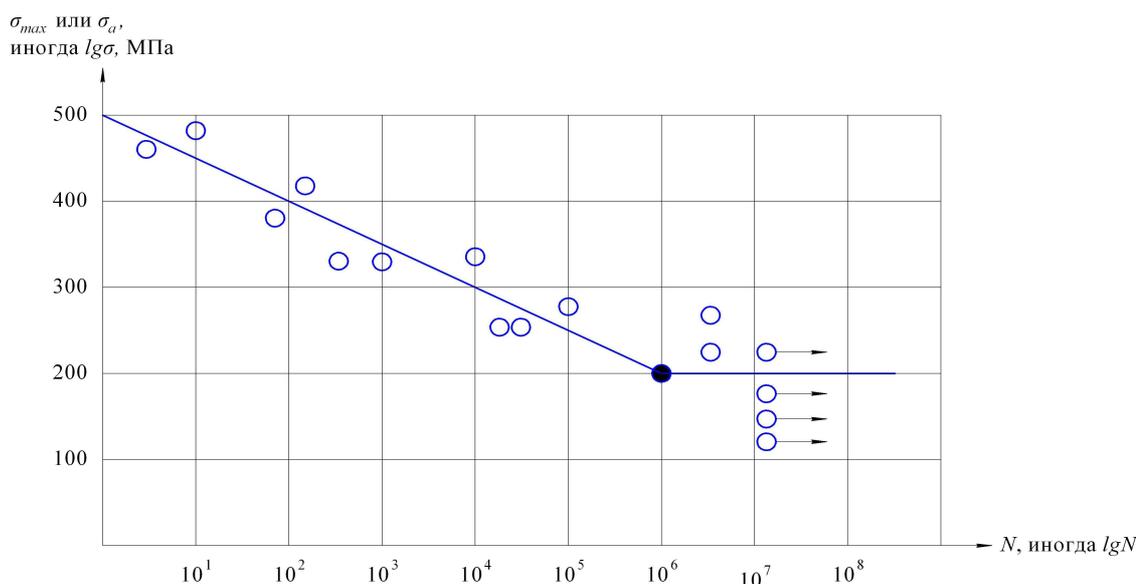


Рисунок 3.5 – Кривые усталости: • - для разрушившихся образцов, $\circ \rightarrow$ - для неразрушившихся образцов

Для получения характеристик сопротивления усталости проводятся испытания не менее 10 одинаковых образцов. Каждый образец испытывается при одной амплитуде напряжений до разрушения или базового числа циклов. Под базовым числом циклов N_B понимается предварительно задаваемое число циклов напряжений, до которого испытывается образец.

Первый образец испытывается при амплитуде напряжений $\sigma_a \approx (0,65 \dots 0,75) \sigma_a$. Постепенное снижение напряжения σ_a приводит к увеличению долговечности образца, под которой понимается число циклов до разрушения.

Для некоторых материалов, например, углеродистых сталей, кривая усталости в полулогарифмической системе координат имеет горизонтальный участок, которому соответствует напряжение σ_r .

Напряжение σ_r называется пределом выносливости материала и представляет собой характеристику его усталостной прочности. Чаще всего испытания проводятся при симметричном цикле напряжений. В этом случае предел выносливости обозначается σ_{-1} .

В процессе длительных испытаний было установлено, что образцы материала, кривая усталости которых имеет горизонтальный участок, не разрушается при $N=10^7$, Не разрушается и при большем числе циклов. Поэтому испытания таких материалов прекращают при $N=10^7$ и в том случае, если они не разрушились. Точки откладывают в правой части графика против базового числа и обозначают стрелками, то есть $\circ \rightarrow$.

Для известных металлов и легированных сталей кривая усталости не имеет горизонтального участка, то есть для них не удастся установить такое число циклов, после которого образец не разрушился в дальнейшем. В подобных случаях за базу испытаний принимается $N=10^8$ циклов. В этом случае под пределом выносливости понимается то наименьшее значение максимального напряжения цикла, при котором происходит разрушение образца при базовом числе циклов, и обозначается этот предел σ_{-1N} .

Результаты усталостных испытаний имеют значительный случайный разброс. Для получения достаточно достоверных характеристик прочности материала при переменных напряжениях необходимо испытать большое число образцов, а результаты испытаний подвергнуть статистической обработке.

Установлены соотношения между пределом выносливости и пределом прочности:

для сталей - $\sigma_{-1} \approx (0,4 \dots 0,5) \sigma_a$,

для цветных металлов - $\sigma_{-1} \approx (0,25 \dots 0,5) \sigma_a$.

Зависимость разрушающих амплитуд σ_a от числа циклов до разрушения (в определенных пределах) имеет вид

$$\sigma_a^m \cdot N = C = const, \quad (3.8)$$

где m, C – постоянные для данного материала. Обычно $m=4 \dots 12$.

Для касательных напряжений $\tau_{-1} = 0,6 \sigma_{-1}$.

3.4 Диаграмма предельных амплитуд

Для получения характеристик сопротивления усталости при асимметричных циклах производятся испытания образцов при различной степени асимметрии и по результатам испытаний строится диаграмма предельных напряжений, характеризующая зависимость между амплитудами циклов σ_a и средними значениями напряжений циклов σ_m .

Введение нового параметра (параметра асимметрии цикла) требует испытания уже нескольких десятков образцов.

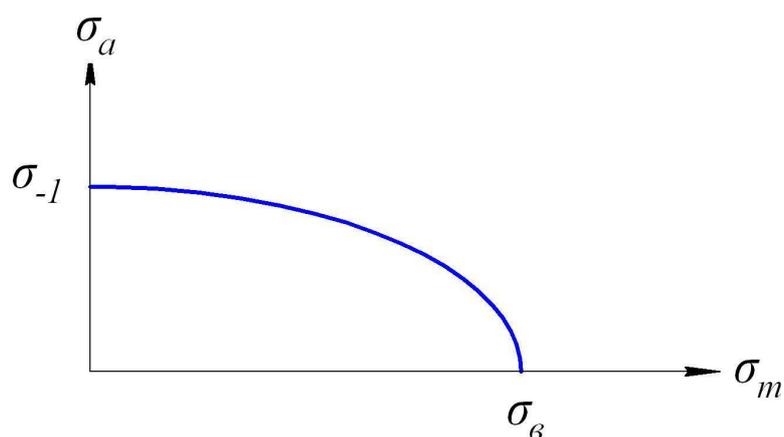


Рисунок 3.6 – Диаграмма предельных амплитуд (напряжений)

Для построения диаграммы партия образцов разбивается на серии. Для каждой серии сохраняется постоянным коэффициент асимметрии r . При переходе от образца к образцу σ_a и σ_m изменяют так, чтобы r оставалось постоянной. Под предельной амплитудой в данном случае понимается то наибольшее значение напряжения, которое при заданном коэффициенте асимметрии не вызывает разрушение образца до базы испытаний.

Назначение диаграммы предельных амплитуд следующее. Допустим, что цикл нагружения образца характеризуется параметрами σ_a и σ_m . Если точка, соответствующая этим значениям σ_a и σ_m оказывается ниже кривой, то рассматриваемый образец способен выдержать неограниченное число циклов или по крайней мере не разрушится до базового числа N_B . Если же точка окажется выше указанной кривой, то образец разрушится при каком-то ограниченном числе циклов или при числе циклов, меньшем базового числа.

Трудоемкая задача построения диаграммы предельных амплитуд упрощается при ее схематизации, представленной на рисунке 3.7.

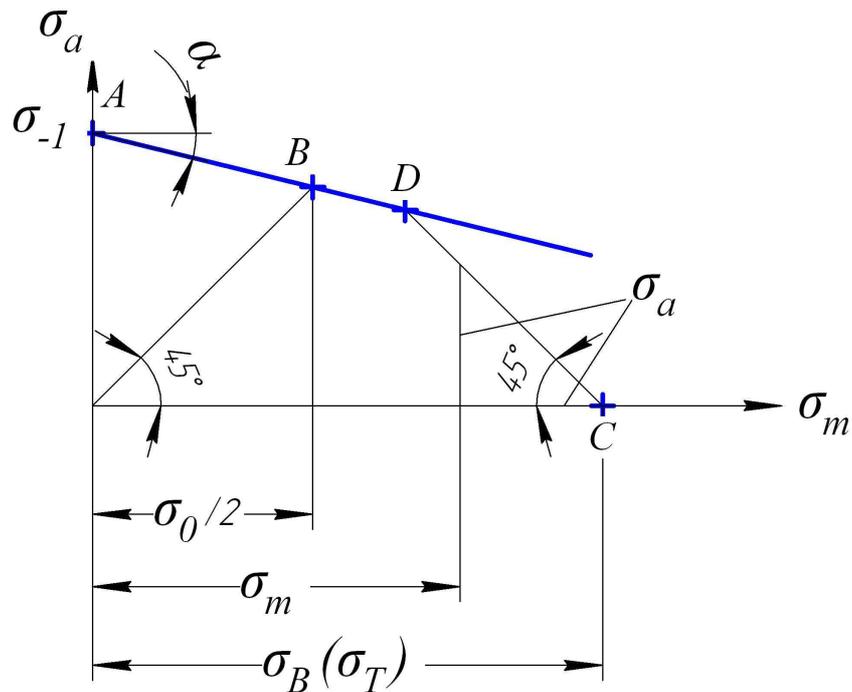


Рисунок 3.7 – Схематизация диаграммы предельных амплитуд

Верхняя часть заменяется прямой, проходящей через точки A и B . Точка A соответствует симметричному циклу, а точка B – пульсационному (отнулевому) циклу с параметрами $\sigma_a = \sigma_m = \frac{\sigma_0}{2}$. Прямая AD описывается уравнением

$$\sigma_a = \sigma_{-1} - \operatorname{tg} \alpha \cdot \sigma_m, \quad (3.9)$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\sigma_{-1} - \sigma_a}{\sigma_m} = \frac{\sigma_{-1} - \frac{\sigma_0}{2}}{\frac{\sigma_0}{2}} = \frac{2\sigma_{-1} - \sigma_0}{\sigma_0} = \psi_\sigma. \quad (3.10)$$

Если материал хрупкий, то правая часть диаграммы заменяется прямой, наклоненной к оси σ_m под углом 45° и проходящей через точку C , соответствующую пределу прочности материала при постоянном во времени нагружении. Для точек этой прямой справедливо равенство

$$\sigma_a + \sigma_m = \sigma_B, \quad (3.12)$$

из которого следует, что максимальное напряжение не должно превосходить предела прочности материала.

Если материал обладает пластическими свойствами, то абсцисса C выбирается равной пределу текучести материала σ_T .

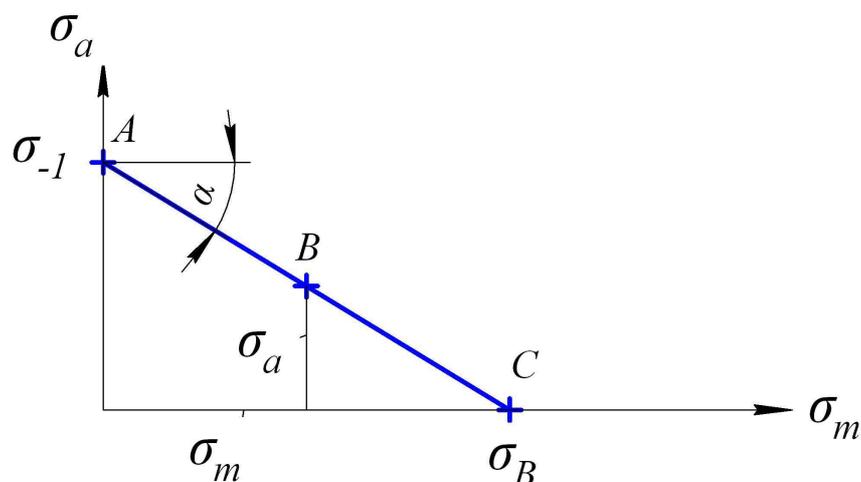


Рисунок 9.8 – Упрощенная диаграмма предельных амплитуд

Уравнение прямой AC имеет тот же вид, то есть

$$\sigma_a = \sigma_{-1} - \psi_\sigma \cdot \sigma_m, \quad (3.13)$$

где

$$\psi_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_B}. \quad (3.14)$$

3.5 Факторы, влияющие на усталостную прочность материала

На величину предела выносливости материала оказывают влияние многие факторы, такие, например, как концентрация напряжений, масштабный фактор, качество обработки поверхности, внешняя среда и т.д.

3.5.1 Концентрация напряжений

Концентрация напряжений при циклическом изменении нагрузки вызывает в зоне очага концентрации зарождение и последующий рост трещины, который завершается усталостным разрушением. Для учета влияния концентрации напряжений на предел выносливости вводится эффективный коэффициент концентрации напряжений, равный отношению

предела выносливости гладкого образца σ_r и образца с концентратором напряжений σ_{rk} , то есть

$$K_\sigma = \frac{\sigma_r}{\sigma_{rk}} = \beta. \quad (3.15)$$

Экспериментально установлено, что коэффициент $K_\sigma = \beta$ уменьшается с увеличением коэффициента асимметрии цикла, то есть по мере приближения нагружения к статическому, так как местные напряжения оказывают малое влияние на статическую прочность материала.

Коэффициент K_σ должен определяться для различных значений r . Из-за недостатка экспериментальных данных используют значения K_σ для симметричного цикла:

$$K_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1k}} = \beta. \quad (3.16)$$

Влияние концентрации напряжений на предел выносливости иногда учитывается коэффициентом чувствительности материала к местным напряжениям

$$q = \frac{\beta - 1}{\alpha - 1}, \quad (3.17)$$

где $\alpha = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}}$ - теоретический коэффициент концентрации напряжений (рисунок 3.9).

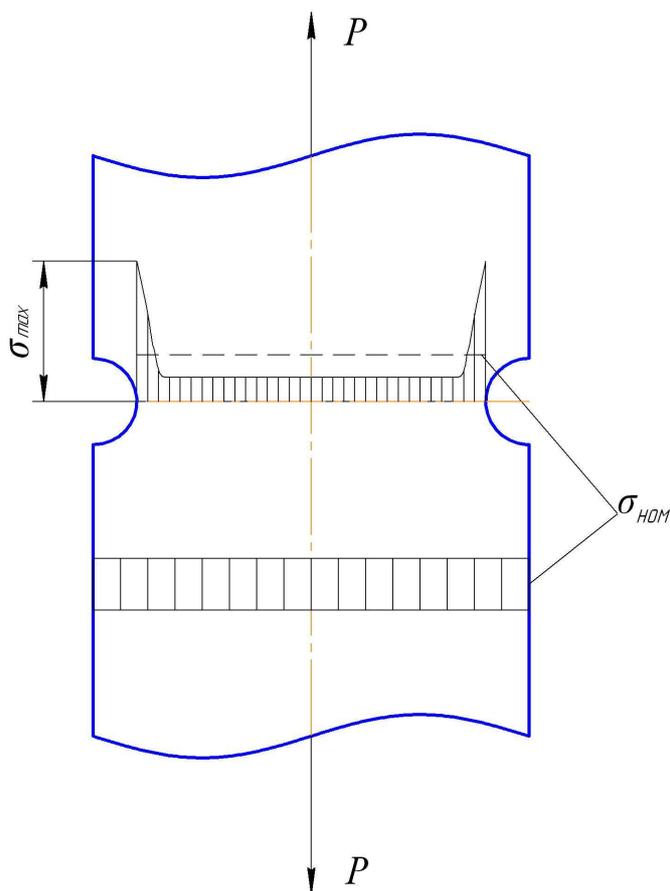


Рисунок 3.9 – Напряжения для теоретического концентратора напряжений

Коэффициент q зависит от свойств материала. Для конструкционных сталей $q=0,6...0,8$. Более прочным сталям соответствуют большие значения q . Поэтому применение высокопрочных материалов при переменных нагрузках не всегда целесообразно.

3.5.2 Масштабный фактор

Испытания показывают, что усталостная прочность образцов снижается с увеличением площади поперечного сечения. Зависимость между пределом выносливости и площадью поперечного сечения имеет асимптотический характер. Из чего следует, что для очень больших образцов предел выносливости оказывается неизменным. Длина образцов оказывает меньшее влияние на усталостную прочность по сравнению с размерами поперечного сечения.

Снижение усталостной прочности с увеличением размеров детали получили название масштабного фактора.

Можно назвать следующие причины масштабного фактора:

- статический фактор – большая вероятность появления дефектов и перенапряженных зерен материала, что приводит к увеличению вероятности разрушения;

- технологический фактор – влияние способа обработки детали в процессе изготовления;

- производственный фактор – ухудшение качества материала с увеличением объема детали, поковки и т.д.

Влияние абсолютных размеров детали на предел выносливости материала учитывается с помощью коэффициента масштабного фактора.

В некоторых случаях в справочной литературе значения эффективных коэффициентов концентрации напряжений приводятся с учетом масштабного фактора.

3.5.3 Качество поверхности

Результаты испытаний свидетельствуют о том, что предел выносливости, полученный для образцов с полированной поверхностью, выше, чем для образцов со шлифованной поверхностью, а σ_r у последних выше, чем у образцов с поверхностью, обработанную резцом и т.п. Это объясняется тем, что у образцов после обработки резцом на поверхности имеются надрезы, царапины, которые при действии переменных во времени нагрузок провоцируют зарождение и последующее развитие трещин.

Для повышения усталостной прочности деталей используются технологические методы упрочнения их поверхностного слоя путем обдувки дробью, обработка ультразвуком, закалка ТВЧ. При этом в поверхностном слое формируются сжимающие напряжения, которые затрудняют развитие усталостных трещин. Кроме того, вследствие наклепа происходит повышение прочности материала в поверхностном слое.

Влияние технологических факторов учитывается при помощи коэффициента поверхностного упрочнения.

3.5.4 Внешняя среда

Резкое снижение предела выносливости вызывает коррозия. При этом в поверхностных слоях возникают трещины, в основном внутрикристаллические. Около небольших местных коррозионных повреждений возникает концентрация напряжений, причем на дне коррозионной полости появляются максимальные напряжения. Это приводит к более интенсивному развитию коррозии и к последующему углублению усталостных трещин. Снижение предела выносливости более существенно для высококоррозионных сталей. В целях защиты конструкции от коррозии применяют различные защитные (антикоррозионные) покрытия поверхностей, например, их окраску.

3.6 Коэффициент запаса при циклическом нагружении

При расчете конструкции необходимо учитывать снижение предела выносливости, обусловленное названными выше факторами. Это производится по диаграмме предельных амплитуд.

С учетом факторов предельное значение амплитуд σ_a уменьшается в k раз, а сама диаграмма принимает вид, показанный сплошной линией (рисунок 3.10).

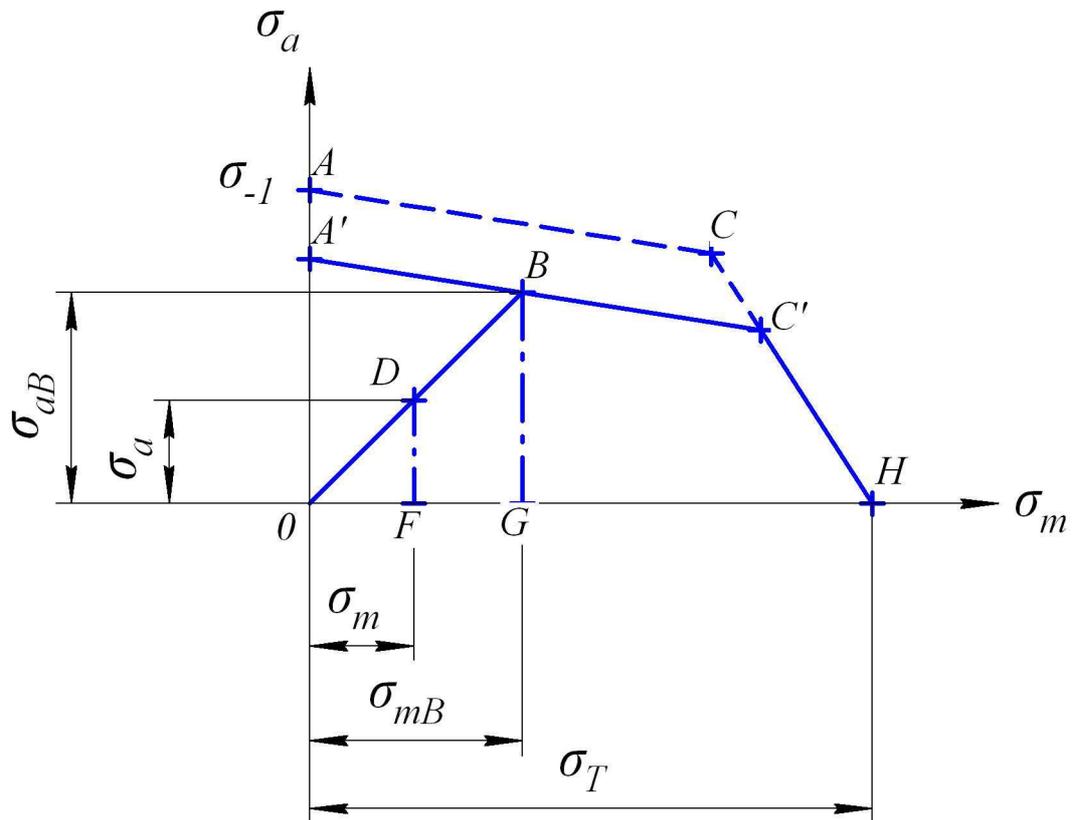


Рисунок 3.9 – Схематизированная диаграмма предельных амплитуд при снижении предела выносливости

Уравнение $A'C'$ имеет вид:

$$\sigma_a = \frac{1}{k}(\sigma_{-1} - \psi\sigma_m). \quad (3.18)$$

Рассмотрим точку D , которой соответствуют расчетные значения напряжений σ_a и σ_m , действующие в элементе конструкции.

Так как точка D находится ниже прямой $A'C'$, то элемент конструкции имеет некоторый запас усталостной прочности. При пропорциональном увеличении амплитуды и среднего значения напряжения цикла (при сохранении коэффициента асимметрии цикла) прямая OD пересечет прямую $A'C'$ в точке B . Под коэффициентом запаса усталостной прочности понимается отношение отрезков

$$n_r = \frac{OB}{OA} = \frac{OG}{OF} = \frac{\sigma_{mB}}{\sigma_m}. \quad (3.19)$$

Для точки В $\sigma_{AB} = \frac{1}{k}(\sigma_{-1} - \psi\sigma_{mB}) = \sigma_{mB} \frac{\sigma_a}{\sigma_m}$. Откуда

$$\sigma_{mB} = \frac{\sigma_{-1}}{k \left(\frac{\psi}{k} + \frac{\sigma_a}{\sigma_m} \right)} = \frac{\sigma_{-1}}{k\sigma_a + \psi\sigma_m} \sigma_m. \quad (3.20)$$

С учетом (3.20) получим

$$n_r = \frac{\sigma_{-1}}{k\sigma_a + \psi\sigma_m}. \quad (3.21)$$

Из рассмотрения прямой $C'H$ на диаграмме предельных амплитуд найдем условия прочности, в соответствии с которым максимальное напряжение цикла $\sigma_{\max} = \sigma_m + \sigma_a$ не может превышать предел текучести σ_T (или предел прочности σ_B) материала.

Коэффициент запаса по пределу текучести (или пределу прочности) равен

$$n_T = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\max}} \quad \text{или} \quad n_B = \frac{\sigma_B}{\sigma_{\max}}. \quad (3.22)$$

При проектировании конструкции сначала производится расчет ее на прочность по текучести и только в том случае, когда это условие прочности удовлетворяется, выполняется расчет по усталостной прочности.

3.7 Усталостная прочность при нестационарных нагружениях

В предыдущем анализе усталостной прочности полагалось, что амплитуда напряжений σ_a оставалась неизменной в течении всего срока нагружения конструкции. В большинстве случаев режимы нагружения являются нестационарными, амплитуда σ_a изменяется во времени. Часто эти изменения носят циклический характер. Продолжительность такого цикла, называемого блоком нагружения, обозначается t_B (рисунок 3.11).

Для оценки усталостной прочности элемента конструкции необходимо иметь данные о значениях σ_a и количестве циклов ее повторения на протяжении одного блока нагружения.

Весь интервал изменения напряжений σ разбивается на k отрезков в пределах, каждого из которых амплитуда напряжений σ_{ai} ($i=1,2, \dots, k$) считается постоянной и определяется числом циклов n_i повторения величины σ_{ai} .

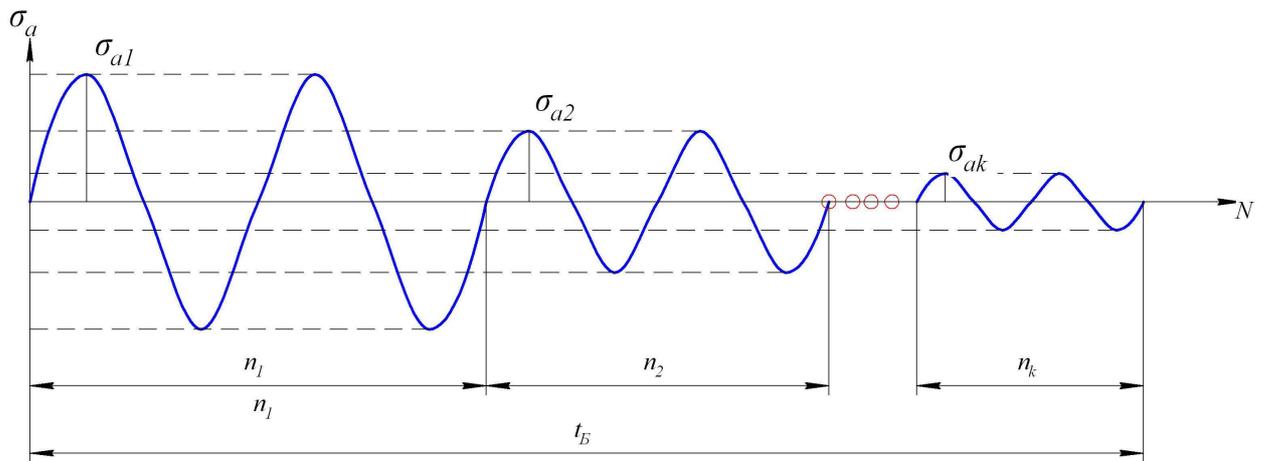


Рисунок 3.11 – Схема блока нагружения

Разбивка интервала изменения напряжения на отрезки, в пределах каждого из которых амплитуда напряжений постоянна.

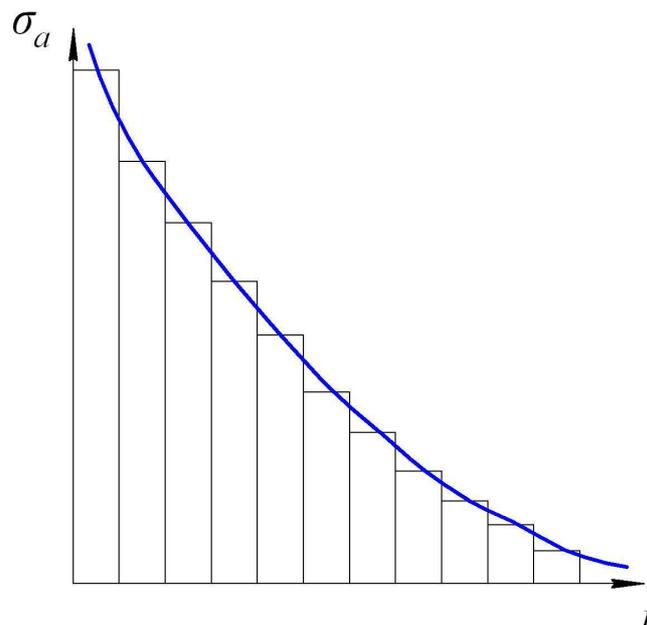


Рисунок 3.12 – Распределение амплитуд напряжений в блоке нагружения

По результатам таких вычислений строится график зависимости σ_{ai} от n_i , представленной на рисунке 3.12. Здесь σ_{ai} убывают с ростом порядкового номера i , в результате чего $\sigma_{a1} = \sigma_{\max}$, $\sigma_{ak} = \sigma_{\min}$.

При неограниченном увеличении числа k ступенчатая функция распределения параметра σ_a переходит в непрерывную функцию.

Число $n_A = \sum_{i=1}^k n_i$ определяет общее число циклов в одном блоке нагружения.

Если общий срок службы элемента конструкции T , то число блоков нагружения, укладываемых в срок службы, равно

$$\lambda = \frac{T}{t_A}, \quad (3.23)$$

а общее суммарное число циклов всех амплитуд напряжений равно λn_A .

Определим число циклов изменения напряжений при нестационарном нагружении, после которых произойдет усталостное разрушение элемента конструкции.

Воспользуемся гипотезой усталостных повреждений, приведенной впервые в 1924 г. Пальмгреном.

Смысл гипотезы следующий. Пусть N_i – число циклов до наступления усталостного разрушения при неизменной амплитуде σ_{ai} . Число N_i может быть найдено с помощью кривой Велера.

Отношение $\frac{n_i}{N_i}$ определяет относительное усталостное повреждение, соответствующее напряжению σ_a и накапливаемого в течении одного блока нагружения.

Усталостному разрушению соответствует равенство

$$\lambda \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1. \quad (3.24)$$

Если $\sigma_{ai} < \sigma_{-1}$ при любом $1 \leq i \leq k$, то разрушение элемента конструкции не происходит.

Гипотеза линейного суммирования повреждений дает достоверные результаты, если все значения амплитуды σ_{ai} превышают предел выносливости и монотонно изменяются во времени без резких всплесков.

Иногда гипотезу линейного суммирования усталостных повреждений записывают в скорректированной форме

$$\lambda \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = \alpha, \quad (3.25)$$

где α определяется на основании многочисленных экспериментов и статистического анализа их результатов. Установлено, что величина α находится в пределах $0,5 \leq \alpha \leq 2,5$.

Здесь под знаком суммы стоит выражение, определяющее степень усталостного повреждения, соответствующего напряжению σ_{ai} и накапливаемого в течении одного блока нагружения. Число блоков за весь срок службы элемента конструкции T находится из равенства

$$\lambda = \frac{\alpha}{\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}} = \frac{T}{t_A}. \quad (3.26)$$

Из (2.26) можно получить теоретическое значение срока службы элемента конструкции

$$T = \frac{\alpha t_A}{\sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i}}. \quad (3.27)$$

Относительное усталостное повреждение $\frac{n_i}{N_i}$ можно увязать с энергией деформацией, получаемой элементом конструкции.

Можно сказать, что элемент конструкции разрушится при накоплении в необратимой форме энергии A от числа циклов N_i , а при приложении числа циклов n_i элементом конструкции будет накоплена необратимая энергия a_i .

Можно записать

$$\frac{a_i}{A} = \frac{n_i}{N_i}, \quad (3.29)$$

откуда $a_i = A \frac{n_i}{N_i}$ и $\sum_{i=1}^k a_i = A$, а

$$A \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = A. \quad (3.29)$$

Из выражения (3.29) и получается условие усталостного разрушения (3.24), соответствующее одному блоку нагружения λ . Условие (3.25) имеет место при $\sigma_{ai} > \sigma_{-1}$.

При $\sigma_{ai} < \sigma_{-1}$ разрушение элементов конструкции не происходит при любом $1 \leq i \leq k$.

Действительное значение ресурса T_{pec} принимается с учетом ряда обстоятельств на основании формулы:

$$\dot{O}_{\delta \bar{a} \bar{n}} = \frac{\dot{O}}{\eta}, \quad (3.30)$$

где $\eta = \eta_1 \eta_2 \eta_3 \eta_4 \eta_5$. (3.31)

Здесь η_1 – коэффициент, учитывающий соответствие программы испытаний условиям эксплуатации ($1 \leq \eta_1 \leq 1,5$);

η_2 – коэффициент, учитывающий степень опасности разрушения элемента конструкции ($1 \leq \eta_2 \leq 1,5$);

η_3 – коэффициент, учитывающий достоверность данных о повторяемости нагрузок ($1,5 \leq \eta_3 \leq 2$);

η_4 учитывает разброс свойств выносливости, принимается в зависимости от числа испытанных образцов в пределах $1,5 \leq \eta_4 \leq 5$;

η_5 – коэффициент, учитывающий степень влияния реальных условий эксплуатации. При отсутствии информации о влиянии этих условий на характеристики выносливости принимается $\eta_5 \leq 1,5$.

3.8 Малоцикловая усталость

При многоцикловом усталостном разрушении материал элемента конструкции деформируется упруго. Разрушение начинается в местах концентрации напряжений в результате развития зародившейся трещины и носит хрупкий характер (без появления заметных пластических деформаций).

Другим видом усталости является малоцикловая усталость. Малоцикловое усталостное разрушение происходит при повторных упругопластических деформациях. В зоне излома при малоцикловом усталостном разрушении фиксируется наличие макроскопической пластической деформации.

Строгой границы между многоцикловой и малоцикловой усталости провести нельзя. Накопленную одностороннюю пластическую деформацию в диапазоне числа циклов от 1 до 10^3 следует рассматривать как критерий квазистатического разрушения. Нагружение при умеренных пластических деформациях заканчивается постепенным развитием трещины при числе циклов от 10 до $5 \cdot 10^4$.

В СНиП II-23-81 отмечается, что проверку элементов стальных конструкций на малоцикловую прочность следует выполнять при числе циклов меньшем 10^5 .

3.8.1 Зависимость между напряжениями и деформациями при малоцикловой усталости

Закономерности малоцикловой прочности занимают «промежуточное» положение между закономерностями статической прочности и сопротивлением усталости.

При числе циклов $N > 10^4$ отчетливо проявляется закономерности усталостного разрушения сказывается влияние концентрации напряжений, качество поверхности и т.д. При малом числе циклов $N < 10^3$ более типичны особенности статического разрушения.

При малом числе циклов амплитуда напряжений может превосходить предел пропорциональности, а при повторных разгрузках и нагрузках зависимость между напряжениями и деформациями принимает вид петель циклического упругопластического деформирования (петель гистерезиса) с размахом – шириной петли – пластических деформаций $\Delta\varepsilon_p$ (рисунок 3.13). При умеренных нагрузках, допустимых для обеспечения достаточно продолжительной работы элемента конструкции, петля деформирования после нескольких «приработочных» циклов обычно стабилизируется, как это и показано на рисунке 3.13.

Для обеспечения достаточно высокой малоциклового прочности материал должен иметь хорошее сочетание прочностных и пластических свойств, а в элементе конструкции следует избегать зон с высокой концентрацией напряжений.

Малоцикловую прочность материала оценивают по экспериментальным зависимостям амплитуды напряжений σ_a или деформаций ε_a от числа циклов N до разрушения (рисунок 3.14).

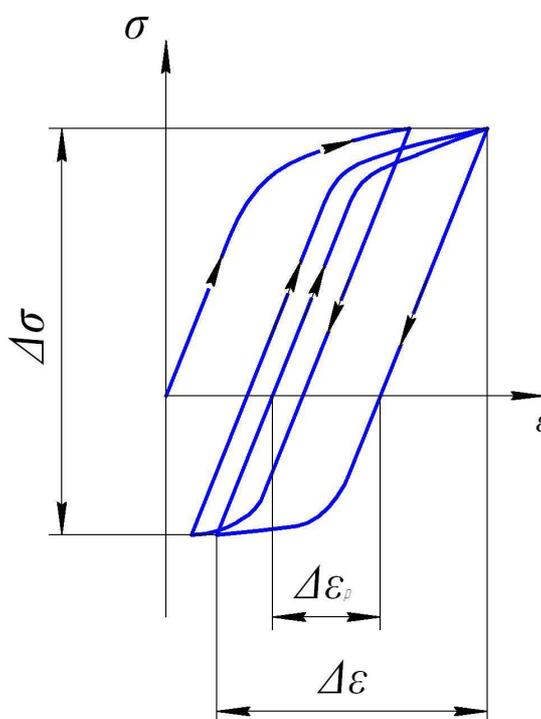


Рисунок 3.13 – Петля гистерезиса при повторном упругопластическом деформировании

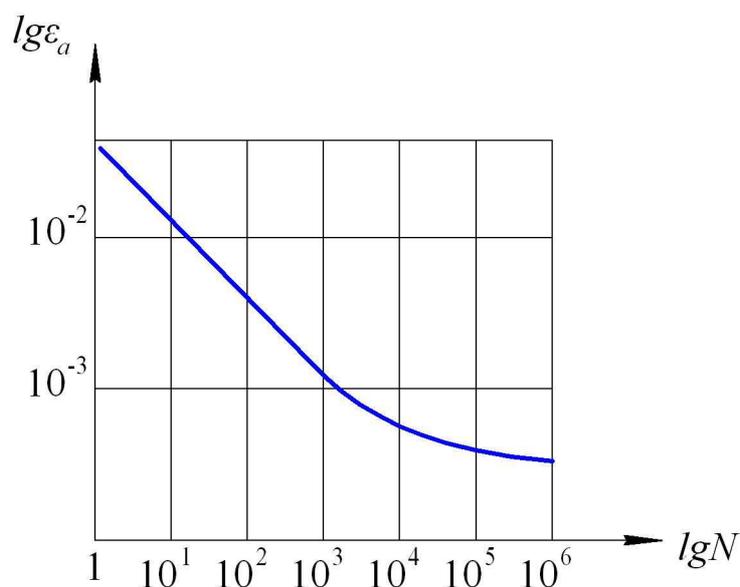


Рисунок 3.14 – Типичная кривая малоциклового усталости углеродистой стали

Проанализируем связь между напряжениями, меняющимися во времени, и деформациями. С этой целью рассмотрим схематизированную диаграмму деформирования материала с линейным упрочнением, показанную на рисунке 3.15а. Рядом с этой диаграммой приведён на рисунке 3.15б график изменения напряжений во времени.

При первом нагружении вдоль кривой $OA_1B_1C_1$ точка, получение которой характеризует состояние материала, движется по диаграмме деформирования $\sigma(\epsilon)$ по линии $OABC$. Затем напряжения уменьшаются, и та же точка движется по линии CDE . При достижении напряжением минимального значения начинается его возрастание, и деформирование реализуется по замкнутому многоугольнику $EBCDE$.

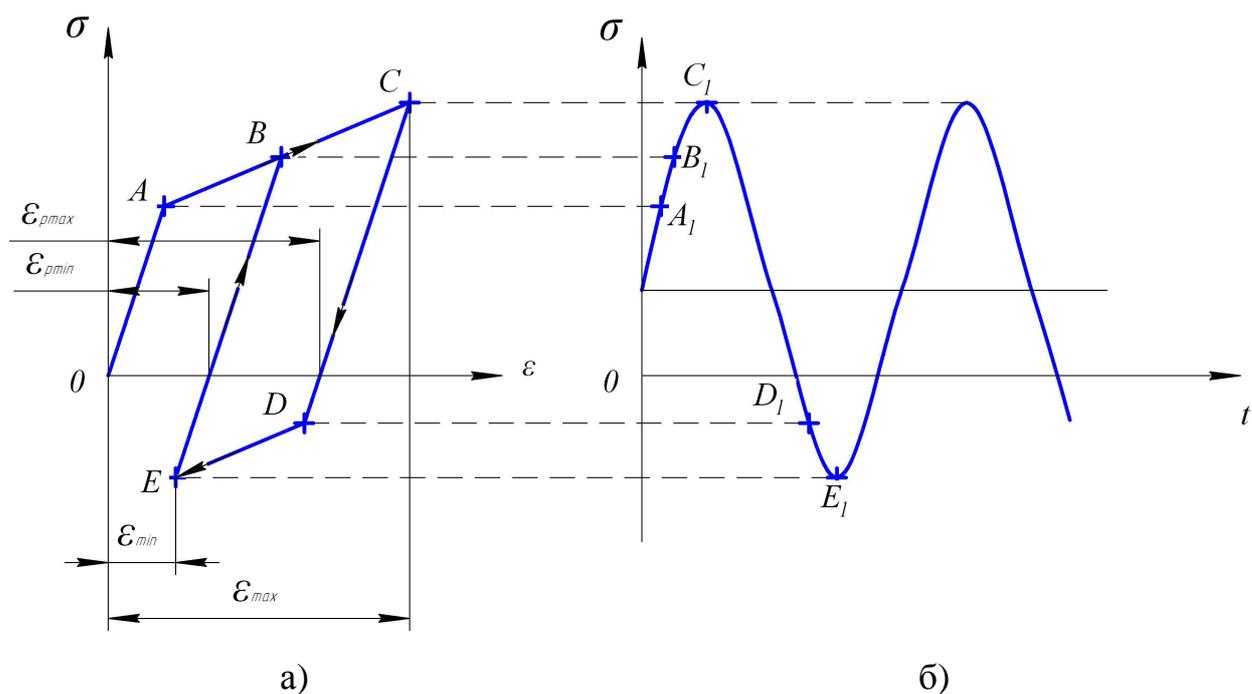


Рисунок 3.15 – Схематизированная диаграмма деформирования материала (а) и график изменения напряжений во времени (б)

Из рисунка 3.15а видно, что размах деформации за один цикл равен

$$\Delta \epsilon = \epsilon_{max} - \epsilon_{min}, \quad (3.32)$$

А размах пластических деформаций составляет

$$\Delta \epsilon_p = \epsilon_{pmax} - \epsilon_{pmin}. \quad (3.33)$$

Здесь $\epsilon_{pmax}, \epsilon_{pmin}$ - максимальная и минимальная пластические деформации при циклическом изменении напряжений.

Характер разрушения при малоцикловой усталости зависит от способности материала к накоплению пластических деформаций при циклическом деформировании.

По этой способности материалы относят к циклически стабильным, если остаточная деформация не меняется во всех циклах. Особенности деформирования таких материалов иллюстрируются примером, рассмотренным на рисунке 3.15.

Для циклически разупрочняющихся материалов характерны увеличение остаточных деформаций и рост суммарной пластической деформации.

Если остаточная деформация уменьшается от цикла к циклу, а суммарная пластическая деформация стремится к некоторому предельному значению, то такой материал относится к категории циклически упрочняющихся.

Одним из способов повышения элементов конструкции малоциклового усталостному разрушению является изготовление их из циклически упрочняющихся материалов.

3.8.2 Оценка долговечности элементов конструкций, работающих в условиях малоциклового усталости

Работоспособность элемента конструкции характеризует число циклов N , которое элемент выдерживает до разрушения.

Основополагающие предложения по оценке малоциклового усталости сделаны в работах Коффина и Мэнсона, ставшими классическими.

Малоцикловая усталость реализуется в условиях нагружения, происходящего при умеренных пластических деформациях и заканчивается постепенным развитием трещины при числе циклов - от 10 до $5 \cdot 10^4$.

Механизм малоциклового усталости определяется повторными пластическими деформациями. Для его описания используются деформационные критерии.

Простейший деформационный критерий малоциклового усталости – критерий Коффина-Мэнсона:

$$N^m \Delta \varepsilon_p = c, \quad (3.34)$$

где $\Delta \varepsilon_p$ - размах пластической деформации цикла, m, c – эмпирические постоянные материала, N – число циклов до разрушения.

Согласно критерию (3.34) разрушение происходит при достижении пластической деформацией критического значения. Эмпирические постоянные получают обработкой экспериментальных кривых циклической стойкости исследуемого материала.

Для углеродистых сталей $m=0,5$. Постоянную c выражают через истинную предельную деформацию $[\varepsilon]_p$ при стандартных испытаниях на растяжение (по ГОСТ 270-75).

Частный случай критерия (3.34) для углеродистой сталей имеет вид:

$$N^{0,5} \Delta \varepsilon_p = 0,5 [\varepsilon]_p. \quad (3.35)$$

Ожидаемая циклическая стойкость для критерия (3.34):

$$N = \sqrt{\frac{c}{\Delta \varepsilon_p}}. \quad (3.36)$$

Правило суммирования повреждений для случая малоциклового усталости имеет вид

$$\sum_{k=1}^N \frac{1}{N_{\beta}(\Delta \varepsilon_{pk})} = 1. \quad (3.37)$$

Рассмотренные критерии применимы при малых остаточных деформациях.

Если же нагружение не является жестким, то учет влияния остаточных деформаций обязателен.

Так на основе большого статистического материала по испытаниям циклически стойких полиуретанов рекомендуется следующий критерий

$$N^m (\Delta \varepsilon_p + A \varepsilon_0) = c, \quad (3.38)$$

где m, c, A – эмпирические постоянные, ε_0 – размах остаточной деформации, $\Delta \varepsilon_p$ – размах деформации цикла.

Постоянные m, c, A получают экспериментальной обработкой кривых циклической стойкости материала при варьировании величины $\Delta \varepsilon_p$, построенных не менее, чем по трем точкам.

Для полиуретанов ЛУР (литьевые уретаны) при режимах нагружения $\Delta \varepsilon_p = 100, 200$ и 300% на приборе ХР-08 для пульсирующего цикла с частотой 5 Гц значение m получено в пределах $0,150 \dots 0,465$.

Прогнозируемая циклическая стойкость определяется из (3.38) в виде

$$N = \sqrt[m]{\frac{c}{(\Delta \varepsilon_p + A \varepsilon_0)}}. \quad (3.39)$$

Правило суммирования повреждений остается прежним.

Рассмотрим эмпирическую формулу Мэнсона. При отсутствии прямых экспериментальных данных для получения сравнительных оценок можно пользоваться формулой Мэнсона или одной из ее модификаций. Связь между размахом полной деформации $\Delta \varepsilon = 2\varepsilon_a$ и осредненным числом циклов до разрушения N представляется в виде:

$$\Delta \varepsilon = 2\varepsilon_a = \left(\ln \frac{1}{1-\psi} \right)^{0,6} N^{-0,6} + 3,5 \frac{\sigma_B}{E} N^{-0,12}, \quad (3.40)$$

где ψ – относительное сужение поперечного сечения, E – модуль упругости.

Первое слагаемое описывает изменение пластической деформации, второе – изменение упругой деформации от числа циклов N до разрушения.

Для асимметричных циклов со средним напряжением σ_m в формуле (3.40) вместо σ_B принимают $(\sigma_B - \sigma_T)$.

Если известен предел выносливости σ_{-1} при базовом числе циклов N_B и показатель кривой выносливости m , то формула (3.40) может быть представлена в виде:

$$\Delta \varepsilon = 2\varepsilon_a = \left(\ln \frac{1}{1-\psi} \right)^{0,6} N^{-0,6} + 2 \frac{\sigma_{-1}}{E} \left(\frac{N_A}{N} \right)^{1/m} \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_B} \right). \quad (3.41)$$

В среднем $m \approx 8$.

Наиболее полно прочность элементов конструкций, узлов и машин в целом оценивается при проведении специальных циклических испытаний по режимам наиболее приближенным соответствующим типичным эксплуатационным циклам.

Зависимость амплитуды деформаций от числа циклов до зарождения усталостной трещины (усталостное разрушение) представляется в виде:

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma_f'}{E} (N_p)^b + \varepsilon_f' (N_p)^c. \quad (3.42)$$

Здесь σ_f' - коэффициент усталостной прочности,
 b – экспонента усталостной прочности (экспонента Басквина),
 ε_f' - коэффициент усталостной пластичности (вязкости), c – экспонента усталостной пластичности (экспонента Мэнсона-Коффина), N_p - число циклов до разрушения, ε_a - амплитуда циклической деформации, включающая упругую и пластическую составляющие.

Это уравнение получило название уравнения Басквина – Мэнсона – Коффина. Оно также может быть использовано при прогнозировании долговечности в малоцикловой области усталостного разгружения.

Коэффициенты уравнения Басквина – Мэнсона – Коффина σ_f' , b , ε_f' и c определяются по результатам усталостных испытаний образцов согласно ГОСТ 25.505-85 (Метод испытаний на малоцикловую усталость при термомеханическом нагружении).

4 МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КОНСТРУКТИВНОЙ НАДЕЖНОСТИ

4.1 Подходы к оценке прочности конструкций

Требование, согласно которому конструкция должна воспринимать внешние нагрузки, действующие на нее в течение всего периода эксплуатации, и при этом не терять своей способности нормально функционировать, является естественным. Это свойство конструкции можно количественно охарактеризовать функцией несущей способности $R(t)$, адекватной соответствующей функции внешнего нагружения $N(t)$. Значение $R(t)$ определяется геометрическими параметрами элементов конструкции и физико-механическими свойствами их материала.

В пределах отдельных режимов эксплуатации конструкции структура внешних воздействий обычно является постоянной. Тогда несущие способности отдельных частей и конструкции в целом (при отсутствии усталостных повреждений) также можно считать постоянными. При расчленении конструкции на m частей, а процесса эксплуатации изделия на n режимов функция резерва несущей способности конструкции определяется в общем случае разностью текущих значений функций $R_{ik}(t)$ и $N_{ik}(t)$:

$$\psi_{ik}(t) = R_{ik}(t) - N_{ik}(t) \quad (i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m). \quad (4.1)$$

Условие равенства нулю резерва несущей способности используется в проектировочных расчетах и устанавливает требуемое значение функции несущей способности. Требуемое значение несущей способности определяет необходимые геометрические размеры всех силовых элементов конструкции и оказывает существенное влияние на выбор их материала. Очевидно, что чем выше требуемая несущая способность, тем больше металлоемкость изделия (при условии, что при создании конструкции не используются новые материалы, характеризующиеся более высокой удельной прочностью). Поэтому выявление требуемого значения функции несущей способности

является основной задачей теории проектирования конструкций и одной из проблем теории прочности и теории надежности.

Проверка прочности и надежности элементов силовой конструкции на отдельных режимах эксплуатации осуществляется исходя из условия

$$\psi_{ik}(t) = R_{ik}(t) - N_{ik}(t) \geq 0 \quad (4.2)$$

или

$$R_{ik}(t) \geq N_{ik}(t).$$

Аналогичные соотношения для конструкции в целом имеют вид

$$\psi(t) = R(t) - N(t) \geq 0 \quad (4.3)$$

или

$$R(t) \geq N(t).$$

Сложившаяся практика оценки несущей способности $R(t)$ и функции нагружения $N(t)$ и, таким образом, расчета прочности элементов конструкции, в том числе в ведущих в промышленном отношении странах, основана на нормативном подходе, традиционных методах строительной механики и использовании концепции коэффициентов безопасности.

Нормативные методы существенно упрощают решение многих задач, связанных с проектированием конструкций. Именно этим можно объяснить столь широкое использование материалов нормативного характера в авиастроении, строительстве, проектировании продуктопроводов и т.д. Роль подобных нормативных материалов в условиях наличия противоречивых требований при проектировании трудно переоценить.

Из-за недостаточной информации об эксплуатационных нагрузках и весьма приближенного представления о значениях механических характеристик материала конструкции, определяющих его сопротивление внешним нагрузкам, основным методом оценки прочностной надежности до настоящего времени является назначение запасов прочности. Значение этих

запасов принимаются в зависимости от стабильности условий нагружения, справочных данных о механических характеристиках, уровня технологии и ряда других факторов. Допустимые значения запасов прочности назначают с учетом инженерного опыта создания подобных конструкций. До настоящего времени отсутствуют теоретическое и экспериментальное обоснования составляющих запаса прочности, не учитывается стохастическая природа действующих квазистатических и циклических нагрузок и характеристик используемых конструкционных материалов, что приводит к существенному увеличению металлоемкости конструкций и назначению неоправданно высоких значений коэффициентов безопасности. Так, например, в соответствии со СНиП 2.05.06-85* суммарный запас прочности из условий работы трубопровода, надежности по материалу, по нагрузке и т.п. составляет около 5,0.

Современные нормативные документы устанавливают расчетную схему и общие правила расчета прочности.

Большую роль в нормативных расчетах прочности и надежности конструкций и играют способы задания нагрузок.

Особым видом нагружения конструкций являются нагрузки, оказывающие статические и динамические воздействия. В общем случае такие нагрузки представляют собой нестационарный случайный неоднородный по оси элемента конструкции. Однако нормативными расчетами предусмотрено сведение ветровой нагрузки к детерминированному воздействию, представляющему собой суперпозицию средней и пульсирующей составляющих.

В существующих нормативных методах предусматриваются особенности проектирования и эксплуатации трубопроводов в условиях значительного интервала температуры окружающей среды в течение года, сплошного или островного распространения многолетнемерзлых грунтов, неоднородного морозного пучения из-за промерзания водонасыщенных

грунтов, морозобойного растрескивания грунтов при сильных морозах и других факторов, типичных для северных районов.

При оценке взаимодействия конструкции трубопровода с пучинистыми грунтами выделяют два подхода. В первом случае определяют силы морозного пучения как контактные нагрузки на трубопровод, исходя из принятых расчетных схем. Во втором подходе рассматривается кинематическое воздействие на трубопровод, обусловленное заданным профилем грунта, сложившимся в результате пучения. На практике расчет взаимодействия трубопроводов с промерзающим пучинистым грунтом проводят на более простых моделях типа жесткопластических винклеровских. Такое решение дает консервативную оценку, завышая реальное сопротивление грунта.

Проблема обеспечения прочности и надежности подводных трубопроводов имеет ряд особенностей, обусловленных теплофизическим взаимодействием продуктопровода с окружающей средой. Кроме того, под действием подводных течений происходит размывка грунтовой насыпи, что в условиях положительной плавучести приводит к подвсплытию трубопровода и образованию провисших участков. При неплотном прилегании подводного трубопровода ко дну при наличии течения возможно возникновение колебаний. Колебания трубопровода, сопровождающиеся прогрессирующим разрушением грунтовой засыпки, рассматриваются на основе балочной модели.

Прокладка глубоководных трубопроводов привела к проблеме обеспечения местной устойчивости в условиях большого гидростатического давления. В начальный момент времени повреждение возникает в некотором наиболее нагруженном сечении оболочки. Затем происходит потеря устойчивости оболочки в виде «схлопывания» сечения на участках значительной протяженности. Такое изменение силовой схемы конструкции может привести к общей потере устойчивости в продольном направлении в результате изгиба продуктопровода.

Нормативный подход имеет и недостатки.

Во-первых, наблюдается традиционность в проектировании. Из-за этого нередко нормативные материалы превращаются в своего рода тормоз на пути совершенствования показателей металлоемкости конструкции.

Во-вторых, наблюдается нарушение системного подхода к проблеме. При этом нормативные материалы не охватывают весь комплекс вопросов, связанных с оценкой требуемых значений несущей способности, а ограничиваются регламентацией лишь некоторых из них. В существующих материалах основных отраслей техники отсутствуют явные количественные связи нормативных нагрузок и соответствующих поправочных коэффициентов с требуемой надежностью конструкций в целом и их частей. В сущности, при таком подходе уровень надежности конструкций оценивается лишь качественно.

В-третьих, при реализации детерминистического нормативного подхода не может быть в полном объеме учтено разнообразие условий эксплуатации трубопровода, сочетание различных факторов, статистический разброс механических свойств материала, геометрических параметров, начальная дефектность элемента конструкции.

Указанные обстоятельства обуславливают повышение удельного веса вероятностных моделей при расчете конструкций.

Статистическая интерпретация нормативных расчетов основана на моделях, использующих элементарные понятия теории вероятностей. Эти модели вполне применимы, если нагружение представляет собой единичный дискретный акт или последовательность таких актов и можно исключить из рассмотрения временные эффекты, процессы накопления повреждений и т.п. С некоторыми оговорками эти модели могут быть использованы также для нагрузок, непрерывно развертывающихся во времени, если в расчеты ввести распределение максимальных значений нагрузок на всем рассматриваемом отрезке времени.

4.2 Связь коэффициента безопасности с показателями уровня прочностной надежности (вероятности безотказной работы)

Установим связь между показателями уровня прочностной надежности, т.е. вероятности безотказной работы, с традиционным для детерминированных прочностных расчетов коэффициентом безопасности f с учетом рассеивания значений тех параметров, которые используются в вычислениях.

При проведении инженерных прочностных расчетов вводится понятие коэффициента запаса прочности η . Величина этого запаса находится как отношение минимального значения допустимого (предельного) напряжения для рассматриваемого элемента конструкции к максимальному значению напряжения, вызванного внешними нагрузками, в наиболее опасной точке (или сечении) данного элемента.

В большинстве случаев, встречающихся в практике инженерных прочностных расчетов, существует линейная связь между напряжениями и нагрузками. В этих условиях можно принять, что величина коэффициента запаса прочности будет равна

$$\eta = \frac{R^H(t)}{N^P(t)}; \quad (4.4)$$

где $R^H(t)$ – нормативная несущая способность конструкции, определяемая с учетом минимальных значений разрушающих напряжений и жесткостных характеристик силовых элементов; $N^P(t)$ – максимальное значение расчетной нагрузки. Последняя величина находится как произведение нормативной максимальной в эксплуатации нагрузки $N^H(t)$ на нормативный коэффициент безопасности f :

$$N^P(t) = f N^H(t). \quad (4.5)$$

В качестве нормативных функций нагружения выбираются обычно некоторые маловероятные значения, характеризующие наиболее неблагоприятные сочетания соответствующих внешних силовых факторов.

Допустим, что состояние конструкции в условиях эксплуатации может быть описано конечным числом независимых параметров, которые характеризуют функцию нагружения, несущую способность, отклонение условий работы конструкции от расчетной схемы и т.д. В число этих параметров не включены те величины, которые в конструкции реализуются в точном соответствии с расчетом или с малыми допусками, влиянием которых на работу конструкции можно пренебречь.

Основная задача состоит в определении вероятности H того, что резерв несущей способности не будет исчерпан и в сопоставлении найденной вероятности с некоторым нормативным значением H^H , которое устанавливается на основании технико-экономических соображений, опыта проектирования и эксплуатации и т.д.

Вероятность безотказной работы k -й части конструкции на i -ом режиме нагружения определяется соотношением

$$H_{ik} = P(\psi_{ik} > 0). \quad (4.6)$$

Требуемое (нормативное) значение резерва несущей способности ψ_{ik}^H находится на основании неравенства

$$H_{ik} > H_{ik}^H$$

по известной величине H_{ik}^H . Следовательно, требуемая несущая способность k -ой части конструкции определяется формулой

$$R_{ik}^H = N_{ik}^H + \psi_{ik}^H.$$

Здесь N_{ik}^H – нормативное значение функции нагружения k -ой части конструкции.

Если принять, что R_{ik}^H и N_{ik}^H являются некоррелированными нормально распределенными случайными величинами, то величина резерва несущей способности k -ой части конструкции в i -ом режиме нагружения ψ_{ik}^H тоже будет распределена по нормальному закону с математическим ожиданием $\langle \psi_{ik}^H \rangle = \langle R_{ik}^H \rangle - \langle N_{ik}^H \rangle$ и дисперсией $D[\psi_{ik}^H] = D[R_{ik}^H] + D[N_{ik}^H]$.

Нормативные величины $R^H(t)$ и $N^H(t)$, входящие в выражения (4.4) и (4.5), также имеют связь со статистическими характеристиками. Эту связь для k -ой части конструкции в i -ом режиме нагружения представим в виде

$$\begin{aligned} R_{ik}^H &= \langle R_{ik}^H \rangle - \alpha_{R_{ik}^H} \sqrt{D[R_{ik}^H]}; \\ N_{ik}^H &= \langle N_{ik}^H \rangle + \alpha_{N_{ik}^H} \sqrt{D[N_{ik}^H]}, \end{aligned} \quad (4.7)$$

где $\alpha_{R_{ik}^H}$ и $\alpha_{N_{ik}^H}$ – доли отклонения величин R_{ik}^H и N_{ik}^H от соответствующих значений $\langle R_{ik}^H \rangle$ и $\langle N_{ik}^H \rangle$, выраженные в долях средних квадратических отклонений (рисунок 4.1).

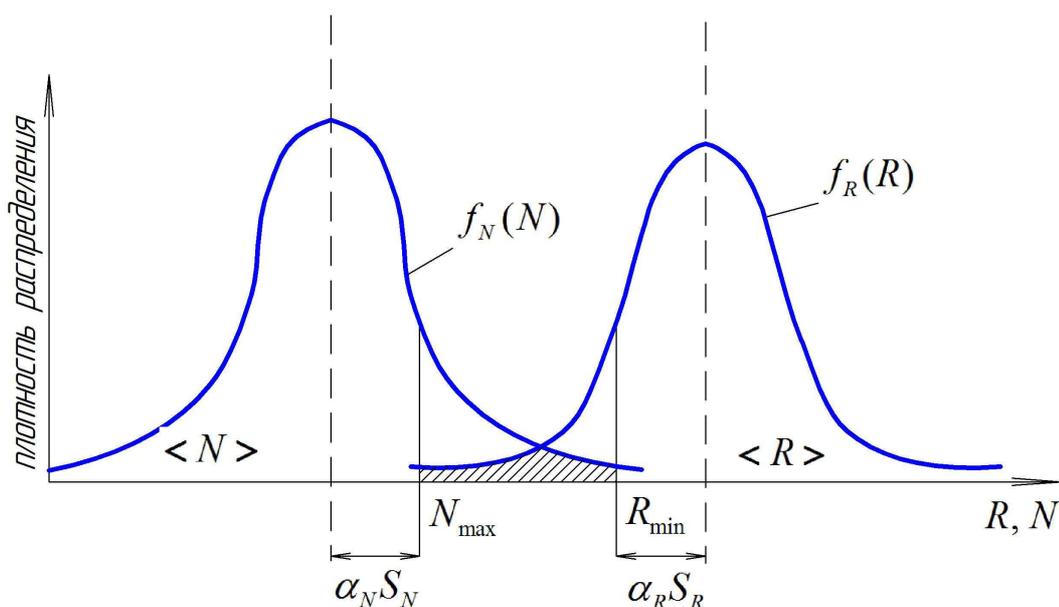


Рисунок 4.1 – Распределение несущей способности и нагрузки

Подставив (4.7) в (4.4) с учетом (4.5) и принимая во внимание выражения для коэффициентов вариации величин R_{ik}^H и N_{ik}^H :

$$\vartheta_{R_{ik}^H} = \frac{\sqrt{D[R_{ik}^H]}}{\langle R_{ik}^H \rangle}; \quad \vartheta_{N_{ik}^H} = \frac{\sqrt{D[N_{ik}^H]}}{\langle N_{ik}^H \rangle}, \quad (4.8)$$

получим следующую формулу для коэффициента запаса прочности:

$$\eta_{ik} = \frac{1}{f} \eta_{ik}^{ysl} \frac{1 - \alpha_{R_{ik}^H} \vartheta_{R_{ik}^H}}{1 + \alpha_{N_{ik}^H} \vartheta_{N_{ik}^H}}, \quad (4.9)$$

где

$$\eta_{ik}^{ysl} = \frac{\langle R_{ik}^H \rangle}{\langle N_{ik}^H \rangle} \quad (4.10)$$

– так называемый условный коэффициент запаса прочности.

Величину, обратную коэффициенту вариации резерва несущей способности, называют гауссовой мерой надежности γ . При этом для величины ψ_{ik} эта мера будет равна

$$\gamma_{ik} = \frac{\langle R_{ik}^H \rangle - \langle N_{ik}^H \rangle}{\sqrt{D[R_{ik}^H] + D[N_{ik}^H]}}. \quad (4.11)$$

Чем больше характеристика надежности γ_{ik} , тем меньше вероятность разрушения.

С учетом выражений (4.8) и (4.10) формулу (4.11) можно привести к удобному для практического использования виду:

$$\gamma_{ik} = \frac{\eta_{ik}^{ysl} - 1}{\vartheta_{R_{ik}^H} \sqrt{(\eta_{ik}^{ysl})^2 + (\vartheta_{N_{ik}^H} / \vartheta_{R_{ik}^H})^2}}. \quad (4.12)$$

Разрешив это квадратное уравнение относительно η_{ik}^{ysl} , получим

$$\eta_{ik}^{\text{усл}} = \frac{1}{1 - \gamma_{ik}^2 \vartheta_{R_{ik}^H}^2} \left\{ 1 + \left[1 - \left(1 - \gamma_{ik}^2 \vartheta_{N_{ik}^H}^2 \right) \left(1 - \gamma_{ik}^2 \vartheta_{R_{ik}^H}^2 \right) \right]^{1/2} \right\} \quad (4.13)$$

$(i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m).$

По формуле (4.9), зная $\eta_{ik}^{\text{усл}}$, можно найти минимальное значение коэффициента безопасности, соответствующее заданной величине η_{ik} :

$$f = \frac{\eta_{ik}^{\text{усл}}}{\eta_{ik}} \frac{1 - \alpha_{R_{ik}^H} \vartheta_{R_{ik}^H}}{1 + \alpha_{N_{ik}^H} \vartheta_{N_{ik}^H}}. \quad (4.14)$$

Следует иметь в виду, что это значение коэффициента безопасности обеспечивает тот уровень вероятности безотказной работы элемента конструкции, который соответствует гауссовой мере надежности γ_{ik} .

Между численными характеристиками надежности – вероятностью безотказной работы H и гауссовой мерой γ – существует связь, имеющая в нашем случае следующий вид:

$$H_{ik} = \Phi(\gamma_{ik}), \quad (4.15)$$

где

$$\Phi(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^z \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$$

– нормальная функция распределения, для которой имеются таблицы значений.

Характер зависимости условного коэффициента запаса прочности от нормативной надежности для различных коэффициентов вариации несущей способности и внешней нагрузки (см. формулы (4.13) и (4.15)) представлен на рисунке 4.2.

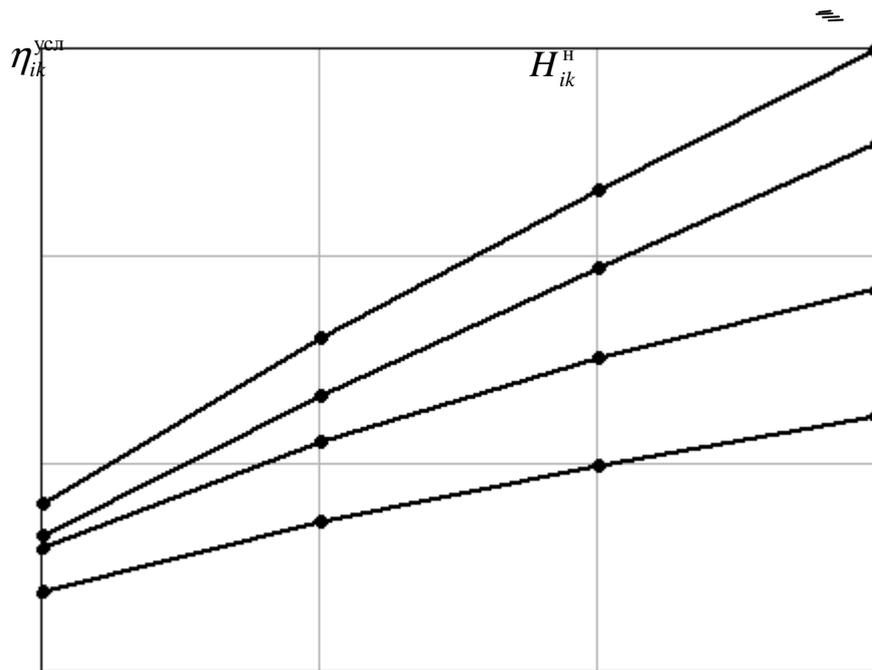


Рисунок 14 – Зависимость коэффициента запаса прочности от нормативной надежности:

$$\begin{aligned}
 1 - \vartheta_{R_{ik}^н} &= 0,1; \vartheta_{N_{ik}^н} = 0,1; & 2 - \vartheta_{R_{ik}^н} &= 0,1; \vartheta_{N_{ik}^н} = 0,05; \\
 3 - \vartheta_{R_{ik}^н} &= 0,1; \vartheta_{N_{ik}^н} = 0,1; & 4 - \vartheta_{R_{ik}^н} &= 0,05; \vartheta_{N_{ik}^н} = 0,05
 \end{aligned}$$

Следует отметить, что для нахождения коэффициента безопасности по формуле (4.14) необходимо задаться еще значениями величин η_{ik} , $\alpha_{R_{ik}^н}$ и $\alpha_{N_{ik}^н}$. Коэффициент запаса прочности здесь обычно полагается равным 1 (или несколько больше, например 1,1). Доли отклонения можно, например, назначить на основании «правила трех среднеквадратических отклонений».

Представленная методика иллюстрирует принципиальное различие между нормативным методом проектирования несущей способности конструкции, при котором нормируются величины коэффициентов безопасности f_{ik} , и рассматриваемым вероятностно-нормативным методом, при котором нормируется надежность конструкции.

Существующее статистическое истолкование норм расчета конструкций основано на элементарных вероятностных соображениях. Основное

достоинство изложенного подхода – простота конечных формул и возможность непосредственной интерпретации результатов в привычных терминах нормативных расчетов. Это не позволяет, однако, правильно ввести фактор времени (срок службы изделия, изменчивость нагрузки во времени, сочетание нагрузок во времени и т.д.).

Тем не менее, статистические подходы к оценке прочностной надежности более адекватно отражают природные явления, чем детерминистическая прочность. В этом отношении расчеты прочностной надежности способствуют уточнению расчетов конструкции на прочность, выполненных по детерминированным величинам. Такое уточнение особенно важно в связи с наблюдаемой тенденцией уменьшения коэффициентов безопасности при расчете на прочность с целью повышения эффективности изделий. Лишь расчеты прочностной надежности дают возможность определять и использовать разумные значения коэффициентов безопасности для расчета по детерминированным величинам.

5 КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ПРОЧНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

В разделе 3 эти факторы назывались, здесь предлагается их рассмотреть.

5.1. Концентрация напряжений и деформаций в элементах конструкции машин

При проектировании и оценке прочности деталей и элементов конструкций машин, работающих при переменных нагрузках и температурах, необходимо особое внимание уделять зонам концентрации напряжений и деформаций – источником образования трещин, приводящим к преждевременному разрушению.

Концентрацией напряжений (деформаций) принято называть резкое местное изменение поля напряжений (деформаций), вызываемое:

а) конструктивными факторами – изменением размеров сечений и формы деталей (выточки, галтели, отверстия, пазы, канавки и т.п.);

б) условиями внешних воздействий (силовых, например контактных, температурных);

в) технологическими факторами (трещины при сварке, литье, клепке, термообработке и т.д.).

Особенностью явление концентрации является то, что в зоне концентратора напряженное состояние (даже при одноосном напряженном состоянии на невозмущенной границе области) часто бывает сложным.

Зона возмущения поля напряжений обычно невелика. Однако концентрации напряжений снижает прочность деталей, работающих при переменных нагрузках и в условиях повышенных температур. Детали из хрупких материалов (например, высокопрочных сталей) могут разрушаться преждевременно при статических нагрузках.

Рассмотрим концентрацию напряжений в элементах конструкций, обусловленную конструктивными факторами.

Максимальные напряжения в сечениях, где имеет место резкое изменение формы, есть выточки, выражается так

$$\sigma_{\max} = \alpha \sigma_{\text{ном}} \quad (5.1)$$

здесь α – теоретический коэффициент концентрации напряжений, который зависит от формы концентратора, от соотношения размеров ослабления конструктивного элемента;

$\sigma_{\text{ном}}$ – номинальное нормальное напряжение, найденное без учета возмущений. Так для рассмотренной полосы

$$\sigma_{\text{ном}} = \frac{P}{F_{\text{нт}}}; \quad (5.2)$$

σ_{\max} – максимальные местные напряжения, вычисленные методами теории упругости или определенные экспериментально. На рисунке 5.1 приведены примеры зон концентрации напряжений в виде резкого изменения формы

элемента конструкции (рисунок 5.1а), боковых выточек (рисунок 5.1б), наличие отверстия (рисунок 5.1в).

В теории упругости дается решение для растянутой пластины, ослабленной круглым отверстием, расположенном по оси симметрии. Если ширина пластины велика по сравнению с радиусом отверстия r , то в наиболее ослабленном сечении 1-1 напряжение σ_z определяется по формуле

$$\sigma_z = \frac{\sigma}{2} \left(2 + \frac{r^2}{y^2} + 3 \frac{r^4}{y^4} \right); \quad (5.3)$$

где σ – среднее напряжение в сечении, достаточно удаленном от места ослабления;

y – расстояние от центра отверстия до точки, в которой определяется напряжение. При $y = r$ $\sigma_{\max} = 3\sigma$. Таким образом, при $r/b \rightarrow 0$ $\sigma_{\text{ном}} = \sigma$ и $\alpha = 3$.

С увеличением y напряжения быстро убывают асимптотически приближаясь к σ . В окрестности отверстия имеет место двухосное напряженное состояние. В точках лежащих на оси z на вертикальных площадках, возникают напряжения

$$\sigma_y = -\frac{\sigma}{2} \left(3 \frac{r^4}{z^4} - \frac{r^2}{z^2} \right), \quad (5.4)$$

величина которых при $z = r$ $\sigma_y = -\sigma$, а при $z = 2r$ величина напряжений составляет $\sigma_y = \frac{\sigma}{32}$. Эти напряжения быстро затухают.

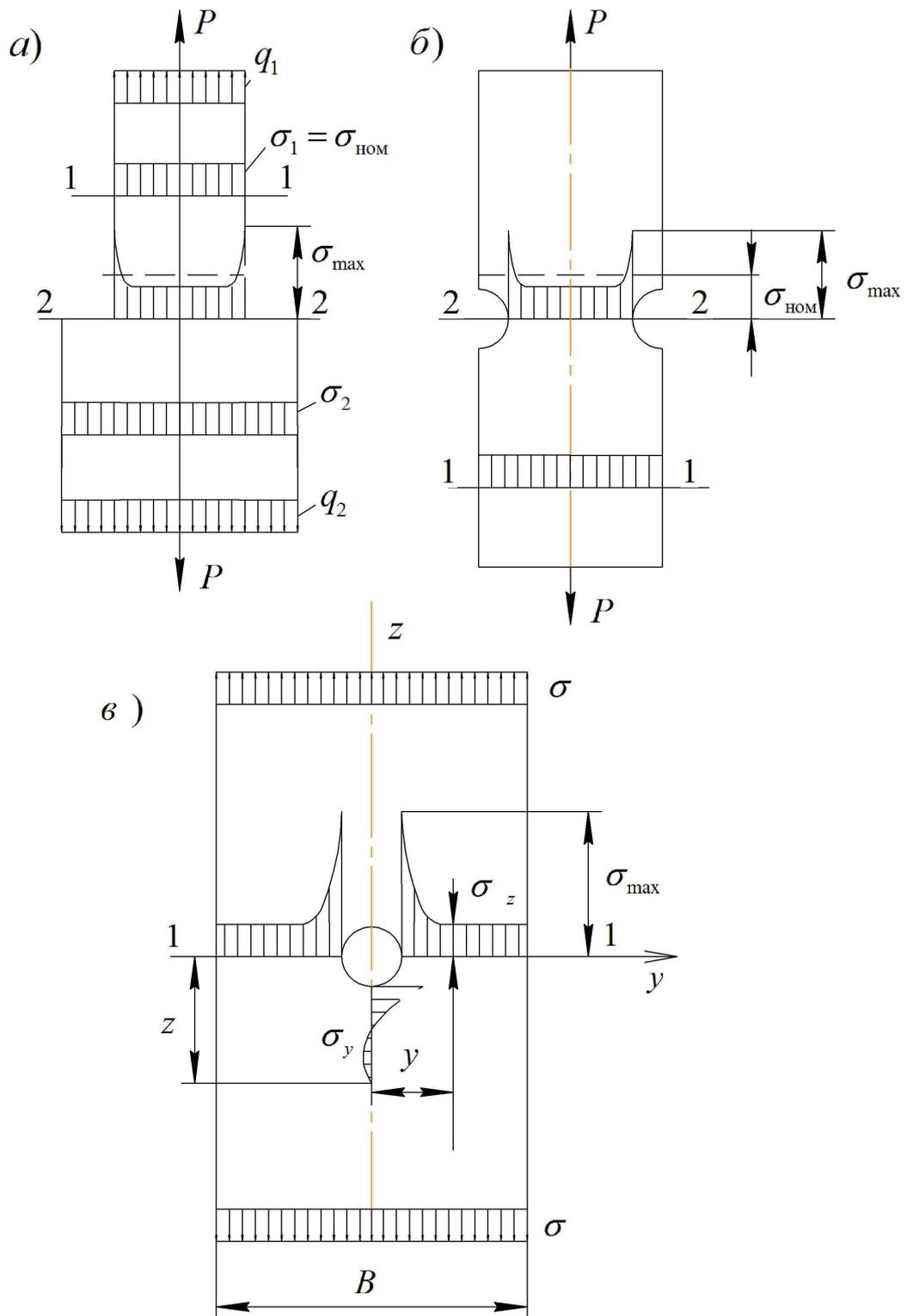


Рисунок 5.1 – Примеры концентраторов напряжений в элементах конструкций

Приведенное точное решение может быть использовано лишь для пластины, ширина которой велика по сравнению с диаметром отверстия, т.е. когда $B \geq 5(2r)$.

С увеличением B величина α возрастает, а напряжения у корпусных краев пластины становятся меньше σ . Ниже приведены в таблице 5.1 значения α для различных значений отношения $2r / B$.

Таблица 5.1 Значения α при различных отношениях $2r / B$

$2r / B$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
α	3,0	3,03	3,14	,36	3,74	4,32

Чтобы получить представление о степени снижения σ_z на краю пластины в сечении 1-1 приведем значение для $B = 4r \left(\frac{2r}{B} = \frac{1}{2} = 0,5 \right)$. В этом случае $\sigma_{\max} = 4,32\sigma$, а $\sigma_z = 0,75\sigma$.

Концентрация напряжений при растяжении (и при других видах деформаций) значительно зависит от формы отверстия и ли выточки.

Так для пластины, ослабленной отверстием в виде эллипса при растяжении (рисунок 5.2), имеем точное решение:

$$\sigma_{\max} = \sigma \left(1 + 2 \frac{a}{b} \right), \quad (5.5)$$

где a и b – полуоси эллипса.

С увеличением отношения a / b σ_{\max} возрастают и при узком отверстии расположенном перпендикулярно направлению растяжения, достигают очень большого значения. В связи с этим большую опасность представляют тонкие прорези. Особенно большие значения напряжений возникают у краев поперечных трещин.

Концентрации напряжений возникают и при других видах деформаций. Так при чистом изгибе полосы, ослабленной боковыми выточками,

имеющими форму гиперболы (рисунок 5.2), α может быть найден по формуле:

$$\alpha = \frac{4 \frac{a}{r} \sqrt{\frac{a}{r}}}{3 \left[\sqrt{\frac{a}{r}} + \left(\frac{a}{r} - 1 \right) \operatorname{arctg} \sqrt{\frac{a}{r}} \right]}, \quad (5.6)$$

где α – полуширина полосы в ослабленном сечении, r – радиус кривизны в глубине выточки.

Этой же формулой можно пользоваться для выточек другой формы, т.к. существенное влияние на α оказывает только кривизна у дна выточки.

Приведенная формула может быть с достаточной степенью точности использована для выточек, показанных на рисунке 5.3а и 5.3б.

Наряду с аналитическими методами решения задач о концентрации напряжений используются численные методы решения задач теории упругости.

Используются экспериментальные методы фотоупругости, голографической интерферометрии, тензометрии и т.д.

Имеется принципиальная трудность решения задач о концентрации напряжений. При $r \rightarrow 0$ выточка имеет форму острого угла. В вершине угла напряжения равны ∞ . При наличии достаточно хороших пластических свойств у материала напряжения в бесконечность не обращаются, но достигают больших значений.

Если материал идеально упругопластический, для которого справедлива диаграмма Прандтля, то концентрация не представляет особой опасности. При достижении пластического состояния напряжения в точке не увеличиваются и текучесть распространяется в глубь сечения, происходит выравнивание напряжений в ослабленном сечении. Анализ напряженного состояния в зоне концентрации напряжений требует привлечения аппарата теории пластичности.

В случае хрупких материалов при достижении в ослабленном сечении наибольшего напряжения, равного пределу прочности, образуется трещина, которая развиваясь приводит к разрушению.

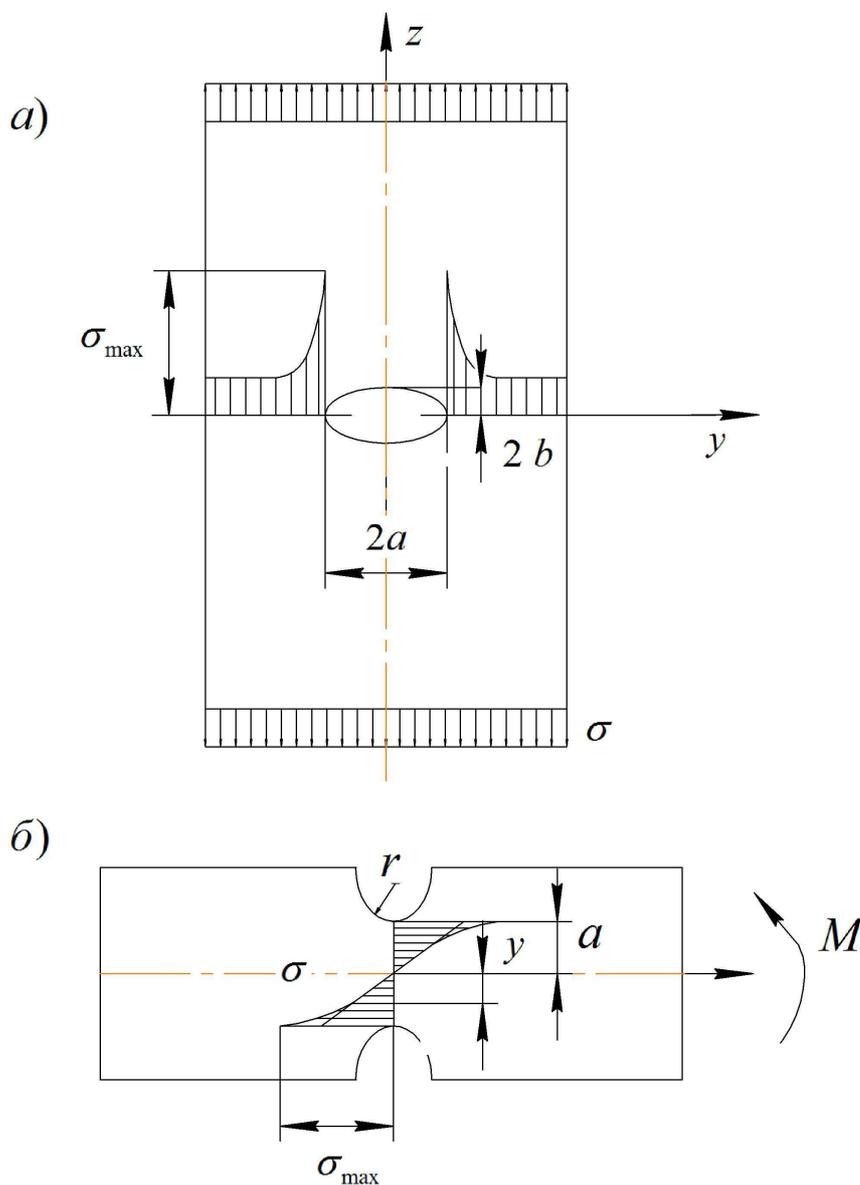


Рисунок 5.2 – а) Распределение напряжений по ширине полосы с эллиптическим отверстием при растяжении; б) распределение напряжений при изгибе полосы с двумя выточками

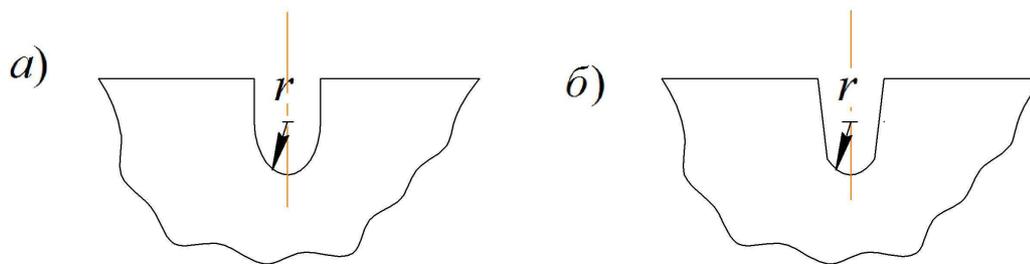


Рисунок 5.3 – Различные формы боковых выточек, имеющих одинаковую кривизну у их дна

Опасность разрушения при концентрации возрастает при снижении температуры, т.к. материал при этом становится более хрупким.

Особо опасна концентрация напряжений при нагрузках переменных, т.е. периодически меняющихся во времени.

Для снижения концентрации напряжений в различных трещинах, вырезах, выточках, в местах резкого изменения площади поперечного сечения элемента конструкции необходимо заменить острые выточки плавными кривыми, т.е. увеличить радиус кривизны конца трещины или отверстия.

Для прекращения развития трещины в пластинах иногда на конце трещины высверливается отверстие.

5.2 Технологические методы повышения долговечности, надежности и ресурса

Прочность и надежность деталей машины (особенно при переменной внешней нагрузке) зависят от концентрации напряжений, а также от физико-механического состояния (остаточных напряжений, микрогеометрии и других факторов).

5.2.1 Остаточные напряжения

Остаточными напряжениями называют напряжения, возникающие в деталях в результате обработки (литье, обработки давлением, термической

обработки и т.п.) при отсутствии внешних воздействий (силовых и температурных).

Образование остаточных напряжений при технологических процессах происходит различным образом. В основе их возникновения лежат необратимые объемные изменения в материале.

Наиболее часто Остаточные напряжения возникают в результате неравномерной или (неоднородной) предварительной пластической деформации (при механическом нагружении, а также при нагреве и охлаждении детали).

При равномерной (однородной) предварительной упругопластической деформации, когда распределение напряжений одинаково, остаточные напряжения не образуются. Например, после растяжения гладкого стержня с напряжениями $\sigma_1 > \sigma_r$ и последующей разгрузке он получит остаточную деформацию (остаточное относительное удлинение (рисунок 5.4)

$$\varepsilon_{\text{ост}} = \varepsilon_1 - \varepsilon_1^{(y)} \quad (5.7)$$

Здесь $\varepsilon_1^{(y)} = -\frac{\sigma_1}{E}$ – упругая деформация стержня при разгрузке. Процесс разгрузки можно представить как приложение напряжений σ_1 с обратным знаком. При повторном нагружении процесс пойдет по кривой *ВАС* и новые пластические деформации возникнут при $\sigma > \sigma_1$. Если внешние растягивающие напряжения при повторном нагружении $\sigma \leq \sigma_1$, то образец работает в упругой области с новым значением предела текучести $\sigma_{т(y)} = \sigma_1$ (в результате первого нагружения увеличивается упругая область работы образца).

Если в процессе упругопластического нагружения создается неоднородное напряжение или деформированное состояние (например, при растяжении стержня с выточкой, изгибе или кручении гладкого стержня), то при разгрузке возникают остаточные напряжения.

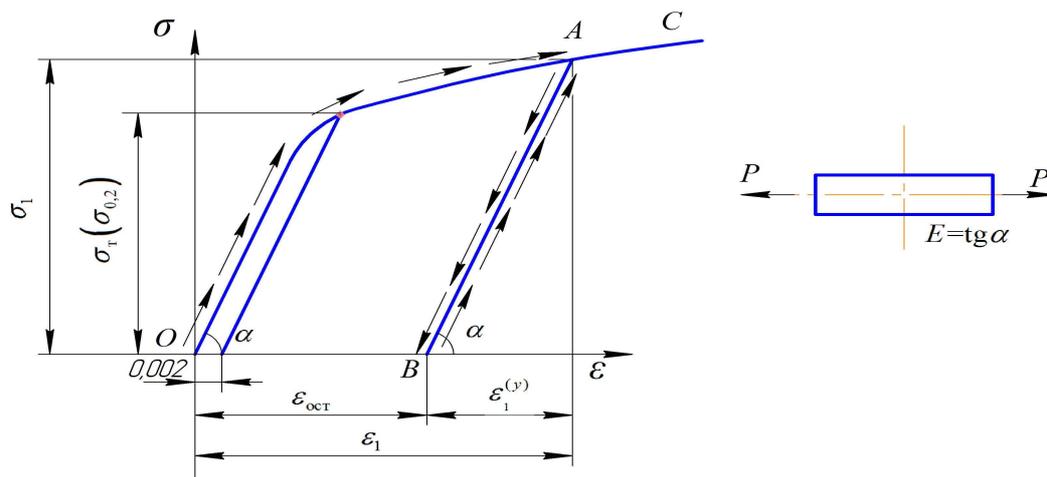


Рисунок 5.4 – Кривая деформирования образца материала при наличии разгрузки.

Остаточные напряжения равны разности между истинными напряжениями в упругопластическом теле и напряжениями, которые создавались бы в нем, если бы материал был идеально упругим. Это видно на примере чистого изгиба (рисунок 5.5).

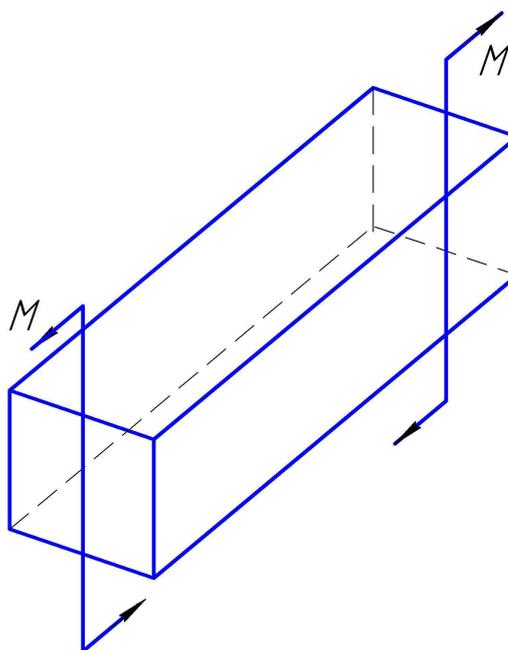


Рисунок 5.5 – Схема изгиба стержня

Для расчета примем схематизированную кривую деформирования без упрочнения (рисунок 5.5), одинаковую при растяжении и сжатии.

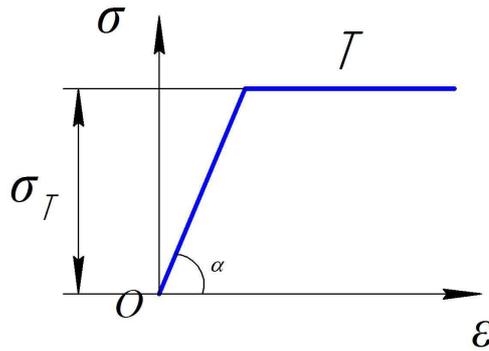


Рисунок 5.6 – Схематизированная кривая деформирования упрочнения

Если при изгибе наибольшие напряжения в крайних волокнах (верхних и нижних) $\sigma \leq \sigma_T$, то стержень работает в области упругой деформации:

$$\sigma_{\max} = \frac{6M}{bh^2} \geq \sigma_T \quad (5.8)$$

При $M > \frac{\sigma_T bh^2}{6}$ в крайних волокнах возникают пластические деформации.

Предположим, что область пластических деформаций распространяется от $0,5h$ до $0,5h_1$ и напряжения в ней $\sigma = \sigma_T$. При $y < 0,5h_1$ напряжения изменяются по линейному закону (рисунок 5.7).

$$\sigma = \sigma_T \frac{2y}{h_1} \quad (5.9)$$

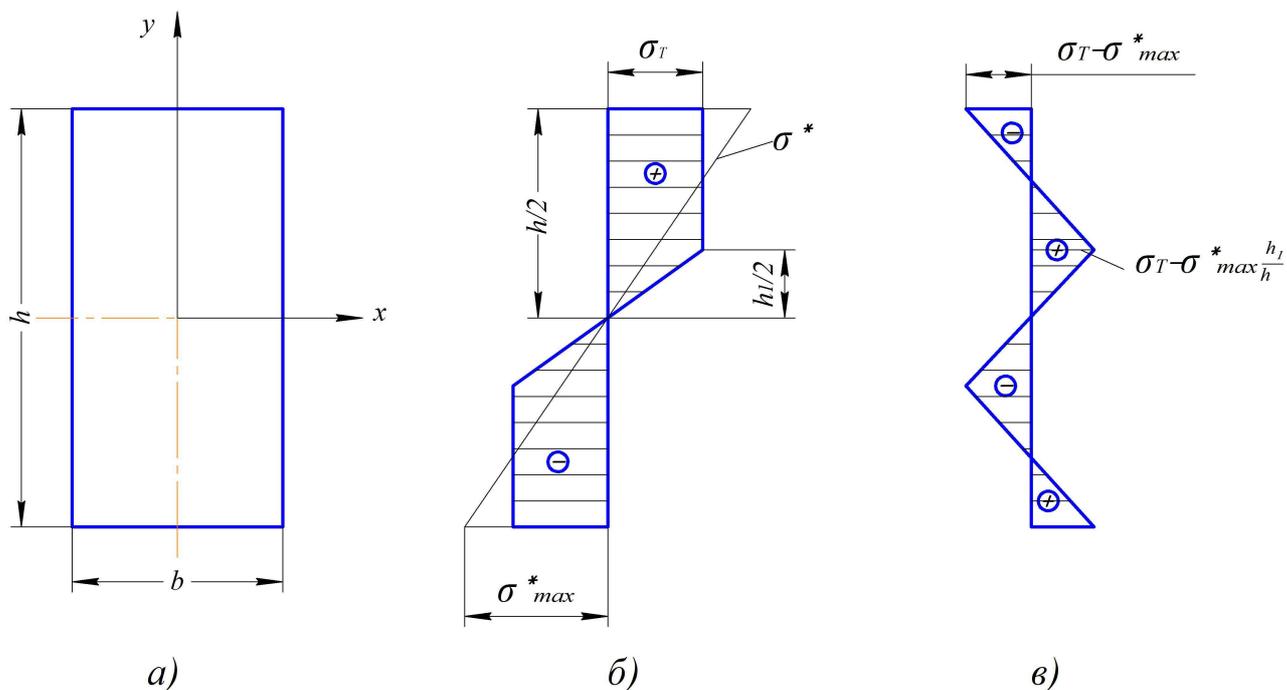


Рисунок 5.7 – Эпюры остаточных напряжений после пластического изгиба.

Из условия равновесия

$$M = \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \sigma b y dy = \frac{1}{4} \sigma_T b (h^2 - h_1^2) + \frac{1}{6} \sigma_T b h_1^2 \quad (5.10)$$

откуда

$$h_1 = \frac{2\sqrt{3}}{\sqrt{\sigma_T b}} \sqrt{\frac{1}{4} \sigma_T b h^2 - M} . \quad (5.11)$$

Напряжения в сечении стержня равны

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_T \frac{2y}{h_1}; & |y| < \frac{1}{2} h_1, \\ \sigma_T; & \frac{h_1}{2} < |y| < \frac{h}{2}. \end{cases} \quad (5.12)$$

Если бы материал был идеально упругим, то распределение напряжений соответствовало бы линейному закону

$$\sigma^* = \frac{12M}{bh^3} y, \quad (5.13)$$

а нормальные напряжения $\sigma_{\max}^* = \frac{6M}{bh^2}$ возникли бы при $y = \pm \frac{h}{2}$.

После разгрузки (после снятия момента M) остаточные напряжения в стержня $\sigma_{\text{ост}} = \sigma - \sigma^*$.

Так, при $y = \frac{1}{2}h$ их величина равна $\sigma_{\text{ост}} = \sigma_{\tau} - \frac{6M}{bh^2}$ (5.14)

При $y = \frac{1}{2}h_1$ они составляют $\sigma_{\text{ост}} = \sigma_{\tau} - \frac{6M}{bh^2} \frac{h_1}{h}$ (5.15)

Эпюра остаточных напряжений здесь, как и во всех других случаях будет самоуравновешенной (равнодействующие усилия и моменты равны нулю).

В зоне наибольшей напряженности знак остаточных напряжений обычно противоположен знаку деформации, их вызывающей.

После снятия момента ось стержня будет иметь остаточный прогиб, который можно определить следующим образом.

При действии момента M деформация слоя на расстоянии $\frac{h_1}{2}$ от оси стержня равна

$$\varepsilon = \frac{h}{2R} = \frac{\sigma_{\tau}}{E} \quad (5.16)$$

где R – радиус кривизны слоя.

Наибольший прогиб оси стержня составит

$$y_0 = \frac{L^2}{8R} = \frac{L^2}{4} \frac{1}{2R} = \frac{L^2}{4} \frac{\sigma_{\tau}}{Eh_1}. \quad (5.16)$$

При идеально упругом материале

$$R^* = \frac{Eh}{2\sigma_{\max}^*}, \quad (5.17)$$

а наибольший прогиб будет равен

$$y^* = \frac{\sigma_{\max}^* L^2}{4Eh} = \frac{3 ML^2}{2 Ebh^3}. \quad (5.18)$$

Остаточный прогиб составит

$$y_{\text{ост}} = y_0 - y^* = \frac{1}{4} \frac{L^2}{E} \left(\frac{\sigma_{\tau}}{h_1} - \frac{\sigma_{\max}^*}{h} \right). \quad (5.19)$$

Направлен этот прогиб в сторону прогиба стержня при действии момента M , т.к. $y > y^*$.

На процесс образования остаточных напряжений существенно влияет поведение материала при последовательном изменении направления нагружения.

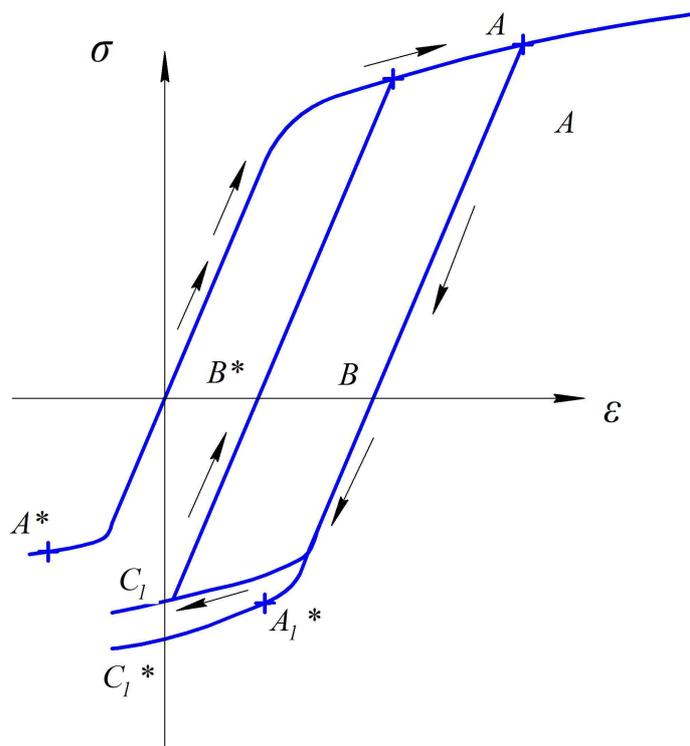


Рис. 5.8 – Кривая деформирования при изменении направления разгрузки

Рассмотрим кривую деформирования OAC . В точке A начинается разгрузка (участок AB), а затем проводится нагружения в противоположном

направлении, сжатие (участок BC_1). Кривая BC_1 расположена несколько выше кривой $BA_1C_1^*$, повторяющей ветвь BAC , что объясняется эффектом Баушингера.

Условия появления остаточных напряжений, связанные с неоднородностью предварительной пластической деформации, лежат в основе метода упрочнения деталей путем предварительного пластического деформирования, а также термической обработки.

5.2.2 Упрочнение деталей машин поверхностным пластическим деформированием

После технологических операций (точение, фрезерование, протягивание, шлифование, полирование) в тонком поверхностном слое деталей в результате пластических деформаций возникают микрповреждения в виде линий скольжения или микротрещин. Из-за неравномерности пластических деформаций по степени и глубине распространения в зоне резания микрповреждения неравномерно распределяются в поверхностном слое.

При воздействии внешней нагрузки неравномерность распределения линий скольжения является источником концентрации напряжения и возможным направлением распределения усталостных трещин.

Для повышения конструкционной прочности деталей широко применяют поверхностные пластические деформирования (ППД) – статические и динамические, реализуемые различными способами. Такое упрочнение оказывается наиболее эффективным для деталей сложной формы при наличии концентраторов напряжений. Эти способы упрочнения основаны на получении поверхностных сжимающих напряжений за счет неоднородной упругопластической деформации (растяжения поверхностных слоев детали). В зоне контакта детали и цилиндрического и сферического инструмента (ролика, шарика и т.п.) или рабочего тела (например, дроби).

При упрочнении деталей машин дробью остаточные напряжения в поверхностных слоях деталей возникают в результате неоднородной упругопластической деформации поверхностных слоев от ударов дроби.

В зависимости от способа передачи кинетической энергии дроби различают несколько методов:

- пневмодробеструйное упрочнение деталей, которое осуществляется с передачей дроби кинетической энергии струи сжатого воздуха (давление воздуха 400..500кПа). При этом ликвидируются растягивающие остаточные напряжения сварки. Сопротивление усталости в результате обработки повышается в 2 раза.

- гидродробеструйное упрочнение осуществляется струей трансформаторного тока при давлении 300...500кПа и стальными шариками.

- при алмазном выглаживании упрочнение достигается пластическим деформированием поверхности скользящим индентором из микрокристалла синтетического алмаза (корунда, карбида кремния, карбида бора) в виде сферы, цилиндра. Алмазное выглаживание формирует в поверхностных слоях высокие сжимающие напряжения. Сопротивление усталости упрочненных деталей на 30...35% выше неупрочненных.

- термическая и химико-термическая обработка вызывает в поверхностных слоях появление остаточных напряжений. Сжимающие напряжения могут быть созданы путем быстрого охлаждения после нагрева до температуры ниже критической, например, при нагреве конструкционных сталей до 600°С и охлаждения в воде. Сопротивление усталости при этом повышается на 10...30% (для деталей без концентраторов) и на 50...80% (с концентраторами).

- при поверхностной закалке ТВЧ (лучем лазера), возникающие сжимающие остаточные напряжения повышают сопротивление усталости деталей с концентраторами напряжений на 70...200%. Сжимающие остаточные напряжения в поверхностных слоях деталей образуются при

таких видах химико-термической обработке, как цементация, азотирование, цианирование.

6 ПУТИ ПРАКТИЧЕСКОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕХАНИКИ РАЗРУШЕНИЯ

Механика разрушения оперирует критериями, существенно независимыми от размера и геометрии испытываемых лабораторных образцов и являющимися характеристиками материала и условий нагружения (например скорости нагружения, температуры испытания, окружающей среды ит.п.). Основная цель механики разрушения заключается в определении ресурса конструкций или момента возможного их разрушения (по напряжению или по долговечности) по результатам испытания небольших специальной формы образцов, позволяющим определить в конечном счете сопротивление распространению трещины, т.е. надежность данного материала. Однако ресурс больших металлоемких конструкций, таких, как огромные морские суда, мосты, газгольдеры, трубопроводы, современные пассажирские самолеты и т.д., зависит не только от свойств материалов, используемых для их изготовления, но и от характера, формы и размеров, присутствующих в них дефектов, их расположения относительно главных растягивающих напряжений, уровня рабочих напряжений и наличия концентрации напряжений, обусловленной геометрией конструкции (резкие переходы сечения, острые кромки, отверстия и т.д.). Разрушения возникают в результате неблагоприятного, как правило, случайного сочетания нескольких из вышеперечисленных факторов.

Надежность конструкции определяется прежде всего правильным первоначальным выбором материала с учетом толщины изделия, технологических операций изготовления конструкции (применение холодной деформации, нагрева, сварки и т.д.), термической обработки, условий монтажа, транспортировки, хранения и эксплуатации. Надежность

конструкции зависит, кроме того, от правильного ее проектирования и расчета, а также от чувствительности методов неразрушающего контроля и проведения пробных испытаний (испытаний на надежность). Рассмотрим примеры практического использования механики разрушения.

6.1 Выбор материала для конструкции по критериям механики разрушения. Диаграммы сравнительного анализа

Для анализа сопротивления элементов конструкций хрупкому разрушению используются критерии механики разрушения, основанные на рассмотрении напряженного и деформированного состояния в зонах возникновения, распространения и остановки трещин. В отличие от общепринятых характеристик прочности и пластичности, учитывающих усредненные свойства образца при нагружении, критерии механики разрушения оценивают локальные свойства материала у вершины трещины и являются фундаментальными характеристиками сопротивления материала разрушению, характеристиками надежности конструкций.

Кроме того, в некоторых случаях при совпадении таких механических характеристик, как $\sigma_B, \sigma_{0,2}, \psi, \delta$, только различие в значениях вязкости разрушения позволяет оценить преимущества того или иного конструкционного материала.

В таблице 6.1 приведены характеристики свойств стали системы $Ni - Cr - Mo - V$ двух плавок, отличающихся в основном содержанием кремния. В стали плавки 1 кремния содержалось 0,79%, а в стали плавки 2 – 0,30%.

Образцы этой стали подвергались термической обработке аустенизации, закалке масле и отпуску в течение 1 часа при различных температурах. Анализ данных, приведенных в таблице 2.1, показывает, что повышение содержания кремния увеличивает предел текучести и уменьшает вязкость разрушения. Вязкость разрушения увеличивается с повышением

температуры отпуска $t_{\text{отп}}$, а предел текучести, начиная с температуры 300...325 °С, заметно уменьшается.

Таким образом, если для данной стали необходимо использовать максимально возможный уровень прочности, то следует выбрать плавку с высоким содержанием кремния отпущенную при 275...300 °С. В том случае максимальная глубина допустимой поверхностной трещины для элемента конструкции составляет 0,66мм. Отпуск при более высоких температурах значительно увеличивает допустимые размеры трещины. Так, после отпуска при 600 °С допустима трещина почти в 8 раз большая. Такой эффект наблюдается и для стали с низким содержанием Si, только размеры критических трещин получаются еще больше.

Таблица 6.1 Физико-механические свойства стали системы $Ni - Cr - Mo - V$ после различной термообработки

$t_{отп}, ^\circ C$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$		$K_{Ic}, \text{Н/мм}^{3/2}$	
	Плавка 1	Плавка 2	Плавка 1	Плавка 2
200	1760	1625	1377	1970
250	1775	1555	1513	2590
275	1775	1520	1630	2405
300	1750	1540	1640	2492
325	1760	1510	1607	2535
350	1705	1500	1635	2665
400	1580	1490	1835	2637
500	1390	1390	2095	3295

Из таблицы 6.1 видно, что различное содержание кремния при температуре отпуска $500^\circ C$ не оказывает влияния на величину $\sigma_{0,2}$. В то время как значения K_{Ic} для плавки 1 и 2 отличаются в 1,57 раза, что свидетельствует о явном преимуществе стали с пониженным содержанием кремния.

Существенным недостатком использования материала, отпущенного при высоких температурах и имеющего более высокую вязкость и меньшую прочность, является необходимость уменьшения рабочих напряжений и, следовательно, увеличения массы конструкции. Однако, если отступить от принятой методики выбора рабочих напряжений, которые должны составлять некоторую часть предела текучести или предела прочности, то можно показать, что с точки зрения катастрофического разрушения

безопаснее использовать материал, имеющий меньшую прочность (отпущенный при высоких температурах), при более высоком отношении рабочих напряжений к пределу текучести, чем материал с большей прочностью, но меньшим отношением напряжения к пределу текучести.

Во всех случаях применение сплавов с более высоким значением K_{Ic} при одинаковых прочных свойствах наиболее целесообразно в конструкциях с точки зрения повышения их надежности в эксплуатации.

Таким образом, обоснованные рекомендации по выбору конструкционных материалов, оценка служебных свойств этих материалов, оценка влияния технологических и эксплуатационных факторов на их свойства немислимы без учета критериев механики разрушения.

Как известно, вязкость разрушения конструкционных материалов изменяется в широких пределах. С повышением вязкости разрушения обычно снижается прочность металла или его состояния после термообработки. Сопоставление различных материалов с целью выбора для конструкции целесообразно проводить по диаграммам сравнительного анализа в координатах $K_{Ic} - \sigma_{0,2}$.

На этих диаграммах конструкционные материалы в зависимости от их характеристик в состоянии поставки, технологических операций (термообработки, сварки), условий эксплуатации располагаются в различных областях.

В качестве примера на рисунке 6.1 представлена зависимость характеристики вязкости разрушения K_{Ic} от величины предела текучести $\sigma_{0,2}$ для таких сталей, как легированные (область 1), высокопрочные (область 2), хромомолибденованадиевые (область 3) и низколегированные (область 4).

На диаграмме сравнительного анализа показаны несколько линий, выходящих из начала координат, характеризующихся постоянным отношением $K_{Ic} / \sigma_{0,2}$. Материалы, лежащие ниже линии I ($K_{Ic} / \sigma_{0,2} = 0,5$), имеют низкую вязкость разрушения, и элементы конструкций из таких

материалов необходимо испытывать на надежность перед сдачей в эксплуатацию. Материалы, лежащие выше линии IV, обладают высокой вязкостью разрушения, они могут работать при наличии медленно растущих трещин, но следует учитывать, что они низкопрочны.

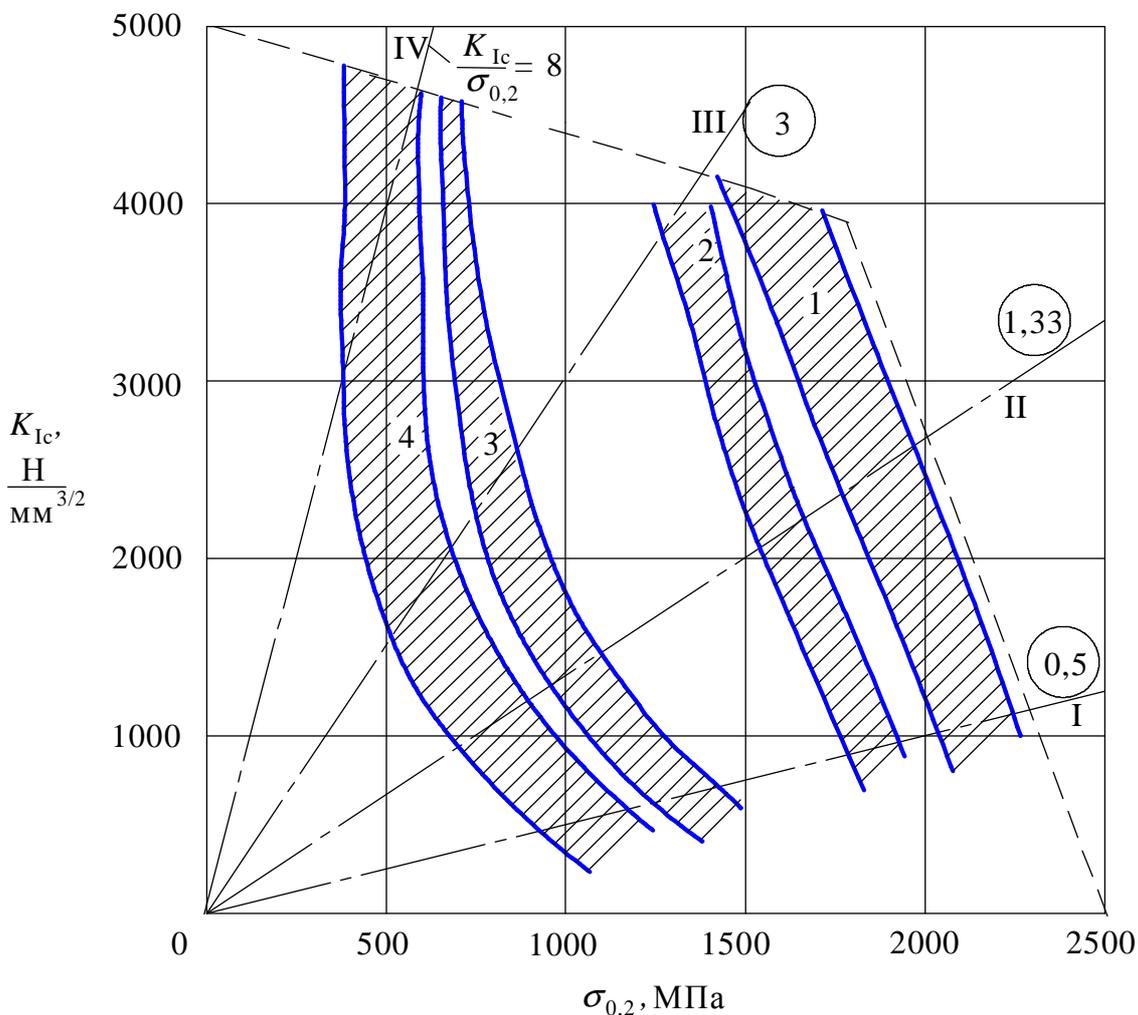


Рисунок 6.1 – Диаграмма сравнительного анализа применимости сталей: легированных – 1; высокопрочных – 2; хромомолибденованадиевых – 3; низколегированных – 4

Штриховая огибающая линия (см. рисунок 6.1) отражает уровень материаловедения и технологий, достигнутый в настоящее время. Разработка новых технологий, создание новых материалов и сплавов, применение более прогрессивных методов термообработки, более сложные условия эксплуатации, которые оказывают влияние на свойства материалов, могут значительно сместить эту линию.

Для обеспечения живучести и работоспособности силовых элементов при циклическом нагружении наряду с диаграммами сравнительного анализа необходимо использовать такие обобщенные графики, как зависимость скорости роста усталостной трещины от размаха коэффициента интенсивности напряжений.

Итак, наличие диаграмм сравнительного анализа и обобщенных кинетических диаграмм $dl / dN - \Delta K$ позволяет уже на стадии проектирования сделать рациональный выбор конструкционного материала с учетом технологических факторов и условий эксплуатации.

При выборе материала для производства трубопровода следует иметь в виду, что повышенные значения K_{Ic} допускают и более высокие напряжения, при которых разрушается конструкция. При этом и критический размер дефекта, трещины или повреждения, определяющий условия нестабильного их роста, также повышается. Поэтому сравнение материалов и технологических способов производства, а также отдельных зон сварного соединения по соответствующим величинам K_{Ic} может обеспечить достаточно надежный выбор материала для конкретного применения.

Выбор материала для проектируемой конструкции, назначение технологических режимов сварки, обоснованное назначение толщины стенок трубопровода относятся к конструктивно-технологическим мероприятиям обеспечения надежности и ресурса конструкции.

6.2 Использование механики разрушения при проектировании и расчете конструкции. Определение критических размеров дефектов и установление условий нестабильного роста трещин

Хорошо известно, что эксплуатационные трещины могут быть трех типов: сквозные, несквозные или поверхностные и внутренние подповерхностные трещины. Наиболее опасными, являются внутренние и поверхностные трещины, степень стеснения деформации у которых по

фронту трещины очень велика, и поэтому они распространяются в условиях плоской деформации. Обычно они имеют эллиптическую и полуэллиптическую форму соответственно. В предположении именно такой формы трещины Ирвин вывел зависимость между коэффициентом интенсивности напряжений K_{Ic} и глубиной трещины a .

$$K_{Ic}^2 = \frac{1,21\pi a \sigma^2}{\Phi^2 - 0,212 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{0,2}} \right)^2}, \quad (6.1)$$

где σ – напряжение, действующее перпендикулярно к поверхности трещины, Φ – полный эллиптический интеграл второго рода, зависящий от отношения глубины поверхностной трещины a к ее длине $2c$. В случае, если трещина внутренняя, то a это ее полуширина, а коэффициент 1,21 в числителе выражения (6.1) заменяется на 1.

Соотношение (6.1) связывает три параметра: вязкость разрушения K_{Ic} , рабочее напряжение σ и размер трещины a с учетом ее геометрии. Зная два параметра, можно рассчитать третий. Для удобства записи, обозначим знаменатель выражения (6.1) через $Q = \Phi^2 - 0,212 \left(\sigma / \sigma_{0,2} \right)^2$, тогда критическая глубина поверхностной трещины для данного материала (с известной величиной K_{Ic}) при заданном рабочем напряжении запишется в виде

$$(a / Q)_{кр} = K_{Ic}^2 / 1,21\pi\sigma^2, \quad (6.2)$$

а для внутренней эллиптической трещины

$$(a / Q)_{кр} = K_{Ic}^2 / \pi\sigma^2. \quad (6.3)$$

Для сквозной трещины критический размер дефекта подсчитывается из уравнения:

$$K_{Ic} = 1,77\sigma a^{1/2} \left[1 - 0,1 \left(\frac{2a}{W} \right) + \left(\frac{2a}{W} \right)^2 \right]$$

при $2a/W < 0,6$, где W – ширина образца, a – полудлина трещины.

Уравнение (6.1) можно решить графически или представить в виде таблиц, с помощью которых легко найти критический размер дефекта, приводящего к катастрофическому разрушению, при известном значении вязкости материала K_{Ic} и рабочем напряжении σ и так называемый резерв глубины трещины $a_c - a_i$.

Эти же данные можно использовать для обоснованного выбора рабочих напряжений. Так, если после тщательного контроля дефектов неразрушающими методами, которые позволяют обнаружить трещину размером 4 мм, не выявлено никаких трещин, то при напряжении 200 Н/мм² и вязкости разрушения 800 Н/мм^{3/2} разрушение не произойдет, пока имеющиеся зародыши трещины не достигнут размера 4 мм [см. (6.1)]. Если они не будут распространяться совсем, то это напряжение можно и принять за рабочее, без учета коэффициентов запаса. При коэффициенте запаса равному 2 рабочие напряжения должны равняться 100 Н/мм².

Как только трещина достигает критической величины, т.е. когда поле напряжений у вершины будет описываться критическим коэффициентом интенсивности напряжений K_{Ic} , разрушение произойдет немедленно, причем практически не важно, под действием каких причин трещина распространялась – в результате циклического изменения напряжения, в результате ли воздействия агрессивной среды или в результате совместного воздействия обоих факторов.

6.3 Определение запаса прочности конструкций по критическим размерам трещины, по числу циклов (или длительности) нагружения

В качестве примера рассмотрим прочность сосуда давления, изготовленного из материала с известным значением K_{Ic} и содержащего полуэллиптические поверхностные дефекты размером меньше чувствительности методов неразрушающего контроля. Необходимо узнать, разрушится ли сосуд в процессе эксплуатации при выбранных рабочих напряжениях. Поскольку рабочие напряжения σ и вязкость разрушения известны, то легко находим критические размеры дефекта по формуле (6.2). Затем используя экспериментальные данные, которые должны быть получены заранее, находим скорость распространения дефекта от зародыша до критического размера и следовательно число циклов нагружения (при распространении трещины в условиях коррозии под напряжением).

$$\frac{d(a/Q)}{dN} = C \left(\frac{\sigma_0}{\sigma} \right)^2 (1 + \lambda)^m \Delta K^n \left(1 - \frac{K_{\max}}{K_{Ic}} \right)^{-P}, \quad (6.4)$$

где m, n и P – экспериментально определяемые постоянные, σ_0 – произвольно выбранное максимальное напряжение цикла, для которого определяется постоянная C , в свою очередь зависящая от материала и условий испытания.

Интегрируя уравнение (6.4) и подставляя различные значения размера a_i возможных дефектов (от 0 до $a_{кр}$), получим число циклов, в течение которого дефект вырастет до критического размера. По этим данным строим кривые зависимости наработки от начального размера дефекта. Такие кривые могут быть построены для различных условий нагружения (разные коэффициенты асимметрии и максимальные напряжения цикла). Располагая такими зависимостями, легко предсказать число циклов до разрушения в зависимости от уровня рабочих напряжений и размера первоначального дефекта и сопоставить их с необходимой чувствительностью методов неразрушающего контроля дефектов.

Запас прочности по числу циклов нагружения определяется как отношение долговечности при заданном уровне изменения напряжений и данном размере начального дефекта к необходимому (желаемому) сроку работы сосуда.

Рассмотренный пример показывает, что методы линейной механики разрушения позволяют количественно оценить надежность проектируемых конструкций. Если анализ покажет, что необходимое соответствие между напряжениями, свойствами материала и возможностями неразрушающего контроля неудовлетворительно, то следует внести соответствующие коррективы до изготовления конструкции, направленные либо на снижение уровня рабочих напряжений, либо на применение материала с большими вязкостью разрушения и сопротивлением распространению трещины, либо на повышение чувствительности методов неразрушающего контроля.

6.4 Прогнозирование срока службы конструкций

Долговечность изделия, например, сосуда давления, зависит от возможного прироста трещины от начальной величины a_i , определяемой методами неразрушающего контроля, до критической $a_{кр}$ и от сопротивления распространению трещины до критических размеров. Долговечность данного сосуда непосредственно зависит от $a_{кр}$ и a_i . Испытания образцов с поверхностными трещинами из материала сосуда давления позволяют построить диаграммы, приведенные на рис. 6.1, по которым, зная размеры исходного дефекта и вычисленное значение критической трещины, можно прогнозировать срок службы изделия. Чем меньше размер исходного дефекта a_i , тем выше при прочих равных условиях долговечность изделия.

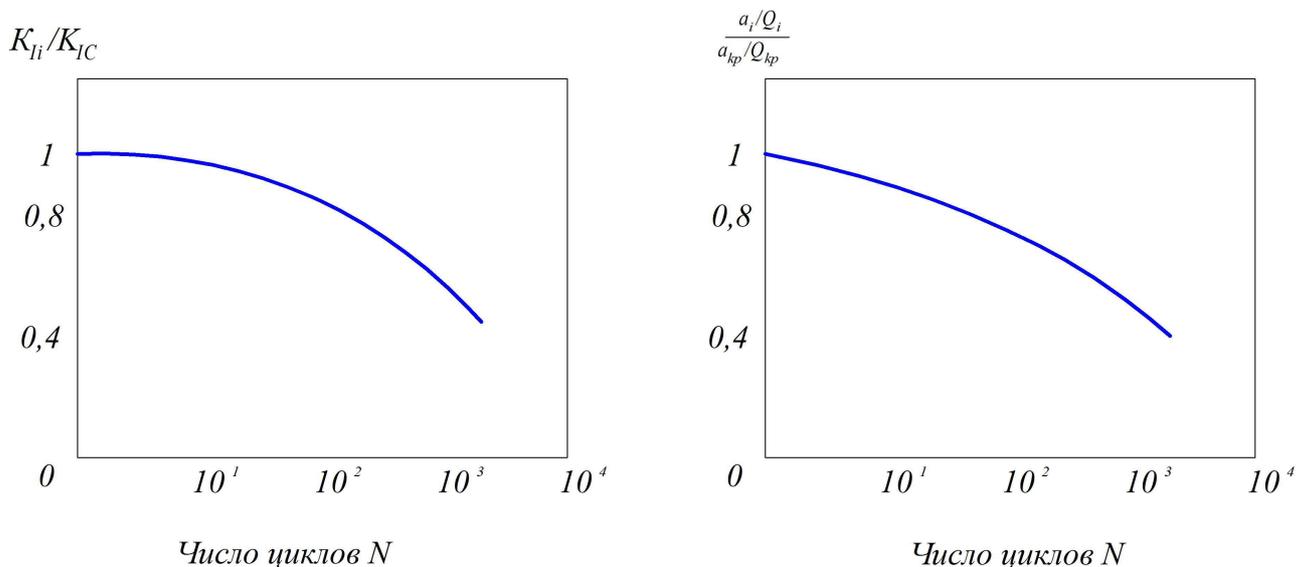


Рисунок 6.2 – Схема представления результатов экспериментального изучения распространения усталостных трещин в зависимости от коэффициента интенсивности напряжений (а) или размера трещины (б)

Подобные диаграммы позволяют определить текущий размер трещины при любой наработке. Так, если для исходной трещины величина a_i / Q_i равна 0,2; то через ΔN циклов трещина будет иметь размеры $a_i / Q_i = 0,4$ (см. рис. 6.1). Правомерность такого подхода к прогнозированию срока службы изделия была подтверждена.

Для определения влияния длительного статического нагружения на долговечность используются те же образцы и испытания, как и при изучении кинетики распространения усталостных трещин, и строятся такие же диаграммы, как на рис. 6.1, позволяющие ориентировочно устанавливать срок службы. Интересная особенность этих диаграмм заключается в том, что на них выявляется область, в которой трещина не растет, как бы долго не продолжалось нагружение. Это пороговое значение коэффициента интенсивности напряжения $K_{Iкр}$ является параметром материала и окружающей среды.

6.5 Прогнозирование разрушения цилиндров, нагружаемых внутренним давлением

Приведем пример. Были изготовлены относительно толстостенные цилиндры ($D/t=11$) из поковок, прутков и слитков алюминиевых сплавов. Эти цилиндры циклически нагружали до различных напряжений внутренним давлением для сопоставления поведения различных сплавов в этих условиях. Нагружение цилиндров проводили на воздухе и в атмосфере соленого тумана.

Цилиндры имели наружный диаметр $D=2,5$ см. Толщина стенки t изменялась в зависимости от марки сплава, так чтобы можно было использовать один и тот же источник давления для создания напряжения, одинакового в процентном отношении к пределу текучести.

Хотя в начале испытания в цилиндрах отсутствовали концентраторы напряжений, но по мере испытания появились естественные трещины. Природа трещин зависела от сплава, его термической обработки, уровня приложенных напряжений и окружающей атмосферы. В результате металлографического исследования выявлено, что некоторые появляющиеся трещины были чисто усталостными, другие – коррозионного происхождения, появление третьих было обусловлено воздействием обеих упомянутых причин.

В большинстве цилиндров из высокопрочных сплавов трещины дорастали до определенного критического размера, и затем наступало катастрофическое разрушение. Поэтому можно было воспользоваться для прогнозирования условий разрушения коэффициентом интенсивности напряжений, при котором начинается нестабильный рост трещины, и сравнить с условиями разрушения, которые могли быть предсказаны по известному значению вязкости разрушения, в условиях плоской деформации для этого же металла. В таблице 6.2 приведены результаты исследования сплавов, их термическая обработка, вид заготовки для изготовления

цилиндра и значения обычных механических свойств и вязкости разрушения в условиях плоской деформации K_{Ic} .

Таблица 6.2 Механические свойства и вязкость разрушения алюминиевых сплавов

Сплав	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	K_{Ic} , кгс/мм ^{3/2}	σ_B , кгс/мм ²	$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	δ , %	K_{Ic} , кгс/мм ^{3/2}
	Цилиндры из поковок				Цилиндры из катаных прутков			
2014-Т6	49,2	44,1	6,5	55,6	48,9	43,7	7,5	58,7
7075-Т6	59,0	49,0	11,5	68,5	52,4	44,0	11,0	77
7075-Е73	53,2	45,1	10,0	72	48,0	39,0	11,5	84
7079-Е6	54,0	47,3	12,0	67,8	54,1	47,1	9,0	74,2
X7080-Т7	49,7	43,8	9,0	67,8	49,3	35,7	10,0	77
X270-Т7	44,8	42,5	5,0	116	–	–	–	–

Примечание. Образцы вырезали поперек направления главной деформации при обработке давлением.

Таблица 6.3 Результаты анализа разрушения цилиндров при циклическом нагружении внутренним давлением с позиций механики разрушения

Заготовка	Окружающая атмосфера	K_{Ic} , кгс/мм ^{3/2}	K_{fc} , кгс/мм ^{3/2}	K_{fc} / K_{Ic}
Сплав 2014-Т6				
Поковка	В	55,6	62,0	1,11
	С	–	52,5	0,94
Катаный пруток	С	58,8	66,9	1,14
Сплав 7075-Т6				
Поковка	В	69,3	71,7	1,04
	С	–	69,7	1,01
Катаный пруток	С	77	71,4	0,93

Сплав 7075-T73				
Поковка	В	72	72,8	1,02
	С	–	71	0,99
Катаный пруток	С	85	87,0	0,93
Сплав 7079-T6				
Поковка	В	66,8	67,0	0,93
	С	–	66,5	0,99
Катаный пруток	С	74,1	63,7	0,86
Сплав 7080-T7				
Поковка	В	68	67,9	1,00
	С	–	62,7	0,92
Катаный пруток	С	77	86,0	1,12

Примечание. 1. В – испытания на воздухе; С – испытания в атмосфере соленого тумана. 2. Значение K_{fc} приведены по результатам испытания трех – шести цилиндров с максимальной амплитудой цикла, изменяющейся от 128 до 228 Н/мм².

В большинстве случаев трещина выросла до размера, при которой нестабильный рост трещины происходил по всей рабочей длине цилиндра около 203 мм. Размеры трещины до момента катастрофического разрушения хорошо видны на поверхности разрушения. Размеры этих трещин, нормальные и тангенциальные напряжения и средние значения K_{Ic} из табл. 6.2 были использованы для анализа условий разрушения методами механики разрушения.

Полагая, что коэффициент интенсивности напряжений в момент нестабильного разрушения K_{If} должен равняться известному значению K_{Ic} , можно предсказать условия разрушения для данного размера сквозной трещины или приложенного напряжения уравнению (6.1).

Расчеты проводили в предположении, что в данном случае применим анализ несквозных трещин в условиях плоской деформации. Во многих случаях расчеты не всегда были корректны, так как глубина трещины превышала полутолщину стенки цилиндра, при этом оставшееся живое сечение было слишком тонким, чтобы там поддерживались условия плоской деформации.

Другое упрощение заключалось в том, что использовалось напряжение по толщине стенки цилиндра, хотя тангенциальные напряжения не одинаковы по толщине (фактически напряжение на внутренней поверхности цилиндра на 30% меньше, чем на наружной). Кроме того, не вводилось никаких поправок, учитывающих геометрию цилиндра, его изгиб и радиус кривизны.

Результаты анализа представлены в таблице 6.3. Обычно коэффициенты интенсивности напряжений при разрушении K_{Ic} незначительно отличались от K_{Ic} независимо от природы трещины. Усредненное значение K_{Ic} находилось в интервале от $K_{Ic} - 14\% K_{Ic}$ до $K_{Ic} + 21\% K_{Ic}$. Максимальное отклонение составляло $- 29\%$ и $+30\%$ от K_{Ic} . В 37 случаях из 65 K_{Ic} было равно или больше K_{Ic} несомненно из-за того, что разрушение происходило не в условиях чистой плоской деформации. Однако различие было обычно малым и возможно связано с разбросом значений K_{Ic} .

В общем, результаты расчета показывают, что с позиций механики разрушения можно довольно хорошо предсказать условия разрушения цилиндров. Это особенно справедливо, когда, кроме механики разрушения нет других путей аналитического подхода к решению этой задачи.

6.6 Обеспечение надежности конструкции пробного испытания

Ответственные конструкции подвергают пробным испытаниям нагрузками, превосходящими рабочие. Успешное пробное испытание фактически устанавливает максимально возможный размер исходных

трещин. Это следует из существования функциональной зависимости между напряжениями и размером трещины, определяемой критическим коэффициентом интенсивности напряжений K_{Ic} .

Так, роторы мощных турбин и генераторов следует испытывать при скоростях вращения, на 20% превышающих рабочие, что соответствует превышению рабочих напряжений на 44%. Сосуды испытываются при давлениях, на 30% превышающих рабочие.

Если при пробном испытании конструкция не разрушилась, то максимально возможный размер дефекта в конструкции легко определяется по напряжениям при пробном испытании и значению K_{Ic} примененного материала. Зная размер дефекта, определенный таким способом, и располагая кривой изменения числа циклов от размера дефекта для анализируемой конструкции при номинальных напряжениях такого типа, как на рис. 6.1 легко и назначить необходимый коэффициент запаса. Описанный метод следует применять в тех случаях, когда нет достаточной уверенности в правильном определении первоначальных размеров дефектов имеющимися в распоряжении неразрушающими методами контроля, либо в ответственных местах конструкции невозможно использовать эти методы. Этот метод удобно также применять в тех случаях, когда дефект обнаружен в процессе эксплуатации конструкции, и необходимо принять решение о дальнейшей ее работе.

При пробном испытании отношение максимального исходного коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} к критическому K_{Ic} равно $1/\alpha$, где α – гарантированный пробными испытаниями запас прочности. При этом отношение максимального размера исходной трещины к размеру критической трещины $(\alpha/Q)_i / (\alpha/Q)_{кр}$ равно $1/\alpha^2$. Оба эти значения не зависят ни от фактического напряжения при пробном испытании, ни от фактической вязкости разрушения материала, что очень важно, так как фактическое пробное напряжение может изменяться либо из-за особенностей

конструкции, либо из-за причин технологического порядка. Наряду с этим, надо считаться с тем, что вязкость разрушения исходного металла может быть иной, чем у сварного шва или околошовной зоны.

Известно об использовании методов механики разрушения для оценки надежности работы корпусов типа сосудов давления из высокопрочных сталей. Один из корпусов диаметром 915 мм был изготовлен путем приварки концевой фланца из стали (3% Cr – Mo – V) вакуумного переплава к трубе диаметром 915 мм, полученной спиральной сваркой полосы толщиной 4,3 мм, из той же стали, но выплавленной на воздухе. Один конец был закрыт приваренной к концевому кольцу стальной (1% Cr – Mo) накладкой. Разрушение началось от поверхностной трещины длиной 10 мм и глубиной 2мм, образовавшейся из-за приварки накладки к кольцу.

Исследование свойств материала корпуса показало, что $\sigma_{0,2} = 133$, $\sigma_B = 1560 \text{ Н/мм}^2$, $K_{Ic} = 515 \div 1080 \text{ Н/мм}^{3/2}$ (среднее значение $K_{Ic} = 840 \text{ Н/мм}^{3/2}$). Расчет разрушающего напряжения известной геометрии трещины ($a=2$ мм, $2c=10$ мм) и среднему значению K_{Ic} дал величину 352 Н/мм². Напряжение разрушения, вычисленное по известному внутреннему давлению при разрушении сосуда, равнялось 320 Н/мм². Таким образом, результаты испытания материала корпусов подтверждают, что имеется надежная корреляция между поведением корпусов в процессе опробования их давлением и результатами испытания образцов. Потенциальная полезность методов механики разрушению заключается в предсказании критического размера трещины для данной детали по известному значению K_{Ic} материала детали или в предсказании разрушающего напряжения при данной трещине в детали и величине K_{Ic} .

6.7 Анализ аварийных разрушений методами механики разрушения

Тщательное исследование излома, его основных характерных особенностей или признаков имеет решающее значение для успешного применения механики разрушения для анализа разрушений.

Анализ аварийных разрушений следует начинать с выявления области начала разрушения, его направления, размеров где это возможно, и геометрии исходного дефекта и критической трещины. Зная размеры исходного и конечного дефекта и вязкость разрушения исследуемого материала, можно предположить причины разрушения – не было ли перегрузки (расчет рабочего напряжения по известной вязкости разрушения и размеры трещины), правильно ли выбрано рабочее напряжение (превышал ли исходный коэффициент интенсивности напряжений расчетный), не превышал ли дефект, приведший к разрушению, допустимые размеры (сопоставить с чувствительностью методов неразрушающего контроля, не было ли ошибки при контроле). Следует определить вязкость разрушения на материале из разрушенной детали и сопоставить ее с минимально допустимой для данного материала (не было ли допущено ошибки при поведении термической обработки) и т.д.

Если деталь работала в условиях длительного приложения стационарной нагрузки, то из сопоставления начального коэффициента интенсивности напряжений с величиной $K_{Iкр}$ можно выявить причину разрушения.

Большую помощь при анализе разрушений с позиции механики разрушения оказывает микроскопическое исследование изломов методами сканирующей электронной микроскопии или методом реплик, особенно, если разрушение происходило в результате циклического нагружения. Обычно на поверхности разрушения, которое произошло в результате усталости, видны так называемые усталостные бороздки, характеризующие последовательные положения фронта трещины. Расстояние между полосками характеризует скорость распространения усталостной трещины. Зная геометрию образца и трещины, можно установить примерный уровень напряжений в детали в

разные моменты ее службы, используя соответствующие уравнения для скорости роста усталостной трещины.

Сравнивая длину полосок между собой на небольшом участке трещины можно сделать определенные заключения относительно спектра нагружения, включая и значения возможных перегрузок.

Таким образом, анализ аварийных Разрушений с учетом таких параметров, как вязкость разрушения K_{Ic} и K_c , а также K_{Ikp} зависимости скорости распространения усталостной трещины от ΔK или при коррозии под напряжением – от величины K , существенно облегчает установление причины разрушения. Конечно, наряду с характеристиками механики разрушения, необходимо иметь данные по пределу прочности и текучести, относительному удлинению и сужению, пределу усталости и некоторым другим свойствам, например, в отдельных случаях – характеристикам жаропрочности и т.д.

Пример.

Анализ разрушения кованого изделия.

Была запущена в эксплуатацию серия кованых изделий из сплава АК8-1. После эксплуатации в течение ~ 2000 ч одно из них разрушилось. На разрушенном изделии обнаружили трещину длиной 53 мм. Трещина зародилась в месте выхода волокна (подрез волокна при обточке), расположенного под углом 30° к максимальным растягивающим напряжениям. Изделие работало в условиях отнулевого цикла растяжения.

Предполагается, что трещина возникла в результате одновременного воздействия воды, длительных статических и циклических нагрузок. Сначала трещина росла вдоль волокна на глубину ~ 3,5 мм (длина по поверхности 17 мм), затем она распространялась, постепенно приобретая полуэллиптическую форму, плоскость трещины при этом стала перпендикулярной к максимальным растягивающим напряжениям.

Критические размеры трещины составляли: 11 мм глубина и 53 мм длина. Анализ трещины свойств разрушенного изделия показал, что при такой ориентировке трещины в изделии вязкость разрушения равна $K_{Ic}=950 \text{ Н/мм}^{3/2}$, $K_{Ikp}=115 \text{ Н/мм}^{3/2}$, а механические свойства в перпендикулярном к плоскости трещины направлении составляли $\sigma_{0,2}=360 \text{ Н/мм}^2$, $\sigma_B=446 \text{ Н/мм}^2$, $\delta=8,5\%$.

Оценка жесткости напряженного состояния показала, что трещина распространялась до критических размеров в условиях плоской деформации, так как величина $(K_{Ic} / \sigma_{0,2})^2 \approx 7$ мм существенно меньше толщины изделия.

На поверхности изделия в месте выхода на нее трещины хорошо видна утяжка кромок, характеризующая размер пластической зоны r_y в условиях плоского напряженного состояния. В момент начала самопроизвольного разрушения утяжка кромок составляла 0,9мм. Оценка интенсивности напряжений при разрушении материала.

$$K_{\max} = \sigma_{0,2} \sqrt{2\pi r_y} \approx 860 \text{ Н/мм}^{3/2}$$

показывает, что расчетная величина коэффициента интенсивности напряжений неплохо согласуется со значением K_{Ic} материала, что свидетельствует о разрушении в условиях плоской деформации.

Расчет действующих напряжений по известным значениям вязкости разрушения, размеру и геометрии трещины дает

$$\sigma = \frac{K_{Ic}}{1,95} \left(\frac{Q}{a} \right)^{1/2} \approx 22 \text{ кгс/мм}^2,$$

где a – глубина трещины, Q – параметр формы, ориентировочно равный в нашем случае 2,2. Полученное разрушающее напряжение примерно совпадает с рабочим, равным 240 Н/мм^2 ($\sigma_{0,2} / 1,5$). Таким образом, рабочие напряжения не были превышены.

Отдельные участки по направлению роста усталостной трещины были исследованы методами сканирующей микроскопии. Исследования показали, что изделие работало в условиях стационарного периодического нагружения, поскольку расстояние между характерными усталостными бороздками монотонно возрастало по длине трещины, явно видимых следов перегрузки или спада нагрузки не было видно.

Замер расстояния между усталостными бороздками на последних 3 мм роста трещины дал следующие величины $1,5 \div 4,5 \cdot 10^{-3}$ мм. Для оценки скорости трещины в нашем случае можно воспользоваться упрощенным уравнением $da / dN = C (\Delta K)^n$, где $\Delta K = 1,95 \Delta \sigma \sqrt{a / Q}$.

Так как изделие работало в условиях отнулевого цикла, то $\Delta K = K_{\max}$ и $\Delta \sigma = \sigma_{\max}$

$$\frac{4,5 \cdot 10^{-3}}{1,5 \cdot 10^{-3}} = \frac{C (1,95 \sigma \sqrt{11 / Q})^n}{C (1,95 \sigma \sqrt{8 / Q})^n}$$

или $3 = \left(\sqrt{11/8}\right)^n$, отсюда $n = 4,5$. Зная, что в момент разрушения $K_{\max} = K_{Ic}$ находим величину C из уравнения:

$$4,5 \cdot 10^{-3} = C(95)^{4,5} \text{ или } C \approx 5 \cdot 10^{-12}.$$

Действующие напряжения тогда находим из уравнения $da/dN = 5 \cdot 10^{-12} (1,95\sigma\sqrt{a/Q})^{4,5}$

при $da/dN = 1,5 \cdot 10^{-3}$ $\sigma = 265$ Н/мм²;

при $da/dN = 4,5 \cdot 10^{-3}$ $\sigma = 270$ Н/мм²,

что практически не отличается от установленных эксплуатационных напряжений.

Подсчитаем коэффициент интенсивности напряжений у зародыша трещины, когда она начала расти под действием растягивающих напряжений. Эффективная глубина трещины (проекция реальной трещины на плоскость максимального растягивающего напряжения) составляла $3,5 \cos 30^\circ \approx 3$ мм

$$K = 1,95\sigma\sqrt{a/Q} = 1,95 \cdot 240\sqrt{3/2,5} \approx 510 \text{ Н/мм}^{3/2}.$$

Эта величина существенно выше значения K_{Icr} .

Причина роста зародыша трещины, по-видимому, заключается в том, что коэффициент интенсивности напряжений у зародыша трещины превышал величину K_{Icr} , при возможном доступе влаги в трещину. Замер утяжки кромок в месте выхода трещины на свободную поверхность показал, что трещина распространялась в условиях плоской деформации. Разрушение произошло, когда коэффициент интенсивности напряжений впереди трещины достиг значения K_{Ic} .

Подсчитанные значения рабочих напряжений, на основании известной величины вязкости разрушения, критических размеров трещины, замеренной скорости роста трещины в нескольких местах (по характерным усталостным бороздкам) равны 22-27 кгс/мм², что практически не отличается от назначенных эксплуатационных напряжений (24кгс/мм²). Это свидетельствует об отсутствии перегрузок и выполнении условий эксплуатации.

Разнообразные примеры практического применения механики разрушения для оценки прочности конструкций можно найти в известных научных работах.

6.8 Корреляция вязкости разрушения с другими механическими свойствами

Установлению корреляции вязкости разрушения с обычными механическими свойствами посвящено значительное количество работ. На ряде металлов и сплавов найдена связь вязкости разрушения со свойствами материалов при растяжении, изгибе, ударном и циклическом нагружениях. Однако эти корреляционные связи являются частными, они справедливы для определенного класса материалов и конкретного параметра механических свойств (σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ , ψ , a_n , a_{Ty} и др.), при переходе к другому классу материалов или при выборе другой характеристики корреляция нарушается. Следует подчеркнуть, что наблюдающаяся корреляция обычно недостаточно тесная и разброс рассчитанных и экспериментальных значений порою превышает $\pm 30\%$.

Несмотря на отсутствие общих корреляционных связей между вязкостью разрушения и другими механическими свойствами, нахождение частных корреляций нам представляется чрезвычайно полезным.

Рассмотрим зависимости, связывающие K_{Ic} с механическими характеристиками металлов при статическом растяжении. Всестороннее исследование нескольких высокопрочных сталей показало, что K_{Ic} увеличивается с повышением поперечного сужения образцов при обычных испытаниях на растяжение. Однако большая полоса разброса, наблюдаемая для корреляции $K_{Ic} - \psi$, приводит к заключению, что последняя может быть использована только как качественная зависимость. Сужение, таким образом, является параметром, систематически изменяющимся при изменении K_{Ic} стали.

У титановых сплавов не выявляется корреляции вязкости разрушения с характеристиками пластичности (с δ и с ψ). Высокие конструктивные свойства могут быть получены при низких значениях относительного удлинения и поперечного сужения. Так, на сплаве ВТ22 получили

удовлетворительную вязкость разрушения ($K_{Ic} 2100 \pm 100 \text{ Н/мм}^{3/2}$) при $\delta = 3,5$; $\psi = 5\%$ и при возрастании этих показателей пластичности в два три раза.

В работе, проведенной на стали А517, было показано, что переход к плоскодеформированному напряженному состоянию при испытании на вязкость разрушения и при медленном изгибе стандартных образцов Шарпи происходит при одной и той же температуре. Фрактографический анализ привел к заключению, что в области критической температуры хрупкости при любом виде испытываемых образцов наблюдается изменение микромеханизма разрушения локальных объемов металла у вершины трещины. Интересная корреляция параметра K_{Ic} и данных испытаний стандартных образцов Шарпи были получены на медленный и ударный изгиб. В этом исследовании, проведенном на девяти различных марках стали, при медленном изгибе и динамическом нагружении испытывали образцы на вязкость разрушения и стандартные образцы Шарпи без трещины и с предварительно созданной усталостной трещиной. Температура испытания изменялась в интервале от -196 до $+30^\circ \text{C}$, а предел текучести исследуемых сталей от 280 до 1750 Н/мм^2 . Результаты испытания показали, что при ударных испытаниях образцов Шарпи как критическая температура хрупкости, так и работа разрушения повышаются по сравнению с теми же параметрами, полученными при испытании образцов Шарпи на медленный изгиб. Было обнаружено также, что значения K_{Ic} при статическом нагружении коррелируют с величиной работы разрушения при медленном нагружении образцов Шарпи с усталостной трещиной, а значения K_{Ic} при динамическом нагружении – с величиной работы разрушения при динамическом нагружении образцов Шарпи с усталостной трещиной. Кроме того, в области критической температуры и верхних значений работы разрушения (рис. 6.3) наблюдается корреляция значений K_{Ic} при медленном изгибе и результатов стандартных ударных испытаний образцов Шарпи. Для

указанных областей кривой температурной зависимости работы удара (см. рис. 6.3) предложены следующие эмпирические соотношения, связывающие коэффициент K_{Ic} с работой разрушения A :

$$K_{Ic}^2 / E = 2(A)^{3/2}$$

для области вязко-хрупкого перехода (а) и

$$\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_{0,2}} \right)^2 = \frac{5}{\sigma_{0,2}} \left(A - \frac{\sigma_{0,2}}{20} \right)$$

для области верхних значений запасенной энергии (б). Подобная связь вязкости разрушения с характеристиками материала при ударном испытании может быть использована и для предсказания влияния скорости нагружения на величину K_{Ic} .

Результаты, полученные при изучении титановых сплавов, позволяют построить корреляционные зависимости вязкости разрушения с ударной вязкостью a_n , работой распространения трещины при ударном a_{Ty} и статическом a_p изгибах. На рисунке 6.4 представлены эти зависимости. Можно видеть, что через полученные экспериментальные точки можно провести прямые линии, характеризующие качественное изменение попарно связываемых величин $K_{Ic} - a_p$, $K_{Ic} - a_{Ty}$ и $K_{Ic} - a_n$. Однако тесной корреляции не наблюдается, разброс чрезвычайно велик. Поэтому можно говорить только о качественном изменении в одну сторону упомянутых величин при изменении режима термообработки. Различие в положении линий $K_{Ic} - a_{Ty}$ и $K_{Ic} - a_n$ обусловлено работой, которую необходимо затратить на зарождение трещины в образцах с надрезом Менаже.

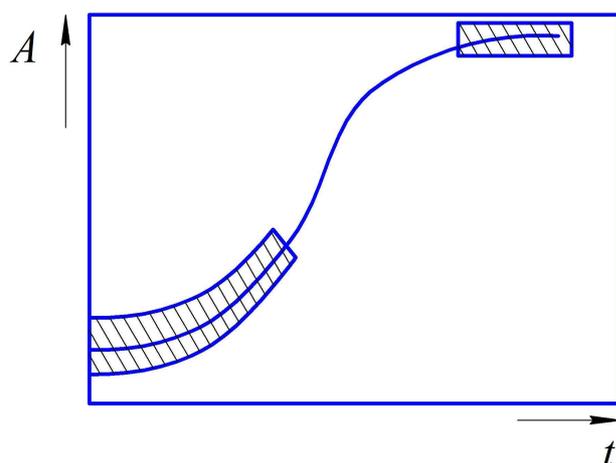


Рисунок 6.3 – Температурная зависимость работы разрушения при ударных испытаниях образцов Шарпи с V-образным надрезом. В заштрихованных областях кривой наблюдается корреляция между значениями K_{Ic} и A

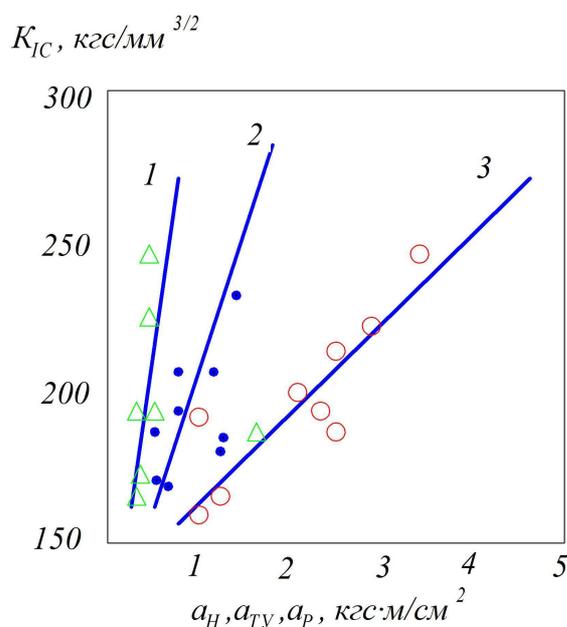


Рисунок 6.4 – Корреляция K_{Ic} с a_p (1), a_{ty} (2) и a_n (3)

Кнол и Кауфман установили, что для листов из алюминиевых сплавов заданной толщины между K_{Ic} и K_c и удельной работой распространения трещины при внецентренном растяжении образцов с надрезом по Кану существует прямая связь. Но так как на величину K_c влияет толщина, то вид указанной зависимости будет меняться с изменением толщины.

На листах из алюминиевых сплавов 7075 толщиной 6,3 и 8 мм наблюдали одинаковую тенденцию зависимости вязкости разрушения K_{Ic} и

удельной работы разрушения образцов Шарпи с трещиной при ударном изгибе $a_{\text{тy}}$ от толщины и направления вырезки образцов. Значения K_{Ic} определяли на образцах шириной $W = 230$ мм и длиной 630 мм с центральной сквозной трещиной длиной $W/3$, а также на образцах, втрое меньших по размерам. Существование прямой корреляции между K_{Ic} и $a_{\text{тy}}$ обнаружено не было.

Известна корреляция между K_{Ic} и результатами испытания полунатурных образцов с толщиной в рабочую толщину листа с предельно жестким надрезом при ударном нагружении в условиях трехточечного изгиба.

Следует отметить, что несмотря на наличие наблюдаемой в указанных выше исследованиях корреляции между K_{Ic} и результатами испытаний по Кану и Шарпи, характеристики, получаемые в последних, хотя и дают возможность непосредственно сравнить сплавы по работе, которая необходима для распространения трещины соответственно при статическом и динамическом нагружениях, все же не является абсолютной мерой критической интенсивности напряжений в вершине трещины. Поэтому они могут быть использованы только в качестве отборочных, но не служебных характеристик, гарантирующих безопасность от разрушения.

Из анализа многочисленных литературных данных следует, что независимо от основы сплава, как правило, сростом прочностных характеристик (σ_B и $\sigma_{0,2}$) величины K_{Ic} , $a_{\text{тy}}$, a_H и a_p уменьшаются. Однако четкой корреляции не наблюдается. При одном и том же уровне прочности вязкость разрушения может различаться вдвое.

Предпринимали многочисленные попытки оценить величину K_{Ic} , задаваясь распределением напряжений и деформаций в пластической зоне впереди вершины трещины и критерием разрушения. Ниже рассмотрены некоторые попытки оценки K_{Ic} с расчетным путем.

Распространение трещины сколом. Хан и Розенфельд предложили для стали эмпирическую формулу для расчета K_{Ic} по значениям напряжения скола σ_{cl} и пределу текучести $\sigma_{0,2}$:

$$K_{Ic} = 0,39(\sigma_{cl} - \sigma_{0,2}).$$

Они же в соавторе с Хоагландом показали, что

$$K_{Ic} = \frac{1,094}{0,7^2 \sigma_{0,2}^2} \left(\frac{0,7\sigma_{cl}}{2,35} \right)^3.$$

Эти уравнения показывают, что при распространении трещины по механизму скола основными переменными являются σ_{cl} и $\sigma_{0,2}$, которые должны иметь размерность Н/мм². Предел текучести, как известно, зависит от температуры испытания, скорости деформации, зерна, степени легирования и термической обработки, тогда как σ_{cl} зависит, главным образом, от размера зерна феррита.

Вязкое распространение трещины. При распространении трещины по вязкому механизму вершина трещины затупляется. Затупление трещины следует рассматривать как первую стадию вязкого распространения трещины. При этом смещение вершины трещины δ_t примерно равно полураскрытию трещины δ . Для материалов, у которых $\delta_t \approx d$ (диаметру димпла), т.е. для материалов, у которых димплы образуются на грубых включениях величину K_{Ic} можно оценить по следующему уравнению $K_{Ic} = \sqrt{2E\sigma_{0,2}d}$, Крафт ввел новый параметр материала d_T – размер зоны, в которой происходят процессы, приводящие к разрушению (численно равной расстоянию между включениями) и показал, что разрушение произойдет тогда, когда равномерная деформация ε_l , равная коэффициенту деформационного упрочнения n , достигается на расстоянии d_T впереди вершины трещины:

$$K_{Ic} = En\sqrt{2\pi d_T} = E\varepsilon_1\sqrt{2\pi d_T}$$

При исследовании зависимости между K_{Ic} и свойствами материала при растяжении в работе получено следующее соотношение:

$$K_{Ic} = \sqrt{2/3E\sigma_{0,2}n^2\varepsilon'}$$

где E – модуль Юнга, n – коэффициент деформационного упрочнения, ε' – истинная деформация до разрушения гладкого образца. Расчетные значения K_{Ic} , полученные по данному уравнению, находятся в согласии с экспериментальными значениями (однако с точностью $\pm 30\%$) для одиннадцати различных алюминиевых и титановых сплавов и сталей.

По нашему мнению, поиски множественной корреляции могут более точно решить задачу нахождения вязкости разрушения по известным значениям механических свойств. Анализ данных по вязкости разрушения позволяет утверждать о наличии качественной зависимости между пределом прочности, пределом текучести, относительным удлинением и поперечным сужением с одной стороны и вязкостью разрушения с другой. Известно, что при переходе от сплава к сплаву, при изменении режима термической обработки, способа получения полуфабриката, температуры испытания или ориентировки трещины, вязкость разрушения растет, если прочность ($\sigma_B, \sigma_{0,2}$) и пластичность (δ и ψ) повышаются, и уменьшается, если σ_B и $\sigma_{0,2}$ увеличиваются, а δ и ψ снижаются. При других вариантах взаимного изменения указанных четырех характеристик вязкость разрушения может изменяться в разные стороны, но не правильно.

Таким образом, проведенный анализ показывает, что в настоящее время нет универсальной зависимости, связывающей вязкость разрушения с другим (или другими) легко определяемым параметром механических свойств, поэтому при оценке качества металла с позиций вязкости разрушения необходимы испытания с целью определения величины K_{Ic} .

Однако, при сопоставлении различных вариантов технологии производства и обработки материалов использование указанных корреляционных связей вполне оправдано.

Данные по корреляции между кинетическими параметрами разрушения (dl/dN , $dl/d\tau$ и др.) и другими механическими свойствами вообще практически отсутствуют, однако нахождение их, хотя бы для частных случаев, нам представляется еще более важным чем для K_{Ic} и K_c в силу еще большей длительности и трудоемкости определения указанных параметров. В общем случае емкости определения указанных параметров. В общем случае корреляции между критическими (K_{Ic} , K_c и др.) и кинетическими (dl/dN , $dl/d\tau$ и др.) параметрами разрушения, по-видимому, не существует.

6.9 Основные способы повышения вязкости разрушения

До настоящего времени при разработке различных сплавов, термомеханических параметров их деформации и режимов термической обработки руководствовались в основном требованиями по стандартным механическим свойствам, регламентируемым техническими условиями σ_B , $\sigma_{0,2}$, δ , ψ , a_n и иногда по некоторым специальным характеристикам, таким, как сопротивление ползучести, усталости и некоторым другим. Характеризуя способность материала сопротивляться различным видам нагружения, при эксплуатации реальных деталей, эти свойства вместе с тем не полностью отражают их работоспособность, надежность и безопасную повреждаемость в рабочих условиях. Это связано с тем, что указанные свойства определяют на бездефектных образцах или образцах с мелкими концентраторами напряжений, тогда как реальные конструкции значительную часть своей жизни работают при наличии дефектов типа трещин.

Поэтому вязкость разрушения является одной из важнейших характеристик металла, определяющих надежность и долговечность конструкций.

В последние годы появилось много работ, в которых исследованы способы повышения вязкости разрушения материала. Это разработка новых сплавов, обладающих повышенной вязкостью разрушения, это и модернизация существующих сплавов за счет повышения чистоты металла по примесям, это и разработка новых способов получения полуфабрикатов и их термической обработки.

На ваш взгляд, заслуживают внимание поиски уточнения химического состава. При этом можно заметно повысить вязкость разрушения и снизить ее анизотропию.

Исследовалось влияние содержания меди, магния и марганца в сплаве типа Д16 на вязкость разрушения K_{Ic} крупногабаритных прессованных полуфабрикатов и изучали причины, обуславливающие изменение вязкости разрушения при варьировании химического состава сплава и примесей в нем в пределах стандартного состава.

Чтобы вывести аналитические зависимости вязкости разрушения и других механических свойств от состава, использовали метод математического планирования эксперимента. При варьировании химического состава в пределах стандарта на сплав достаточно, как правило, использовать планы первого порядка. Поэтому в качестве плана эксперимента была использована матрица полного факторного эксперимента 2^3 (6.4). Независимыми переменными являлись концентрации меди (X_1), магния (X_2), взятые на нижнем и верхнем пределах паспортного состава: верхний уровень марганца (X_3) соответствовал паспорту сплава, а нижний – минимальному содержанию, необходимому для получения полуфабрикатов с нерекристаллизованной структурой.

Таблица 6.4 План эксперимента

Факторы	<i>Cu</i>	<i>Mg</i>	<i>Mn</i>
Код	X_1	X_2	X_3
Основной уровень	4,25	1,45	0,80
Интервал варьирования	0,55	0,22	0,15
Верхний уровень	4,8	1,7	0,95
Нижний уровень	3,7	1,25	0,65

X_1 , X_2 и X_3 – кодированные значения концентраций (алгебраическая разность между действительной и средней концентрациями в исследуемом интервале варьирования, отнесенные к величине этого интервала).

Содержание кремния не превышало 0,2%, а железа 0,4%.

В соответствии с выбранным планом эксперимента искомая зависимость от химического состава должна выражаться следующим уравнением:

$$K_{lc}, \sigma_{0,2}$$

или

$$\delta = a_0 + a_1X_1 + a_2X_2 + a_3X_3 + a_4X_1X_2 + a_5X_1X_3 + a_6X_2X_3 + a_7X_1X_2X_3, \quad (6.5)$$

где a_0, a_1, \dots, a_7 – коэффициенты, находимые из эксперимента.

Величина и знак коэффициентов a_i были отлиты 12 слитков диаметром 360 мм (табл. 6.5), из которых отпрессовали при температуре 420°С полосы сечением 65×175 мм². Слиток 9 имел среднее содержание легирующих элементов.

Таблица 6.5 Химический состав [%] опытных плавок

Условный номер слитка	<i>Cu</i>	<i>Mg</i>	<i>Mn</i>	Условный номер слитка	<i>Cu</i>	<i>Mg</i>	<i>Mn</i>
1	4,8	1,8	0,94	7	4,8	1,2	0,96
2	4,8	1,7	0,66	8	3,7	1,3	0,64
3	4,7	1,2	0,66	9	4,3	1,5	0,78
4	3,7	1,7	0,64	10	4,2	1,4	0,76
5	3,8	1,3	0,98	11	3,5	1,6	0,37
6	3,7	1,7	0,94	12	2,5	1,6	0,39

Образцы для механических испытаний вырезали из средней части по сечению и длине полос.

Результаты определения вязкости разрушению K_{Ic} и механических свойств при растяжении представлены в табл. 6.6.

Таблица 6.6 Свойства исследованных сплавов

Условный номер плавки	σ_B , Н/мм ²	$\sigma_{0,2}$, Н/мм ²	δ , %	K_{Ic} , Н/мм ^{3/2}
1	405/550	350/401	,30/11,0	1000/-
2	404/541	352/399	4,/12,5	1000/1400
3	413/536	336/365	5,5/12,7	1060/1600
4	419/534	318/376	7,6/13,8	1320/1600
5	404/527	338/379	4,7/12,8	1010/1540
6	410/526	328/368	6,3/13,1	1100/1390
7	418/548	347/397	4,5/11,6	880/1390
8	413/521	315/361	7,7/14,7	1440/1530
9	436/560	350/407	5,7/12,8	1160/1660

Примечание. В числителе – свойства в направлении толщины; в знаменателе – в продольном направлении.

Анализ результатов с позиций математического планирования эксперимента позволил получить регрессивные уравнения (модели) зависимости механических свойств от состава стали или сплава.

Для продольного направления (для образцов, при испытании которых нагрузку прикладывали вдоль направления прессования):

$$K_{Ic} = 1500 \pm 150, \quad (6.6)$$

$$\sigma_B = 535,4 + 0,84X_1 + 0,25X_2 + 0,24X_3 + 0,30X_1X_2 + 0,20X_2X_3, \quad (6.7)$$

$$\sigma_{0,2} = 381 + 0,96X_1 + 0,5X_2 + 0,54X_3 + 0,4X_1X_2 + 0,3X_1X_3 - 0,7X_2X_3, \quad (6.8)$$

$$\delta = 12,7 - 0,8X_1 - 0,2X_2 - 0,6X_3 - 0,2X_1X_2X_3. \quad (6.9)$$

Отсутствующие члены обобщенного уравнения (6.5) в уравнениях 6.6 - 6.12 статически незначимы.

В уравнении 6.6 зависимости K_{Ic} в продольном направлении от химического состава сплава все коэффициенты оказались незначимыми.

Сопоставление уравнений (6.6-6.12) показывает, что они содержат разное число членов обобщенного уравнения (6.5), причем одни и те же элементы (X_1, X_2, X_3) или их сочетания ($X_1X_2, X_1X_3, X_2X_3, X_1X_2X_3$) по-разному влияют на изученные характеристики. Вот почему нет достаточно четкой корреляции механических свойств между собой, а также вязкости разрушения со стандартными механическими свойствами при изменении химического состава сплавов.

Анализируя уравнение (6.10), можно отметить, что увеличение содержания легирующих элементов меди и марганца приводит к уменьшению вязкости разрушения. Содержание магния практически не влияет на вязкость разрушения сплава. Максимальную вязкость разрушения в высотном направлении, равную $1360 \text{ Н/мм}^{3/2}$ имеет сплав, содержащий наименьшее количество легирующих элементов (все элементы на нижнем пределе, концентрации X_1, X_2 и X_3 равны -1), при этом относительное

удлинение также максимально и равно 8,2%, а предел текучести будет составлять 316 Н/мм², что удовлетворительно для высотного направления.

Для продольного направления вязкость разрушения систематически не зависит от изменения химического состава сплава и равна примерно 1500 ± 150 Н/мм^{3/2}. При определении вязкости разрушения в продольном направлении не удовлетворяется критерий $B \geq 2,5 (K_{Ic} / \sigma_{0,2})^2$ (B – толщина резца) и $P_{\max} / P_Q \leq 1,1$, видимо, при определении вязкости разрушения толщина образцов оказалась недостаточной. На пластичность в продольном направлении, в отличие от высотного направления, не влияют парные взаимодействия. Как и для высотного направления, медь в большей, а марганец в меньшей мере повышает предел текучести, однако в продольном направлении магний заметно сильнее влияет на $\sigma_{0,2}$.

Изменение свойств при варьировании химического состава сплава обусловлено изменением его структуры, причем основное влияние оказывают, по-видимому, интерметаллидные частицы, выпавшие из расплава, поскольку технология изготовления всех полос была одинаково. В работе определяли статические параметры микроструктуры: объемную долю включений в скоплениях, объемную долю включений между строчками, расстояние между строчками и некоторые другие. Наиболее тесная корреляция обнаружена между вязкостью разрушения, а также объемной долей включений сплава в скоплениях («эффективной» объемной доли).

В сплаве Д16, кроме меди, магния и марганца, содержатся примеси железа и кремния, которые также влияют на объемную долю включений в строчках.

Имеются сведения о механических свойствах при растяжении и параметре K_{Ic} серийных полос сечением 65×200 мм² из сплава Д16 с обычным (по 0,4%) и пониженным (<0,01%) содержанием железа и кремния в естественно и искусственно состаренном состояниях.

Значение K_{Ic} сплава Д16 в состояниях T и T1 повышенной степени чистоты по примесям железа и кремния существенно выше вязкости разрушения сплава стандартного химического состава. Особенно заметен рост с уменьшением содержания примесей в сплаве Д16Т1, состаренном по стандартному режиму (195°С, 12ч.). Таким образом, сплав Д16 повышенной степени чистоты имеет преимущественно по надежности в эксплуатации перед обычным серийным сплавом. Аналогичные данные были получены в работе на сплаве 2024Т3.

Таким образом, одним из способов повышения вязкости разрушения в сплавах систему $Al - Cu - Mg$ без заметного уменьшения прочности является повышение степени чистоты металла по примесям железа и кремния.

Уменьшение объемной доли частиц вторых фаз приводит к аналогичному эффекту, однако при этом не желательна потеря уровня прочности сплава.

Повышение надежности работы материала можно достичь не только за счет повышения его вязкости разрушения. Для этих целей следует использовать и некоторые очевидные конструктивные решения.

Чем больше вязкость разрушения, тем до большей длины может вырасти трещина при данном рабочем напряжении.

Повышение надежности и работоспособности материала с трещиной может быть достигнуто путем рационального выбора конструкций, предусматривающего затруднение для распространения трещины от мест возможного ее зарождения. Например, представляется целесообразным создание на пути развития трещин плоских щелей или плоских включений более мягкого материала, которые будут «гасить» распространяющуюся трещину. Важно также рационально выбирать толщину изделия с учетом рабочего напряжения и критического размера трещины при заданном напряжении.

В связи с этим представляется целесообразным создание слоистых или волокнистых материалов, толщина слоев (диаметр волокон) которых меньше

критического размера трещины при данном расчетном напряжении. В качестве примера рассмотрим сосуд высокого давления, изготовленный из стали 40ХН и рассчитанный на максимальное напряжение $\sigma = 1425 \text{ Н/мм}^2$. Если этот сосуд изготовить из пластин толщиной 0,6 мм (критическая глубина трещины при $K_{Ic} = 2260 \text{ Н/мм}^{3/2}$), то долговечность этого сосуда значительно увеличится, поскольку первая возникшая трещина не приведет к разрушению, так как она не сможет сразу перейти в соседнюю пластину, и процесс разрушения сосуда значительно растянется во времени.

Оптимальным конструктивным решением детали в общем случае будет такое, когда деталь как единое целое состоит из множества элементов, геометрические размеры которых в направлении наиболее вероятного распространения трещины будет меньше критической длины трещины, зависящей от максимального рабочего напряжения.

Необходимо в связи с этим отметить исследования Я. Б. Фридмана по определению траектории трещины и законов движения ее вершины. В его работе приведены уравнения, позволяющие определить поверхность излома по телу и связь внешней нагрузки с параметрами тела и материалов для двух видов трещины: 1) начало и развитие трещины внутри тела и 2) начало и развитие трещины на поверхности тела.

Таким образом, в принципе конструктор может выбрать для детали соответствующий материал и конструктивно ее оформить так, чтобы затруднить продвижение трещины.

Следовательно, повышение надежности и работоспособности деталей конструкций может достигаться не только применением металлов и сплавов с более высоким сопротивлением распространению трещины (с более высокой вязкостью разрушения), но и соответствующим конструированием с учетом возможных траекторий распространения трещины.

При эксплуатации изделия важно, чтобы нестабильный рост трещины начинался при длине трещины как можно большей. Иначе говоря, чем больше может вырастать трещины без опасности возникновения внезапного

разрушения (в результате нестабильного роста трещины), тем выше работоспособность с трещиной.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве заключения следует привести слова действительного члена Академии наук СССР и РАН, Генерального конструктора Н. Д. Кузнецова – выдающегося ученого, специалиста в области конструкционной прочности и надежности двигателей летательных аппаратов:

«... При проектировании и доводке нового двигателя должны быть предусмотрены мероприятия по обеспечению прочности машины при большом ресурсе (рисунок 7.1). При этом анализируется и учитываются такие показатели и процессы, как статическая напряженность, температура и температурные напряжения, общие вибрации и переменные напряжения в деталях, выносливость деталей, обнаружение неисправностей и предупреждение критических состояний, стабильность производства узлов и деталей.

Для дальнейшего развития научных основ обеспечения надежности машин важное значение имеет комплексное использование достижений фундаментальных и прикладных наук (рисунок 7.2), что позволит по результатам глубокого изучения и анализа отмеченных процессов и явлений раскрывать их закономерности и в конечном итоге создавать изделия с заранее заданными показателями надежности.»

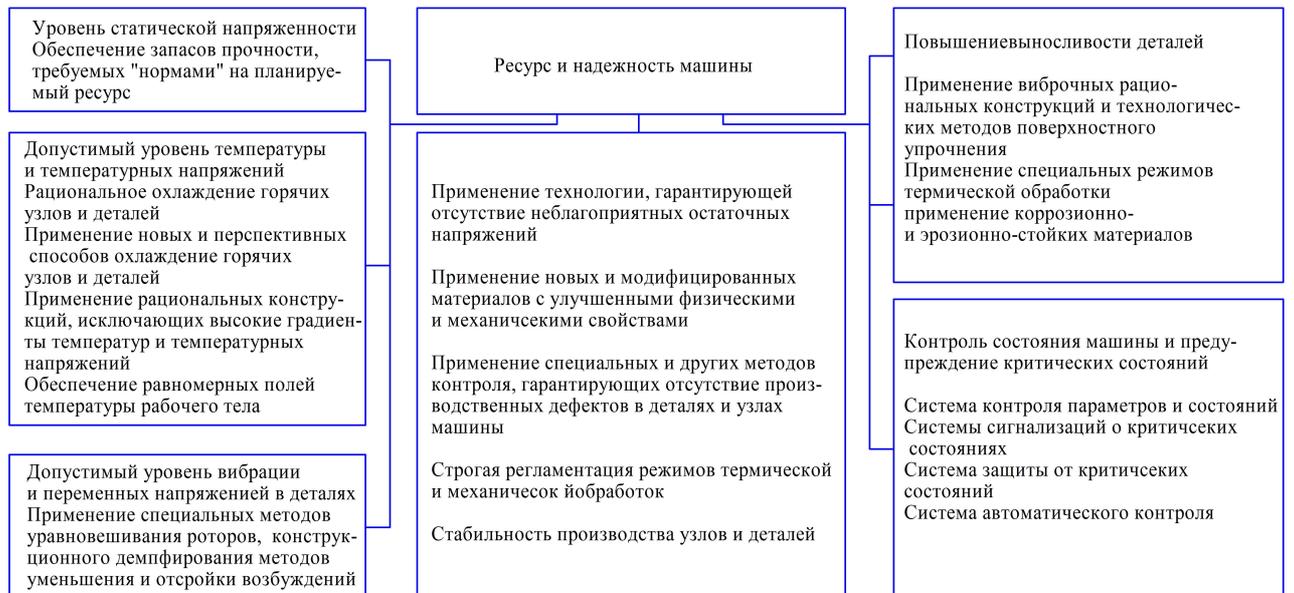


Рисунок 7.1 – Мероприятия по обеспечению прочности машины при большом ресурсе

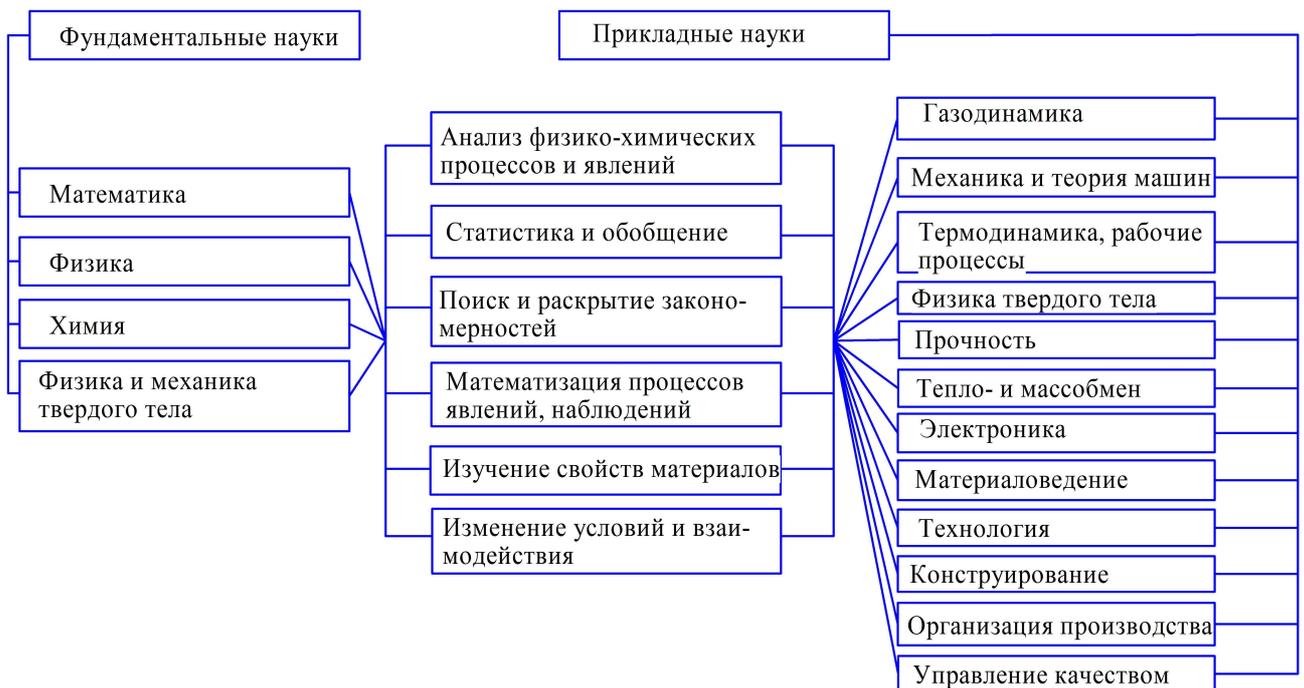


Рисунок 7.2 – Научные и технические основы обеспечения надежности