

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Белорусский национальный технический университет

**НАДЕЖНОСТЬ И ИСПЫТАНИЕ
ЭКСПОЗИЦИОННО-РЕКЛАМНЫХ ОБЪЕКТОВ**

Учебно-методическое пособие для студентов специальности
1-52 04 01 «Производство экспозиционно-рекламных объектов»

Учебное электронное издание

Минск ◊ БНТУ ◊ 2012

УДК 658.562.5

Автор - составитель:

М.В. Митенков, А.Д.Маляренко

Рецензенты:

*В.Г. Смирнов, профессор кафедры
«Стандартизация, метрология и управление качеством»
БГИПК по стандартизации, кандидат технических наук;
З.Н. Козловская, зав.кафедрой «Международные
экономические отношения» ФММП БНТУ,
доцент, кандидат технических наук*

В учебно-методическом пособии рассматриваются основные вопросы надежности и испытания экспозиционно-рекламных объектов. Материал изложен в объеме программы курса «Надежность и испытание экспозиционно-рекламных объектов» для технического университета.

Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.(017) 232-77-52 факс (017) 232-91-37
E-mail: tiro-fmme@tut.by
Регистрационный № БНТУ/ФММП101-28.2012

© М.В. Митенков, 2012

© А.Д. Маляренко 2012

© БНТУ, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|--|-----------|
| Тема №1. Определение количественных характеристик надежности экспозиционно-рекламных объектов..... | 5 |
| 1.1. <i>Определение количественных характеристик надежности по статистическим данным об отказах изделия.....</i> | 5 |
| 1.2. <i>Решение типовых задач.....</i> | 7 |
| 1.3. <i>Задачи для самостоятельного решения.....</i> | 9 |
| 1.4. <i>Контрольные вопросы.....</i> | 13 |
| Тема №2. Аналитическое определение количественных характеристик надёжности изделия..... | 14 |
| 2.1. <i>Теоретические сведения.....</i> | 14 |
| 2.2. <i>Решение типовых задач.....</i> | 16 |
| 2.3. <i>Задачи для самостоятельного решения.....</i> | 20 |
| 2.4. <i>Контрольные вопросы.....</i> | 23 |
| Тема №3. Расчет резервированных систем..... | 24 |
| 3.1. <i>Последовательное соединение элементов в систему.....</i> | 24 |
| 3.2. <i>Решение типовых задач.....</i> | 26 |
| 3.3. <i>Задачи для самостоятельного решения.....</i> | 29 |
| 3.4. <i>Расчет надежности системы с постоянным резервированием.....</i> | 32 |
| 3.5. <i>Примеры расчета надежности системы с постоянным резервированием.....</i> | 35 |
| 3.6. <i>Контрольные вопросы.....</i> | 37 |
| Тема №4. Статические испытания материалов экспозиционно-рекламных объектов. Испытания на растяжение | 38 |
| 4.1. <i>Образцы и машины для испытаний на растяжение.....</i> | 38 |
| 4.2. <i>Методика проведения испытаний на растяжение.....</i> | 45 |
| 4.3. <i>Прочностные характеристики при растяжении.....</i> | 47 |
| 4.4. <i>Характеристики пластичности при растяжении.....</i> | 53 |
| 4.5. <i>Работа пластической деформации при растяжении.....</i> | 55 |
| 4.6. <i>Контрольные вопросы.....</i> | 57 |
| Тема №5. Статические испытания на сжатие, изгиб и кручение..... | 58 |
| 5.1. <i>Испытания на сжатие.....</i> | 58 |
| 5.2. <i>Испытания на изгиб.....</i> | 62 |

| | |
|---|------------|
| 5.3. Испытания на кручение..... | 67 |
| 5.4. Контрольные вопросы..... | 73 |
| Тема №6. Испытание материалов на усталость..... | 74 |
| 6.1. Понятие усталости и выносливости..... | 74 |
| 6.2. Методика проведения усталостных испытаний..... | 74 |
| 6.3. Испытания на малоцикловую усталость..... | 82 |
| 6.4. Испытания на циклическую трещиностойкость..... | 85 |
| 6.5. Контрольные вопросы..... | 89 |
| Тема №7. Сварные соединения. Принципы оценки свойств сварных соединений..... | 90 |
| 7.1. Предельные состояния и свойства сварных соединений..... | 90 |
| 7.2. Целевое назначение испытаний и расчетов сварных соединений и конструкций..... | 93 |
| 7.3. Неравнопрочность сварного соединения и требования к испытаниям..... | 96 |
| 7.4. Коэффициенты запаса..... | 99 |
| 7.5. Расчетная и конструкционная прочность..... | 105 |
| 7.6. Контрольные вопросы..... | 108 |
| Тема №8. Методы испытаний сварных соединений и конструкций..... | 109 |
| 8.1. Классификация методов испытаний..... | 109 |
| 8.2. Статические испытания на одноосное растяжение стыковых сварных соединений..... | 110 |
| 8.3. Статические испытания на двухосное растяжение стыковых сварных соединений..... | 113 |
| 8.4. Статические и ударные испытания на одноосный изгиб..... | 124 |
| 8.5. Испытания на статический и малоцикловый двухосный изгиб..... | 131 |
| 8.6. Испытания сварных узлов стержневых конструкций из труб..... | 133 |
| 8.7. Статические испытания угловых швов..... | 135 |
| 8.8. Контрольные вопросы..... | 140 |
| Список используемых источников..... | 142 |

Тема № 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЕЖНОСТИ ЭКСПОЗИЦИОННО-РЕКЛАМНЫХ ОБЪЕКТОВ

Цель работы: Научиться рассчитывать количественные характеристики надежности по статистическим данным об отказах изделия. Ознакомиться с основными закономерностями.

1.1. Определение количественных характеристик надежности по статистическим данным об отказах изделия

Теоретические сведения. Вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах оценивается выражением:

$$P^*(t) = \frac{n(t)}{N}, \quad 1.1$$

где $n(t)$ – число изделий, не отказавших к моменту времени t ;

N – число изделий, поставленных на испытания;

$P^*(t)$ – статистическая оценка вероятности безотказной работы изделия.

Для вероятности отказа по статистическим данным справедливо соотношение:

$$q^*(t) = \frac{N - n(t)}{N}, \quad 1.2$$

где $N - n(t)$ – число изделий, отказавших к моменту времени t ;

$q^*(t)$ – статистическая оценка вероятности отказа изделия.

Частота отказов по статистическим данным об отказах определяется выражением:

$$f^*(t) = \frac{\Delta n(t)}{N \cdot \Delta t}, \quad 1.3$$

где $\Delta n(t)$ – число отказавших изделий на участке времени $(t, t + t)$;

$f^*(t)$ – статистическая оценка частоты отказов изделия;

t – интервал времени.

Интенсивность отказов по статистическим данным об отказах определяется формулой:

$$\lambda^*(t) = \frac{\Delta n(t)}{n(t) \cdot \Delta t}, \quad 1.4$$

где $n(t)$ – число изделий, не отказавших к моменту времени t ;
 $\Delta n(t)$ – число отказавших изделий на участке времени $(t, t + t)$;
 $\lambda^*(t)$ – статистическая оценка интенсивности отказов изделия.

Среднее время безотказной работы изделия по статистическим данным оценивается выражением:

$$m_t^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, \quad 1.5$$

где t_i – время безотказной работы i – го изделия;
 N – общее число изделий, поставленных на испытания;
 m_t^* – статистическая оценка среднего времени безотказной работы изделия.

Для определения m_t^* по формуле (1.5) необходимо знать моменты выхода из строя всех N изделий. Можно определять m_t^* из уравнения:

$$m_t^* \approx \sum_{i=1}^m n_i t_{cp.i}, \quad 1.6$$

где n_i – количество вышедших из строя изделий в i – ом интервале времени;

$$t_{cp.i} = \frac{t_{i-1} + t_i}{2}; m = \frac{t_k}{\Delta t}; \Delta t = t_{i+1} - t_i; t_{i-1} - \text{время начала } i - \text{го интервала};$$

t_i – время конца i – го интервала;

t_k – время, в течение которого вышли из строя все изделия;

t – интервал времени.

Дисперсия времени безотказной работы изделия по статистическим данным определяется формулой:

$$D_t^* = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (t_i - m_t^*)^2, \quad 1.7$$

где D_t^* – статистическая оценка дисперсии времени безотказной работы изделия.

1.2. Решение типовых задач

Задача 1.1. На испытание поставлено 1000 однотипных световых приборов, за 3000 ч отказало 80 ламп. Требуется определить вероятность безотказной работы $P^*(t)$, вероятность отказа $q^*(t)$ при $t = 3000$ ч.

Решение. В данном случае $N = 1000$; $n(t) = 1000 - 80 = 920$;

$N - n(t) = 1000 - 920 = 80$. По формулам (1.1) и (1.2) определяем:

$$P^*(3000) = \frac{n(t)}{N} = \frac{920}{1000} = 0,92,$$

$$q^*(t) = \frac{N - n(t)}{N} = \frac{80}{1000} = 0,08.$$

Или

$$q^*(t) = 1 - P^*(t) = 1 - 0,92 = 0,08.$$

Задача 1.2. На испытание было поставлено 1000 однотипных ламп. За первые 3000 ч отказало 80 ламп, а за интервал времени 3000 – 4000 ч отказало еще 50 ламп. Требуется определить статистическую оценку частоты и интенсивности отказов электронных ламп в промежутке времени 3000 – 4000 ч.

Решение. В данном случае $N = 1000$; $t = 3000$ ч; $\Delta t = 1000$ ч; $\Delta n(t) = 50$; $n(t) = 920$.

По формулам (1.3) и (1.4) находим:

$$f^*(t) = f^*(3000) = \frac{\Delta n(t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{50}{1000 \cdot 1000} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ I /ч},$$

$$\lambda^*(t) = \lambda^*(3000) = \frac{\Delta n(t)}{n(t) \cdot \Delta t} = \frac{50}{870 \cdot 1000} = 5,74 \cdot 10^{-5} \text{ I /ч}.$$

Задача 1.3. На испытание поставлено $N = 400$ изделий. За время $t = 3000$ ч отказало 200 изделий, т.е. $n(t) = 400 - 200 = 200$. За интервал времени $(t, t + \Delta t)$, где $\Delta t = 100$ ч, отказало 100 изделий, т.е. $\Delta n(t) = 100$. Требуется определить $P^*(3000)$, $P^*(3100)$, $f^*(3000)$, $\lambda^*(3000)$.

Решение. По формуле (1.1) находим:

$$P^*(3000) = \frac{n(t)}{N} = \frac{200}{400} = 0,5,$$

$$P^*(3100) = \frac{n(t)}{N} = \frac{100}{400} = 0,25.$$

Используя формулы (1.3) и (1.4), получим:

$$f^*(t) = f^*(3000) = \frac{\Delta n(t)}{N \cdot \Delta t} = \frac{200}{400 \cdot 100} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч},$$

$$\lambda^*(t) = \lambda^*(3000) = \frac{\Delta n(t)}{n(t) \cdot \Delta t} = \frac{200}{200 \cdot 100} = 0,01 \text{ 1/ч}.$$

Задача 1.4. На испытание поставлено 6 однотипных изделий. Получены следующие значения t_i (t_i – время безотказной работы i – го изделия) : $t_1 = 280$ ч; $t_2 = 350$ ч; $t_3 = 400$ ч; $t_4 = 320$ ч; $t_5 = 380$ ч; $t_6 = 330$ ч.

Определить статистическую оценку среднего времени безотказной работы изделия.

Решение. По формуле (1.5) имеем:

$$m_t^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i = \frac{280+350+400+320+380+330}{6} = \frac{2060}{6} = 343,3 \text{ ч}.$$

Задача 1.5. За наблюдаемый период эксплуатации в рекламной установке было зафиксировано 7 отказов. Время восстановления составило: $t_1 = 12$ мин.; $t_2 = 23$ мин.; $t_3 = 15$ мин.; $t_4 = 9$ мин.; $t_5 = 17$ мин.; $t_6 = 28$ мин.; $t_7 = 25$ мин.; $t_8 = 31$ мин. Требуется определить среднее время восстановления аппаратуры m_{16} .

Решение.

$$m_{16}^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i = \frac{12+23+15+9+17+28+25+31}{8} = \frac{160}{8} = 20 \text{ мин}.$$

Задача 1.6. В результате наблюдения за 45 образцами световых рекламных щитов получены данные до первого отказа всех 45 образцов, сведенные в табл.1.1. Требуется определить m_e^* .

Таблица 1.1

Данные наблюдений

| $\Delta t_i, \text{ ч}$ | n_i | $\Delta t_i, \text{ ч}$ | n_i | $\Delta t_i, \text{ ч}$ | n_i |
|-------------------------|-------|-------------------------|-------|-------------------------|-------|
| 0-5 | 1 | 30-35 | 4 | 60-65 | 3 |
| 5-10 | 5 | 35-40 | 3 | 65-70 | 3 |
| 10-15 | 8 | 40-45 | 0 | 70-75 | 3 |
| 15-20 | 2 | 45-50 | 1 | 75-80 | 1 |

Окончание табл. 1.1

| | | | | | |
|-------|---|-------|---|--|--|
| 20-25 | 5 | 50-55 | 0 | | |
| 25-30 | 6 | 55-60 | 0 | | |

Решение. В данном случае:

$$t_{cp1} = 2,5; t_{cp2} = 7,5; t_{cp3} = 12,5; t_{cp4} = 17,5; t_{cp5} = 22,5; t_{cp6} = 27,5; t_{cp7} = 32,5; t_{cp8} = 37,5;$$

$$t_{cp9} = 42,5; t_{cp10} = 47,5; t_{cp11} = 52,5; t_{cp12} = 57,5; t_{cp13} = 62,5; t_{cp14} = 67,5; t_{cp15} = 72,5; t_{cp16} = 77,5; N = 45; m = 16.$$

Используя формулу (1.6), получим:

$$m_t^* \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^m n_i t_{cpi} = \frac{1 \cdot 2,5 + 5 \cdot 7,5 + 8 \cdot 12,5 + 2 \cdot 17,5 + 5 \cdot 22,5 + 6 \cdot 27,5 + 4 \cdot 32,5 + 3 \cdot 37,5}{45} +$$

$$+ \frac{0 \cdot 42,5 + 1 \cdot 47,5 + 0 \cdot 52,5 + 0 \cdot 57,5 + 3 \cdot 62,5 + 3 \cdot 67,5 + 3 \cdot 72,5 + 1 \cdot 77,5}{45} = \frac{1427,5}{45} = 31,7.$$

1.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача 1.7. На испытание поставлено N рекламных элементов. За T ч отказало $N1$ изделий. За интервал времени ΔT ч отказало ещё $N2$ изделий. Требуется определить $f^*(t)$, $\lambda^*(t)$ при $t = T$ ч. Данные для расчета взять из таблицы 1.2.

Задача 1.8. На испытание поставлено N рекламных элементов. За T ч отказало $N1$ изделий. Требуется определить $P^*(t)$ и $q^*(t)$ при $t = T$ ч. Данные для расчета взять из таблицы 1.2.

Таблица 1.2

Данные для расчета

| № по списку | N , штук | T , ч | $N1$, штук | ΔT , ч | $N2$, штук |
|-------------|------------|---------|-------------|----------------|-------------|
| 1. | 110 | 4000 | 30 | 200 | 35 |
| 2. | 200 | 4600 | 34 | 110 | 21 |
| 3. | 160 | 3800 | 57 | 120 | 34 |
| 4. | 180 | 5200 | 35 | 130 | 56 |
| 5. | 90 | 5690 | 21 | 140 | 17 |
| 6. | 70 | 4700 | 14 | 240 | 5 |
| 7. | 110 | 5820 | 56 | 250 | 21 |

Окончание табл. 1.2

| | | | | | |
|-----|-----|------|----|-----|----|
| 8. | 120 | 8000 | 57 | 160 | 34 |
| 9. | 130 | 6000 | 35 | 180 | 56 |
| 10. | 140 | 2000 | 21 | 110 | 57 |
| 11. | 240 | 3800 | 34 | 120 | 35 |
| 12. | 250 | 5200 | 56 | 130 | 21 |
| 13. | 160 | 5690 | 57 | 140 | 34 |
| 14. | 180 | 4700 | 35 | 240 | 56 |
| 15. | 90 | 5820 | 21 | 250 | 27 |
| 16. | 70 | 8000 | 18 | 160 | 8 |
| 17. | 110 | 6000 | 56 | 180 | 21 |
| 18. | 120 | 2000 | 57 | 110 | 34 |
| 19. | 130 | 3800 | 35 | 120 | 56 |
| 20. | 140 | 5200 | 21 | 300 | 57 |
| 21. | 160 | 5690 | 57 | 140 | 34 |
| 22. | 180 | 4700 | 35 | 240 | 56 |
| 23. | 90 | 5820 | 21 | 250 | 27 |

Задача 1.9. В течение T ч из $N1$ призматронов отказало $N2$. За интервал времени ΔT ч отказал еще один призматрон. Требуется определить $f^*(t)$, $\lambda^*(t)$ при $t = T$ ч. Данные для расчета взять из таблицы 1.3.

Таблица 1.3

Данные для расчета

| № по списку | $T, ч$ | $N1, штук$ | $\Delta T, ч$ | $N2, штук$ |
|-------------|--------|------------|---------------|------------|
| 1. | 2000 | 30 | 200 | 5 |
| 2. | 3800 | 34 | 110 | 2 |
| 3. | 5200 | 57 | 120 | 4 |
| 4. | 5690 | 35 | 130 | 6 |
| 5. | 4700 | 21 | 140 | 7 |
| 6. | 5820 | 14 | 240 | 5 |
| 7. | 8000 | 56 | 250 | 1 |
| 8. | 6000 | 57 | 160 | 4 |
| 9. | 2000 | 35 | 180 | 5 |
| 10. | 3800 | 21 | 110 | 5 |
| 11. | 5200 | 34 | 120 | 3 |
| 12. | 2000 | 56 | 130 | 2 |
| 13. | 3800 | 57 | 140 | 3 |
| 14. | 5200 | 35 | 240 | 5 |
| 15. | 5690 | 21 | 250 | 2 |

Окончание табл.1.3

| | | | | |
|-----|------|----|-----|---|
| 16. | 4700 | 18 | 160 | 4 |
| 17. | 5820 | 56 | 180 | 2 |
| 18. | 8000 | 57 | 110 | 3 |
| 19. | 6000 | 35 | 120 | 5 |
| 20. | 2000 | 21 | 300 | 5 |

Задача 1.10. На испытание поставлено N однотипных электронных ламп. За первые T ч отказало $N1$ ламп. За следующий интервал времени ΔT ч отказало еще $N2$ ламп. Требуется определить $p^*(t)$ и $q^*(t)$ при $t = T + \Delta T$ ч. Данные для расчета взять из таблицы 1.4.

Задача 1.11. На испытание поставлено N изделий. За время $t = T$ ч вышло из строя $N1$ штук изделий. За последующий интервал времени ΔT ч вышло из строя еще $N2$ изделий. Необходимо вычислить $p^*(t)$ при $t = T$ ч и $t = T + \Delta T$ ч; $f^*(t)$, $\lambda^*(t)$ при $t = T$ ч. Данные для расчета взять из таблицы 1.4.

Таблица 1.4

Данные для расчета

| № по списку | N , штук | T , ч | $N1$, штук | ΔT , ч | $N2$, штук |
|-------------|------------|---------|-------------|----------------|-------------|
| 1. | 1100 | 4000 | 30 | 1200 | 35 |
| 2. | 2000 | 4600 | 34 | 1110 | 21 |
| 3. | 1600 | 3800 | 57 | 1120 | 34 |
| 4. | 1800 | 5200 | 35 | 1130 | 56 |
| 5. | 900 | 5690 | 21 | 1140 | 17 |
| 6. | 700 | 4700 | 14 | 1240 | 5 |
| 7. | 1100 | 5820 | 56 | 1250 | 21 |
| 8. | 1200 | 8000 | 57 | 1160 | 34 |
| 9. | 1300 | 6000 | 35 | 1180 | 56 |
| 10. | 1400 | 2000 | 21 | 1110 | 57 |
| 11. | 2400 | 3800 | 34 | 1120 | 35 |
| 12. | 2500 | 5200 | 56 | 1130 | 21 |
| 13. | 1600 | 5690 | 57 | 1140 | 34 |
| 14. | 1800 | 4700 | 35 | 1240 | 56 |
| 15. | 900 | 5820 | 21 | 1250 | 27 |
| 16. | 700 | 8000 | 18 | 1160 | 8 |
| 17. | 1100 | 6000 | 56 | 1180 | 21 |
| 18. | 1200 | 2000 | 57 | 1110 | 34 |
| 19. | 1300 | 3800 | 35 | 1120 | 56 |
| 20. | 1400 | 5200 | 21 | 1300 | 57 |

Задача 1.12. В результате наблюдения за 45 образцами выставочного оборудования, которые прошли предварительную 80 – часовую приработку, получены данные до первого отказа всех 45 образцов, сведенные в табл.1.5. Необходимо определить m_t^* .

Таблица 1.5

Данные наблюдений

| $t_i, ч$ | n_i | $t_i, ч$ | n_i | $t_i, ч$ | n_i |
|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
| 0-10 | 19 | 30-40 | 3 | 60-70 | 1 |
| 10-20 | 13 | 40-50 | 0 | | |
| 20-30 | 8 | 50-60 | 1 | | |

Задача 1.13. На испытание поставлено 8 однотипных лайтбоксов. Получены следующие значения t_i (t_i – время безотказной работы i – го изделия):

$$t_1 = 560 \text{ ч}; t_2 = 700 \text{ ч}; t_3 = 800 \text{ ч}; t_4 = 650 \text{ ч};$$

$$t_5 = 580 \text{ ч}; t_6 = 760 \text{ ч}; t_7 = 920 \text{ ч}; t_8 = 850 \text{ ч}.$$

Определить статистическую оценку среднего времени безотказной работы изделия.

Задача 1.14. За наблюдаемый период эксплуатации в призматроне было зарегистрировано 6 отказов. Время восстановления составило: $t_1; t_2; t_3; t_4; t_5; t_6$; Требуется определить среднее время восстановления аппаратуры $m_{тв}^*$. Данные для расчета взять из таблицы 1.6.

Таблица 1.6

Данные для расчета

| № по списку | $t_1, \text{ мин}$ | $t_2, \text{ мин}$ | $t_3, \text{ мин}$ | $t_4, \text{ мин}$ | $t_5, \text{ мин}$ | $t_6, \text{ мин}$ |
|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 1. | 21 | 34 | 30 | 17 | 35 | 21 |
| 2. | 14 | 57 | 34 | 5 | 21 | 14 |
| 3. | 56 | 35 | 57 | 21 | 34 | 21 |
| 4. | 57 | 21 | 35 | 34 | 56 | 14 |
| 5. | 35 | 14 | 21 | 17 | 17 | 21 |
| 6. | 21 | 56 | 14 | 5 | 5 | 14 |
| 7. | 34 | 57 | 56 | 21 | 21 | 21 |
| 8. | 56 | 35 | 57 | 34 | 34 | 14 |
| 9. | 57 | 21 | 35 | 17 | 56 | 21 |
| 10. | 35 | 34 | 21 | 5 | 57 | 14 |
| 11. | 21 | 56 | 34 | 21 | 35 | 21 |
| 12. | 18 | 57 | 56 | 34 | 21 | 14 |
| 13. | 56 | 35 | 57 | 17 | 34 | 21 |
| 14. | 21 | 21 | 35 | 5 | 56 | 14 |

Окончание табл. 1.6

| | | | | | | |
|-----|----|----|----|----|----|----|
| 15. | 14 | 34 | 21 | 21 | 27 | 21 |
| 16. | 56 | 57 | 18 | 34 | 8 | 14 |
| 17. | 57 | 35 | 56 | 17 | 21 | 21 |
| 18. | 35 | 21 | 57 | 5 | 34 | 14 |
| 19. | 21 | 14 | 35 | 21 | 56 | 21 |
| 20. | 34 | 56 | 21 | 34 | 57 | 14 |

Задача 1.15. На испытание поставлено 1000 изделий. За время $t = 11000$ ч вышло из строя 410 изделий. За последующий интервал времени $11000 - 12000$ ч вышло из строя еще 40 изделий. Необходимо вычислить $p^*(t)$ при $t = 11000$ ч и $t = 12000$ ч, а также $f^*(t)$, $\lambda^*(t)$ при $t = 11000$ ч.

1.4. Контрольные вопросы

1. Каким выражением оценивается вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах?
2. Как определяется частота отказов по статистическим данным об отказах?
3. Какую формулу используют при определении интенсивности отказов по статистическим данным об отказах?
4. Как определяется среднее время безотказной работы изделия?
5. Как проводят статистическую оценку дисперсии времени безотказной работы изделия?

Тема № 2

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НАДЁЖНОСТИ ИЗДЕЛИЯ

Цель работы: Научиться рассчитывать количественные характеристики надёжности изделия. Ознакомиться с основными закономерностями.

2.1. Теоретические сведения

Рассмотрим основные формулы, по которым определяются количественные характеристики надёжности изделия:

$$p(t) = \exp\left(-\int_0^t \lambda(t)dt\right) = 1 - \int_0^t f(t)dt \quad 2.1$$

$$q(t) = 1 - p(t) \quad 2.2$$

$$f(t) = \frac{dq(t)}{dt} = -\frac{dp(t)}{dt} \quad 2.3$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)} \quad 2.4$$

$$m_t = \int_0^{\infty} p(t)dt \quad 2.5$$

где $p(t)$ – вероятность безотказной работы изделия на интервале времени от 0 до t ;
 $q(t)$ – вероятность отказа изделия на интервале времени от 0 до t ;
 $f(t)$ – частота отказов изделия или плотность вероятности времени безотказной работы изделия T ;
 $\lambda(t)$ – интенсивность отказов изделия;
 m_t – среднее время безотказной работы изделия.

Формулы (2.1) – (2.5) для экспоненциального закона распределения времени безотказной работы изделия примут вид:

$$p(t) = e^{-\lambda t}; \quad 2.6$$

$$q(t) = 1 - e^{-\lambda t}; \quad 2.7$$

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda t}; \quad 2.8$$

$$\lambda(t) = \frac{\lambda \cdot e^{-\lambda t}}{e^{-\lambda t}} = \lambda; \quad 2.9$$

$$m_t = \frac{1}{\lambda}. \quad 2.10$$

Формулы (2.1) – (2.5) для нормального закона распределения времени безотказной работы изделия примут вид:

$$p(t) = 0,5 - \Phi(U) \quad U = \frac{t - m_t}{\sigma_t}; \quad 2.11$$

$$q(t) = 0,5 + \Phi(U) \quad \Phi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^U e^{-\frac{U^2}{2}} dU; \quad 2.12$$

$$f(t) = \frac{\varphi(U)}{\sigma_t} \quad \varphi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{U^2}{2}}; \quad 2.13$$

$$\lambda(t) = \frac{\varphi(U)}{\sigma(t)} \cdot \frac{1}{0,5 - \Phi(U)}, \quad 2.14$$

где $\Phi(U)$ – функция Лапласа, обладающая свойствами:

$$\Phi(0) = 0; \quad 2.15$$

$$\Phi(-U) = -\Phi(U); \quad 2.16$$

$$\Phi(\infty) = 0,5. \quad 2.17$$

Значения функции Лапласа приведены в приложении П.7.13 [12].

Значения функции $\varphi(U)$ приведены в приложении П.7.17 [12].

Здесь m_t – среднее значение случайной величины T ;

σ_t^2 – дисперсия случайной величины T ;

T – время безотказной работы изделия.

Формулы (2.1) – (2.5) для закона распределения Вейбулла времени безотказной работы изделия имеют вид:

$$p(t) = \exp(-at^k); \quad 2.18$$

$$q(t) = 1 - \exp(-at^k); \quad 2.19$$

$$f(t) = 1 - \exp(-at^k); \quad 2.20$$

$$\lambda(t) = akt^{k-1}; \quad 2.21$$

$$m(t) = \frac{\frac{1}{k} \cdot \Gamma\left(\frac{1}{k}\right)}{\alpha^{\frac{1}{k}}}, \quad 2.22$$

где a, k – параметры закона распределения Вейбулла;

$\Gamma(x)$ – гамма – функция, значения которой приведены в приложении П.7.18 [12].

Формулы (2.1) – (2.5) для закона распределения Релея времени безотказной работы изделия имеют вид:

$$p(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_t^2}\right); \quad 2.23$$

$$q(t) = 1 - \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_t^2}\right); \quad 2.24$$

$$f(t) = \frac{t}{\sigma_t^2} \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_t^2}\right); \quad 2.25$$

$$\lambda(t) = \frac{t}{\sigma_t^2}; \quad 2.26$$

$$m(t) = \sigma_t \sqrt{\frac{\pi}{2}}, \quad 2.27$$

где σ_t – мода распределения случайной величины T ;
 T – время безотказной работы изделия.

2.2. Решение типовых задач

Задача 2.1. Время работы элемента до отказа подчинено экспоненциальному закону распределения с параметром $\lambda = 2.5 \cdot 10^{-5}$ 1/ч.

Требуется вычислить количественные характеристики надежности элемента $p(t)$, $q(t)$, $f(t)$, m_t для $t = 1000$ ч.

Решение. Используем формулы (2.6), (2.7), (2.8), (2.10) для $p(t)$, $q(t)$, $f(t)$, m_t .

1. Вычислим вероятность безотказной работы:

$$p(t) = e^{-\lambda t} = e^{-2.5 \cdot 10^{-5} \cdot t}.$$

Используя данные таблицы П.7.14 [12], получим:

$$p(1000) = e^{-2.5 \cdot 10^{-5} \cdot 1000} = e^{-0.025} = 0,9753.$$

2. Вычислим вероятность отказа $q(1000)$. Имеем:

$$q(1000) = 1 - p(1000) = 0.0247.$$

3. Вычислим частоту отказов:

$$f(t) = \lambda(t) p(t) = 2.5 \cdot 10^{-5} e^{-2.5 \cdot 10^{-5} \cdot t};$$

$$f(1000) = 2.5 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-2.5 \cdot 10^{-5} \cdot 1000} = 2.5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,9753 = 2.439 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч.}$$

4. Вычислим среднее время безотказной работы:

$$m_t = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2.5 \cdot 10^{-5}} = 40000 \text{ ч.}$$

Задача 2.2. Время работы элемента до отказа подчинено нормальному закону с параметрами $m_t = 8000$ ч, $\sigma_t = 2000$ ч. Требуется вычислить количественные характеристики надежности $p(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$, m_t для $t = 10000$ ч.

Решение. Воспользуемся формулами (2.11), (2.12), (2.13), (2.14) для $p(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$, m_t .

1. Вычислим вероятность безотказной работы:

$$p(t) = 0.5 - \Phi(U); \quad U = (t - m_t)/\sigma_t;$$

$$U = (10000 - 8000)/2000 = 1; \quad \Phi(1) = 0.3413;$$

$$p(10000) = 0.5 - 0.3413 = 0.1587.$$

2. Определим частоту отказа $f(t)$:

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_t} \exp \left[-\frac{(t - m_t)^2}{2\sigma_t^2} \right].$$

Введем обозначение:

$$\varphi(U) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{U^2}{2}}; \quad \varphi(-U) = \varphi(U).$$

Тогда:

$$f(t) = \varphi(U)/\sigma_t; \quad U = (t - m_t)/\sigma_t;$$

$$f(1000) = \varphi(1)/2000 = 0.242/2000 = 12.1 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч.}$$

3. Рассчитаем интенсивность отказов $\lambda(t)$:

$$\lambda(t) = f(t)/p(t);$$

$$\lambda(10000) = f(10000)/p(10000) = 12.1 \cdot 10^{-5} / 0.1587 = 76.4 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч.}$$

4. Среднее время безотказной работы элемента $m_t = 8000$ ч.

Задача 2.3. Время работы изделия до отказа подчиняется закону распределения Релея. Требуется вычислить количественные характеристики надежности изделия $p(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$, m_t для $t = 1000$ ч, если параметр распределения $\sigma_t = 1000$ ч.

Решение. Воспользуемся формулами (2.23), (2.25), (2.27), (2.26) для $p(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$, m_t .

1. Вычислим вероятность безотказной работы $p(t)$:

$$p(t) = \exp\left(-\frac{t^2}{2\sigma_t^2}\right);$$

$$p(1000) = \exp\left(-\frac{1000^2}{2 \cdot 1000^2}\right) = e^{-0,5} = 0,606$$

2. Определим частоту отказа $f(t)$:

$$f(t) = t p(t) / \sigma_t^2;$$

$$f(1000) = 1000 \cdot 0,606 / 1000^2 = 0,606 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч.}$$

3. Рассчитаем интенсивность отказов:

$$\lambda(t) = t / \sigma_t^2;$$

$$\lambda(1000) = 1000 / 1000^2 = 10^{-3} \text{ 1/ч.}$$

4. Определим среднее время безотказной работы изделия:

$$m_t = \sigma_t \sqrt{\frac{\pi}{2}} = 1000 \cdot 1,253 = 1253 \text{ ч.}$$

Задача 2.4. Время безотказной работы изделия подчиняется закону Вейбулла с параметрами $k = 1,5$; $a = 10^{-4}$ 1/ч, а время работы изделия $t = 100$ ч. Требуется вычислить количественные характеристики надежности изделия $p(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$, m_t .

Решение. 1. Определим вероятность безотказной работы $p(t)$ по формуле (2.18). Имеем:

$$p(t) = \exp(-at^k); p(100) = \exp(-10^{-4} 100^{1,5}); x = 100^{1,5};$$

$$\lg x = 1,5 \lg 100 = 3; x = 1000; p(100) = e^{-0,1} = 0,9048.$$

2. Определим частоту отказов $f(t)$:

$$f(t) = a k t^{k-1} p(t);$$

$$f(100) = 10^{-4} 1,5 \cdot 100^{0,5} 0,9048 \approx 1,35 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч.}$$

3. Определим интенсивность отказов $\lambda(t)$:

$$\lambda(t) = f(t)/p(t);$$

$$\lambda(100) = f(100)/p(100) = 1,35 \cdot 10^{-3} / 0,9048 \approx 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч.}$$

4. Определим среднее время безотказной работы изделия m_t :

$$m_t = \frac{\frac{1}{k} \cdot \Gamma \cdot \left(\frac{1}{k} \right)}{a^{1/k}} = \frac{\frac{1}{1,5} \cdot \Gamma \cdot \left(\frac{1}{1,5} \right)}{(10^{-4})^{1/1,5}} = \frac{0,666 \cdot \Gamma \cdot (0,666)}{10^{-2,666}}.$$

Так как $z \Gamma(z) = \Gamma(z+1)$, то

$$m_t = \frac{\Gamma \cdot (1,666)}{10^{-2,666}};$$

$$x = 10^{-2,666}; \lg x = -2,666 \cdot \lg 10 = -2,666 = -3,333; x = 0,00215.$$

Используя приложение П.7.18 [1], получим:

$$m_t = 0,90167/0,00215 = 426 \text{ ч.}$$

Задача 2.5. В результате анализа данных об отказах выставочного оборудования частота отказов получена в виде:

$$f(t) = c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}.$$

Требуется определить количественные характеристики надежности: $p(t)$, $\lambda(t)$, m_t .

Решение. 1. Определим вероятность безотказной работы. На основании формулы (2.1) имеем:

$$p(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt = 1 - \left[\int_0^t c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} dt + \int_0^t c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} dt \right] = 1 - \left[-c_1 e^{-\lambda_1 t} \Big|_0^t - c_2 e^{-\lambda_2 t} \Big|_0^t \right] =$$

$$= 1 - \left[-c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_1 - c_2 e^{-\lambda_2 t} + c_2 \right] = 1 - (c_1 + c_2) + c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t} .$$

Вычислим сумму $c_1 + c_2$. Так как, $\int_0^{\infty} f(t) dt = 1$, то:

$$\int_0^{\infty} c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} dt + \int_0^{\infty} c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t} dt = c_1 + c_2 = 1 .$$

Тогда:

$$P(t) = c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t} .$$

2. Найдем зависимость интенсивности отказов от времени по формуле:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{p(t)} = \frac{c_1 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 \lambda_2 e^{-\lambda_2 t}}{c_1 e^{-\lambda_1 t} + c_2 e^{-\lambda_2 t}}$$

3. Определим среднее время безотказной работы выставочного оборудования. На основании формулы (2.5) будем иметь:

$$m_t = \int_0^{\infty} p(t) dt = c_1 \int_0^{\infty} e^{-\lambda_1 t} dt + c_2 \int_0^{\infty} e^{-\lambda_2 t} dt = \frac{c_1}{\lambda_1} + \frac{c_2}{\lambda_2} .$$

2.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача 2.6. Вероятность безотказной работы производственной линии изготовления выставочных элементов в течении T ч равна $P(t)$. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности. Требуется рассчитать интенсивность отказов и частоту отказов линии для момента времени $t = T$ ч, а также среднее время безотказной работы. Данные для расчетов взять из таблицы 2.1.

Таблица 2.1

Данные для расчета

| <i>№</i> | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> | <i>6</i> | <i>7</i> | <i>8</i> | <i>9</i> | <i>10</i> |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <i>T, ч</i> | 140 | 130 | 180 | 210 | 200 | 140 | 130 | 180 | 210 | 200 |
| <i>P(t)</i> | 0,9 | 0,85 | 0,94 | 0,82 | 0,86 | 0,91 | 0,9 | 0,9 | 0,85 | 0,94 |
| <i>№</i> | <i>11</i> | <i>12</i> | <i>13</i> | <i>14</i> | <i>15</i> | <i>16</i> | <i>17</i> | <i>18</i> | <i>19</i> | <i>20</i> |
| <i>T, ч</i> | 140 | 130 | 180 | 210 | 200 | 140 | 130 | 180 | 210 | 200 |
| <i>P(t)</i> | 0,82 | 0,86 | 0,91 | 0,9 | 0,85 | 0,94 | 0,82 | 0,86 | 0,91 | 0,9 |

Задача 2.7. Среднее время безотказной работы автоматической системы управления равно T ч. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности. Необходимо определить вероятность безотказной работы в течение $T1$ ч, частоту отказов для момента времени $t = T1$ ч и интенсивность отказов. Данные для расчетов взять из таблицы 2.2.

Таблица 2.2

Данные для расчета

| <i>№</i> | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> | <i>6</i> | <i>7</i> | <i>8</i> | <i>9</i> | <i>10</i> |
|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <i>T, ч</i> | 640 | 730 | 580 | 610 | 800 | 540 | 730 | 680 | 640 | 730 |
| <i>T1, ч</i> | 140 | 130 | 180 | 210 | 200 | 140 | 130 | 180 | 210 | 200 |
| <i>№</i> | <i>11</i> | <i>12</i> | <i>13</i> | <i>14</i> | <i>15</i> | <i>16</i> | <i>17</i> | <i>18</i> | <i>19</i> | <i>20</i> |
| <i>T, ч</i> | 580 | 610 | 800 | 540 | 730 | 680 | 640 | 730 | 580 | 610 |
| <i>T1, ч</i> | 140 | 130 | 180 | 210 | 200 | 140 | 130 | 180 | 210 | 200 |

Задача 2.8. Время работы изделия подчинено нормальному закону с параметрами $m_t = M$ ч, $t = t$ ч. Требуется вычислить количественные характеристики надежности $p(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$, m_t для $t = T$ ч. Данные для расчетов взять из таблицы 2.3. Считать, что $\sigma_t = 1800$ ч.

Таблица 2.3

Данные для расчета

| <i>№</i> | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> | <i>6</i> | <i>7</i> | <i>8</i> | <i>9</i> |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <i>t, ч</i> | 1640 | 1730 | 1580 | 1610 | 1800 | 1540 | 1730 | 1680 | 1640 |

Окончание табл. 2.3

| | | | | | | | | | |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <i>M, ч</i> | 9140 | 8130 | 9180 | 7210 | 8200 | 7140 | 8130 | 9180 | 8210 |
| <i>T, ч</i> | 10140 | 9130 | 9780 | 8210 | 9200 | 8140 | 9130 | 9980 | 9210 |
| № | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| <i>t, ч</i> | 1730 | 1580 | 1610 | 1800 | 1540 | 1730 | 1680 | 1640 | 1730 |
| <i>M, ч</i> | 8200 | 9400 | 8830 | 10800 | 12100 | 9200 | 8140 | 9130 | 8180 |
| <i>T, ч</i> | 9200 | 9800 | 9830 | 11800 | 13100 | 9800 | 9140 | 9730 | 9180 |

Задача 2.9. Время исправной работы шарикоподшипников в динамической рекламной установке подчинено закону Вейбулла с параметрами $\kappa = K$; $a = A \cdot 10^{-7}$ 1/ч.

Требуется вычислить количественные характеристики надежности $p(t)$, $f(t)$, $\lambda(t)$ для $t = T$ ч. и среднее время безотказной работы шарикоподшипников. Данные для расчетов взять из таблицы 2.4.

Таблица 2.4

Данные для расчета

| № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <i>K</i> | 2,68 | 2,61 | 2,62 | 2,64 | 2,65 | 2,66 | 2,67 | 2,69 | 2,66 |
| <i>A</i> | 1,65 | 1,67 | 1,66 | 1,64 | 1,65 | 1,66 | 1,65 | 1,67 | 1,66 |
| <i>T, ч</i> | 140 | 130 | 180 | 210 | 200 | 140 | 130 | 180 | 210 |
| № | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| <i>K</i> | 2,7 | 2,6 | 2,65 | 2,63 | 2,64 | 2,68 | 2,69 | 2,68 | 2,69 |
| <i>A</i> | 1,64 | 1,65 | 1,66 | 1,65 | 1,67 | 1,66 | 1,64 | 1,65 | 1,66 |
| <i>T, ч</i> | 200 | 140 | 130 | 180 | 210 | 200 | 140 | 130 | 180 |

Задача 2.10. В результате анализа данных об отказах изделия установлено, что частота отказов имеет вид $f(t) = 2\lambda e^{-\lambda t}(1 - e^{-\lambda t})$. Необходимо найти количественные характеристики надежности $p(t)$, $\lambda(t)$, m_r .

2.4. Контрольные вопросы

1. Какими зависимостями определяются количественные характеристики надежности изделия?
2. Какими зависимостями определяются количественные характеристики надежности изделия для экспоненциального закона распределения?
3. Какими зависимостями определяются количественные характеристики надежности изделия для нормального закона распределения?
4. Какими зависимостями определяются количественные характеристики надежности изделия для закона распределения Вейбулла?
5. Какими зависимостями определяются количественные характеристики надежности изделия для закона распределения Релея?

Тема № 3

РАСЧЕТ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ СИСТЕМ

Цель работы: Научиться рассчитывать резервированные системы. Ознакомиться с примерами расчетов надежности системы с постоянным резервированием.

3.1. Последовательное соединение элементов в систему

Теоретические сведения. Соединение элементов называется последовательным, если отказ хотя бы одного элемента приводит к отказу всей системы. Система последовательно соединенных элементов работоспособна тогда, когда работоспособны все ее элементы.

Вероятность безотказной работы системы за время t определяется формулой:

$$P_c(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \dots P_n(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad 3.1$$

где $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i – го элемента за время t .
Если $P_i(t) = P(t)$, то:

$$P_c(t) = P^n(t). \quad 3.2$$

Выразим $P_c(t)$ через интенсивность отказов $\lambda_i(t)$ элементов системы.
Имеем:

$$P_c(t) = \exp \left(- \sum_{i=1}^n \int_0^t \lambda_i(t) dt \right), \quad 3.3$$

или

$$P_c(t) = \exp \left(- \int_0^t \lambda_c(t) dt \right), \quad 3.4$$

где

$$\lambda_c(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t). \quad 3.5$$

Здесь $\lambda_i(t)$ – интенсивность отказов i – го элемента;
 $\lambda_c(t)$ – интенсивность отказов системы.

Вероятность отказа системы на интервале времени $(0, t)$ равна:

$$\lambda_c(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i(t), \quad 3.5$$

$$q_c(t) = 1 - \prod_{i=1}^n \lambda_i(t). \quad 3.6$$

Частота отказов системы $f_c(t)$ определяется соотношением:

$$f_c(t) = \frac{dP_c(t)}{dt}. \quad 3.7$$

Интенсивность отказов системы:

$$\lambda_c(t) = \frac{f_c(t)}{P_c(t)}. \quad 3.8$$

Среднее время безотказной работы системы:

$$m_{tc}(t) = \int_0^{\infty} P_c(t) dt. \quad 3.9$$

В случае экспоненциального закона надежности всех элементов системы имеем:

$$\lambda_i(t) = \lambda_i = const; \quad 3.10$$

$$\lambda_c(t) = \sum_{i=1}^n \lambda_i = \lambda_c; \quad 3.11$$

$$P_i(t) = \exp(-\lambda t); \quad 3.12$$

$$P_c(t) = e^{-\lambda_c t} \quad 3.13$$

$$f_c(t) = \lambda_c \cdot e^{-\lambda_c t}; \quad 3.14$$

$$q_c(t) = 1 - e^{-\lambda_c t}; \quad 3.15$$

$$m_{tc}(t) = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \lambda_i}; \quad 3.16$$

$$m_n(t) = \frac{1}{\lambda_i}, \quad 3.17$$

где m_{ti} – среднее время безотказной работы i – го элемента.

При расчете надежности систем часто приходится перемножать вероятности безотказной работы отдельных элементов расчета, возводить их в степень и

извлекать корни. При значениях $P(t)$, близких к единице, эти вычисления можно с достаточной для практики точностью выполнять по следующим приближенным формулам:

$$\left. \begin{aligned} P_1(t) \cdot P_2(t) \dots P_n(t) &\approx 1 - \sum_{i=1}^n q_i(t), \\ P_i^n(t) &= 1 - Nq_i(t), \\ \sqrt[n]{P_i(t)} &= 1 - q_i(t) / n, \end{aligned} \right\} 3.18$$

где $q_i(t)$ – вероятность отказа i – го элемента.

3.2. Решение типовых задач

Задача 3.1. Система состоит из трех устройств. Интенсивность отказов электронного устройства равна $\lambda_1 = 0,16 \cdot 10^{-3} \cdot 1/ч = const$. Интенсивности отказов двух электромеханических устройств линейно зависят от времени и определяются следующими формулами:

$$\lambda_2 = 0,23 \cdot 10^{-4} t \text{ 1/ч}, \lambda_3 = 0,06 \cdot 10^{-6} t^{2,6} \cdot 1/ч.$$

Необходимо рассчитать вероятность безотказной работы изделия в течение 100 ч.

Решение. На основании формулы (3.3) имеем:

$$P_c(t) = \exp \left(- \sum_{i=1}^n \int_0^t \lambda_i(t) dt \right) = \exp \left\{ - \left[\int_0^t \lambda_1 dt + \int_0^t \lambda_2 dt + \int_0^t \lambda_3 dt \right] \right\} =$$

$$\exp \left[- \left(\lambda_1 t + 0,23 * 10^{-4} * \frac{t^2}{2} + 0,06 * 10^{-6} * \frac{t^{3,6}}{3,6} \right) \right]$$

Для $t = 100$ ч:

$$P_c(100) = \exp \left[- \left(0,16 * 10^{-3} * 100 + 0,23 * 10^{-4} * \frac{100^2}{2} + 0,06 * 10^{-6} * \frac{100^{3,6}}{3,6} \right) \right] = 0,33$$

Задача 3.2. Система состоит из трех блоков, среднее время безотказной работы которых равно: $m_{t1} = 160$ ч; $m_{t2} = 320$ ч; $m_{t3} = 600$ ч. Для блоков справедлив экспоненциальный закон надежности. Требуется определить среднее время безотказной работы системы.

Решение. Воспользовавшись формулой (3.17), получим:

$$\lambda_1 = \frac{1}{m_{t1}} = \frac{1}{160}; \lambda_2 = \frac{1}{m_{t2}} = \frac{1}{320}; \lambda_3 = \frac{1}{m_{t3}} = \frac{1}{600}.$$

Здесь λ_i – интенсивность отказов i – го блока.

На основании формулы (3.11) имеем:

$$\lambda_c = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = \frac{1}{160} + \frac{1}{320} + \frac{1}{600} \approx 0,011 \cdot 1/ч.$$

Здесь λ_c – интенсивность отказов системы.

На основании формулы (3.16) получим:

$$m_{tc} = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{0,011} \approx 91 \text{ ч.}$$

Задача 3.3. Система состоит из 12600 элементов, средняя интенсивность отказов которых $\lambda_{cp} = 0,32 \cdot 10^{-6}$ 1/ч. Требуется определить $P_c(t)$, $q_c(t)$, $f_c(t)$, m_{tc} , для $t = 50$ ч.

Здесь $P_c(t)$ – вероятность безотказной работы системы в течение времени t ;

$q_c(t)$ – вероятность отказа системы в течение времени t ;

$f_c(t)$ – частота отказов или плотность вероятности времени T безотказной работы системы;

m_{tc} – среднее время безотказной работы системы.

Решение. Интенсивность отказов системы по формуле (3.11) будет:

$$\lambda_c = \lambda_{cp} \cdot n = 0,32 \cdot 10^{-6} \cdot 12600 = 4,032 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч.}$$

Из формулы (3.13) имеем:

$$P_c(t) = e^{-\lambda_c t}; P_c(50) = e^{-4,032 \cdot 0,001 \cdot 50} \approx 0,82.$$

Из формулы (3.15) получим:

$$q_c(t) = \lambda_c \cdot e^{-\lambda_c t} = \lambda_c P_c(t); q_c(t) = 1 - P_c(t); q_c(50) = 1 - P_c(50) = 0,18.$$

Из формулы (3.14) имеем:

$$f_c(t) = \lambda_c e^{-\lambda_c t} = \lambda_c P_c(t); f_c(50) = 4,032 \cdot 10^{-3} \cdot 0,82 = 3,28 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч.}$$

Из формулы (3.16) получим:

$$m_{tc} = 1/\lambda_c = 1/4,032 \cdot 10^{-3} = 250 \text{ ч.}$$

Задача 3.4. Система состоит из двух устройств. Вероятности безотказной работы каждого из них в течение времени $t = 100$ ч равны: $P_1(100) = 0,95$; $P_2(100) =$

0,97. Справедлив экспоненциальный закон надежности. Необходимо найти среднее время безотказной работы системы.

Решение. Найдем вероятность безотказной работы изделия:

$$P_c(100) = P_1(100) \cdot P_2(100) = 0,95 \cdot 0,97 = 0,92 .$$

Найдем интенсивность отказов изделия, воспользовавшись формулой:

$$P_c(t) = e^{-\lambda_c t} ,$$

или:

$$P_c(100) = 0,92 = e^{-\lambda_c 100} .$$

По таблице П.7.14 [12] имеем :

$$\lambda_c = 0,83 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч} .$$

Тогда:

$$m_{tc} = 1/\lambda_c = 1/(0,83 \cdot 10^{-3}) = 1200 \text{ ч} .$$

Задача 3.5. Вероятность безотказной работы одного элемента в течение времени t равна $P(t) = 0,9997$. Требуется определить вероятность безотказной работы системы, состоящей из $n = 100$ таких же элементов.

Решение. Вероятность безотказной работы системы равна $P_c(t) = P^n(t) = (0,9997)^{100}$. Вероятность $P_c(t)$ близка к единице, поэтому для ее вычисления воспользуемся формулой (3.18). В нашем случае $q(t) = 1 - P(t) = 1 - 0,9997 = 0,0003$.

$$\text{Тогда } P_c(t) \approx 1 - nq(t) = 1 - 100 \cdot 0,0003 = 0,97 .$$

Задача.3.6. Вероятность безотказной работы системы в течение времени t равна $P_c(t) = 0,95$. Система состоит из $n = 120$ равнонадежных элементов. Необходимо найти вероятность безотказной работы элемента.

Решение. Очевидно, что вероятность безотказной работы элемента будет:

$$P_i(t) = \sqrt[n]{P_c(t)} .$$

Так как $P(t)$ близка к единице, то вычисления $P(t)$ удобно выполнить по формуле (3.18).

$$\text{В нашем случае } q_c(t) = 1 - P_c(t) = 1 - 0,95 = 0,05 .$$

Тогда:

$$P_i(t) = \sqrt[n]{P_c(t)} \approx 1 - \frac{q_c(t)}{n} = 1 - \frac{0,05}{120} \approx 0,9996 .$$

Задача 3.7. Система состоит из 12600 элементов, средняя интенсивность отказов которых $\lambda_{cp} = 0,32 \cdot 10^{-6}$ 1/ч.

Необходимо определить вероятность безотказной работы в течение $t = 50$ ч.

Решение. Интенсивность отказов системы по формуле (3.11) будет:

$$\lambda_c = \lambda_{cp} \cdot n = 0,32 \cdot 10^{-6} \cdot 12600 = 4,032 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч.}$$

Тогда на основании формулы (3.13):

$$P_c(t) = e^{-\lambda_c t},$$

или

$$P_c(50) = e^{-4,032 \cdot 0,001 \cdot 50} = 0,82.$$

3.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача 3.8. Аппаратура состоит из 2000 элементов, средняя интенсивность отказов которых $\lambda_{cp} = A \cdot 10^{-5}$ 1/час. Необходимо определить вероятность безотказной работы аппаратуры в течении $t = T$ ч и среднее время безотказной работы аппаратуры. Данные для расчетов взять из таблицы 3.1.

Таблица 3.1

Данные для расчета

| | | | | | | | | | | |
|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| № | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| T, ч | 300 | 280 | 580 | 610 | 220 | 540 | 730 | 680 | 640 | 730 |
| A | 0,33 | 0,34 | 0,35 | 0,4 | 0,3 | 0,36 | 0,33 | 0,34 | 0,35 | 0,4 |
| № | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| T, ч | 210 | 610 | 180 | 540 | 230 | 680 | 640 | 730 | 580 | 610 |
| A | 0,3 | 0,36 | 0,33 | 0,34 | 0,35 | 0,4 | 0,3 | 0,36 | 0,33 | 0,34 |

Задача 3.9. Невосстанавливаемая в процессе работы электронная демонстрационная машина состоит из 200000 элементов, средняя интенсивность отказов которых $\lambda_{cp} = A \cdot 10^{-6}$ 1/ч. Требуется определить вероятность безотказной работы электронной машины в течении $t = T$ ч и среднее время безотказной работы электронной машины. Данные для расчетов взять из таблицы 3.2.

Задача 3.10. Система управления состоит из 6000 элементов, средняя интенсивность отказов которых $\lambda_{cp} = A \cdot 10^{-6}$ 1/час. Необходимо определить вероятность безотказной работы в течении $t = T$ час и среднее время безотказной работы. Данные для расчетов взять из таблицы 3.2.

Таблица 3.2

Данные для расчета

| | | | | | | | | | | |
|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| <i>№</i> | <i>1</i> | <i>2</i> | <i>3</i> | <i>4</i> | <i>5</i> | <i>6</i> | <i>7</i> | <i>8</i> | <i>9</i> | <i>10</i> |
| Т, ч | 30 | 28 | 58 | 61 | 22 | 54 | 73 | 68 | 64 | 73 |
| А | 0,33 | 0,34 | 0,35 | 0,4 | 0,3 | 0,36 | 0,33 | 0,34 | 0,35 | 0,4 |
| <i>№</i> | <i>11</i> | <i>12</i> | <i>13</i> | <i>14</i> | <i>15</i> | <i>16</i> | <i>17</i> | <i>18</i> | <i>19</i> | <i>20</i> |
| Т, ч | 21 | 61 | 18 | 54 | 23 | 68 | 64 | 73 | 58 | 61 |
| А | 0,3 | 0,36 | 0,33 | 0,34 | 0,35 | 0,4 | 0,3 | 0,36 | 0,33 | 0,34 |

Задача 3.11. Прибор состоит из $n = 5$ узлов. Надежность узлов характеризуется вероятностью безотказной работы в течение времени t , которая равна: $P_1(t) = P_1$; $P_2(t) = P_2$; $P_3(t) = P_3$; $P_4(t) = P_4$; $P_5(t) = P_5$. Необходимо определить вероятность безотказной работы прибора. Данные для расчета взять из таблицы 3.3.

Таблица 3.3

Данные для расчета

| <i>№ по списку</i> | P_1 | P_2 | P_3 | P_4 | P_5 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1. | 0,99 | 0,994 | 0,97 | 0,971 | 0,985 |
| 2. | 0,98 | 0,971 | 0,985 | 0,982 | 0,99 |
| 3. | 0,998 | 0,982 | 0,994 | 0,99 | 0,971 |
| 4. | 0,975 | 0,99 | 0,971 | 0,97 | 0,98 |
| 5. | 0,985 | 0,97 | 0,98 | 0,985 | 0,97 |
| 6. | 0,994 | 0,985 | 0,998 | 0,994 | 0,985 |
| 7. | 0,971 | 0,994 | 0,97 | 0,971 | 0,994 |
| 8. | 0,982 | 0,971 | 0,985 | 0,98 | 0,971 |
| 9. | 0,99 | 0,98 | 0,99 | 0,971 | 0,98 |
| 10. | 0,97 | 0,998 | 0,971 | 0,982 | 0,998 |
| 11. | 0,985 | 0,97 | 0,98 | 0,99 | 0,97 |
| 12. | 0,994 | 0,985 | 0,97 | 0,97 | 0,985 |
| 13. | 0,971 | 0,99 | 0,985 | 0,985 | 0,99 |
| 14. | 0,98 | 0,971 | 0,994 | 0,994 | 0,985 |
| 15. | 0,998 | 0,98 | 0,971 | 0,971 | 0,99 |
| 16. | 0,97 | 0,994 | 0,98 | 0,98 | 0,971 |
| 17. | 0,985 | 0,971 | 0,998 | 0,971 | 0,98 |
| 18. | 0,99 | 0,982 | 0,97 | 0,982 | 0,97 |
| 19. | 0,971 | 0,99 | 0,985 | 0,99 | 0,985 |
| 20. | 0,98 | 0,97 | 0,99 | 0,97 | 0,994 |

Задача 3.12. Система состоит из пяти приборов, среднее время безотказной работы которых равно: m_{t1} ; m_{t2} ; m_{t3} ; m_{t4} ; m_{t5} . Для приборов справедлив экспоненциальный закон надежности. Требуется найти среднее время безотказной работы системы. Данные для расчета взять из таблицы 3.4.

Задача 3.13. Прибор состоит из пяти блоков. Вероятность безотказной работы каждого блока в течение времени $t = 50$ ч равна: $P_1(t) = P_1$; $P_2(t) = P_2$; $P_3(t) = P_3$; $P_4(t) = P_4$; $P_5(t) = P_5$. Справедлив экспоненциальный закон надежности. Требуется найти среднее время безотказной работы прибора. Данные для расчета взять из таблицы 3.3.

Таблица 3.4

Данные для расчета

| № по списку | m_{t1} | m_{t2} | m_{t3} | m_{t4} | m_{t5} |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 5.1. | 83 | 700 | 500 | 400 | 220 |
| 5.2. | 220 | 500 | 120 | 700 | 280 |
| 5.3. | 280 | 120 | 96 | 500 | 400 |
| 5.4. | 400 | 96 | 200 | 120 | 700 |
| 5.5. | 700 | 200 | 72 | 96 | 500 |
| 5.6. | 500 | 72 | 340 | 200 | 120 |
| 5.7. | 120 | 340 | 300 | 72 | 96 |
| 5.8. | 96 | 300 | 280 | 340 | 200 |
| 5.9. | 200 | 280 | 83 | 300 | 72 |
| 5.10. | 72 | 83 | 220 | 280 | 340 |
| 5.11. | 340 | 220 | 280 | 83 | 300 |
| 5.12. | 300 | 280 | 400 | 220 | 280 |
| 5.13. | 280 | 400 | 700 | 280 | 83 |
| 5.14. | 83 | 700 | 500 | 400 | 220 |
| 5.15. | 220 | 500 | 120 | 700 | 280 |
| 5.16. | 280 | 120 | 700 | 500 | 400 |
| 5.17. | 400 | 700 | 500 | 120 | 700 |
| 5.18. | 700 | 500 | 120 | 400 | 500 |
| 5.19. | 500 | 120 | 96 | 700 | 120 |
| 5.20. | 120 | 96 | 500 | 500 | 220 |

3.4. Расчет надежности системы с постоянным резервированием

Теоретические сведения. При постоянном резервировании резервные элементы 1,2,... соединены параллельно с основным (рабочим) элементом в течение всего периода работы системы. Все элементы соединены постоянно, перестройка схемы при отказах не происходит, отказавший элемент не отключается (рис .3.1).

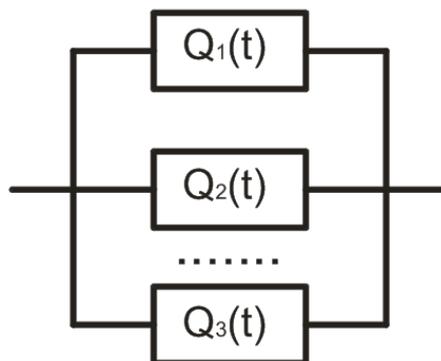


Рис 3.1. Постоянное резервирование

Вероятность отказа системы $q_c(t)$ определяется формулой:

$$q_c(t) = \prod_{j=0}^m q_j(t), \quad \begin{array}{l} 3.4.1 \\ 3.19 \end{array}$$

где $q_j(t)$ – вероятность отказа j – го элемента.

Вероятность безотказной работы системы:

$$P_c(t) = 1 - \prod_{j=0}^m [1 - P_j(t)], \quad \begin{array}{l} 3.4.2 \\ 3.20 \end{array}$$

где $P_j(t)$ – вероятность безотказной работы j – го элемента.

Если $P_j(t) = P(t)$, $j = 0, 1, \dots, m$, то:

$$\left. \begin{array}{l} q_c(t) = q^{m+1}(t); \\ P_c(t) = 1 - [1 - P(t)]^{m+1} \end{array} \right\} \cdot \quad \begin{array}{l} 3.4.3 \\ 3.21 \end{array}$$

При экспоненциальном законе надежности отдельных элементов имеем:

$$\left. \begin{aligned} P_j(t) &= P(t) = e^{-\lambda t}; \\ q_c(t) &= (1 - e^{-\lambda t})^{m+1}; \\ P_c(t) &= 1 - (1 - e^{-\lambda t})^{m+1}; \\ m_{tc} &= \frac{1}{\lambda} \sum_{i=0}^m \frac{1}{1+i} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} 3.4.4 \\ 3.22 \end{array}$$

Резервирование называется общим, если резервируется вся система, состоящая из последовательного соединения n элементов. Основная цепь содержит n элементов. Число резервных цепей равно m , т. е. кратность резервирования равна m .

Определим количественные характеристики надежности системы с общим резервированием (резервные цепи включены постоянно).

Запишем вероятность безотказной работы j – ой цепи:

$$P_j(t) = \prod_{i=1}^n P_{ij}(t); j = 0, 1, \dots, m, \quad \begin{array}{l} 3.4.5 \\ 3.23 \end{array}$$

где $P_{ij}(t)$, $j = 0, 1, 2, \dots, m$; $i = 1, 2, 3, \dots, n$ – вероятность безотказной работы элемента \mathcal{E}_{ij} .

Вероятность отказа j – ой цепи:

$$q_j(t) = 1 - \prod_{i=1}^n P_{ij}(t). \quad \begin{array}{l} 3.4.6 \\ 3.24 \end{array}$$

Вероятность отказа системы с общим резервированием:

$$q_c(t) = \prod_{j=0}^m \left[1 - \prod_{i=1}^n P_{ij}(t) \right]. \quad \begin{array}{l} 3.4.7 \\ 3.25 \end{array}$$

Вероятность безотказной работы системы с общим резервированием:

$$P_c(t) = 1 - \prod_{j=0}^m \left[1 - \prod_{i=1}^n P_{ij}(t) \right]. \quad \begin{array}{l} 3.4.8 \\ 3.26 \end{array}$$

Частный случай: основная и резервные цепи имеют одинаковую надежность, т.е.:

$$P_{ij}(t) = P_i(t). \quad \begin{array}{l} 3.4.9 \\ 3.27 \end{array}$$

Тогда:

$$q_c(t) = \left[1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) \right]^{m+1}; \quad \begin{array}{l} 3.4.10 \\ 3.28 \end{array}$$

$$p_c(t) = 1 - \left[1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) \right]^{m+1}. \quad \begin{array}{l} 3.4.11 \\ 3.29 \end{array}$$

Рассмотрим экспоненциальный закон надежности, т. е.:

$$P_i(t) = e^{-\lambda_i t}; \quad \begin{array}{l} 3.4.12 \\ 3.30 \end{array}$$

$$q_c(t) = (1 - e^{-\lambda_0 t})^{m+1}; \quad \begin{array}{l} 3.4.13 \\ 3.31 \end{array}$$

$$P_c(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^{m+1}; \quad \begin{array}{l} 3.4.14 \\ 3.32 \end{array}$$

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i. \quad \begin{array}{l} 3.4.15 \\ 3.33 \end{array}$$

где λ_0 – интенсивность отказов цепи, состоящей из n элементов.

Частота отказов системы с общим резервированием:

$$f_c(t) = -\frac{dp_c(t)}{dt} = \lambda_0 \cdot (m+1) e^{-\lambda_0 t} \cdot (1 - e^{-\lambda_0 t})^m. \quad \begin{array}{l} 3.4.16 \\ 3.34 \end{array}$$

Интенсивность отказов системы с общим резервированием;

$$\lambda_c(t) = \frac{f_c(t)}{p_c(t)} = \frac{\lambda_0 \cdot (m+1) e^{-\lambda_0 t} \cdot (1 - e^{-\lambda_0 t})^m}{1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^{m+1}}. \quad \begin{array}{l} 3.4.17 \\ 3.35 \end{array}$$

Среднее время безотказной работы резервированной системы:

$$m_{tc} = T_0 \sum_{j=0}^m \frac{1}{1+j} \quad \begin{array}{l} 3.4.18 \\ 3.36 \end{array}$$

где $T_0 = 1/\lambda_0$ – среднее время безотказной работы нерезервированной системы.

3.5. Примеры расчета надежности системы с постоянным резервированием

Задача 3.14. Система состоит из 10 равнонадежных элементов, среднее время безотказной работы элемента $m_t = 1000$ ч. Предполагается, что справедлив экспоненциальный закон надежности для элементов системы и основная и резервная системы равнонадежны. Необходимо найти среднее время безотказной работы системы m_{tc} , а также частоту отказов $f_c(t)$ и интенсивность отказов $\lambda_c(t)$ в момент времени $t = 50$ ч в следующих случаях:

- нерезервированной системы,
- дублированной системы при постоянно включенном резерве.

Решение:

а)

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i,$$

где λ_c – интенсивность отказов системы;

λ_i – интенсивность отказов i – го элемента ; $n = 10$.

$$\lambda_i = 1/m_{ti} = 1/1000 = 0,001; i = 1, 2, \dots, n; \lambda = \lambda_i; \lambda_c = \lambda \cdot n = 0,001 \cdot 10 = 0,01 \text{ 1/ч};$$

$$m_{tc} = 1/\lambda_c = 100 \text{ ч};$$

$$f_c(t) = \lambda_c(t) P_c(t); \lambda_c(50) = \lambda_c; P_c(t) = e^{-\lambda_c t};$$

$$f_c(50) = \lambda_c e^{-\lambda_c t} = 0,01 \cdot e^{-0,01 \cdot 50} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч}.$$

б)

$$m_{tc} = \frac{1}{\lambda_c} \sum_{j=0}^m \frac{1}{1+j}; \quad m = 1;$$

$$m_{tc} = \frac{1}{0,01} \left(1 + \frac{1}{2} \right) = 150 \text{ ч};$$

$$p_c(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^{m+1};$$

$$\lambda_0 = \lambda_c = 0,01 \text{ 1/ч};$$

$$p_c = 1 - (1 - e^{-\lambda_0 t})^2 = 2e^{-\lambda_0 t} - e^{-2\lambda_0 t};$$

$$f_c(t) = -\frac{dp_c(t)}{dt} = 2\lambda_0 e^{-\lambda_0 t} \cdot (1 - e^{-\lambda_0 t});$$

$$\lambda_c(t) = -\frac{f_c(t)}{p_c(t)} = \frac{2\lambda_0(1 - e^{-\lambda_0 t})}{2 - e^{-\lambda_0 t}};$$

$$f_c(50) \approx 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч}; \quad \lambda_c(50) = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ 1/ч}.$$

Задача 3.15. Резервированная система управления состоит из $n = 5000$ элементов. Для повышения надежности системы предполагается провести общее дублирование элементов. Чтобы приближенно оценить возможность достижения заданной вероятности безотказной работы системы $P_c(t) = 0,9$ при $t = 10$ ч, необходимо рассчитать среднюю интенсивность отказов одного элемента при предположении отсутствия последствия отказов.

Решение. Вероятность безотказной работы системы при общем дублировании и равнонадежных элементах равна:

$$P_c(t) = 1 - (1 - e^{-\lambda t})^2 \quad \text{или} \quad P_c(t) = 1 - [1 - P^n(t)]^2,$$

где $P(t) = e^{-\lambda t}$. Здесь $P(t)$ – вероятность безотказной работы одного элемента.

Так как должно быть:

$$1 - [1 - P^n(t)]^2 \geq 0,9, \text{ то}$$

$$p(t) \geq (1 - \sqrt{0,1})^{1/n}.$$

Разложив $(1 - \sqrt{0,1})^{1/n}$ по степени $1/n$ в ряд и пренебрегая членами ряда высшего порядка малости, получим:

$$(1 - \sqrt{0,1})^{1/5000} \approx 1 - \frac{1}{5000} \sqrt{0,1} = 1 - 6,32 \cdot 10^{-5}.$$

Учитывая, что $P(t) = \exp(-\lambda t) \approx 1 - \lambda t$, получим: $1 - \lambda t \geq 1 - 6,32 \cdot 10^{-5}$.

$$\lambda \leq (6,32 \cdot 10^{-5})/t = (6,32 \cdot 10^{-5})/10 = 6,32 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}.$$

3.6. Контрольные вопросы

1. Что называют системой с последовательным соединением?
2. Как определяется вероятность безотказной работы системы с последовательным соединением?
3. Как определяется интенсивность отказов, частота отказов и среднее время безотказной работы системы с последовательным соединением?
4. В чем суть системы с постоянным резервированием?
5. Как определяется вероятность отказа системы с общим резервированием?
6. Как определяется интенсивность отказов, частота отказов и среднее время безотказной работы системы с общим резервированием?

Тема № 4

СТАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ЭКСПОЗИЦИОННО-РЕКЛАМНЫХ ОБЪЕКТОВ. ИСПЫТАНИЯ НА РАСТЯЖЕНИЕ

Цель работы: Ознакомиться: с видами статических испытаний экспозиционно-рекламных объектов; образцами и машинами для испытаний на растяжение; методикой проведения испытаний, основными расчетами и зависимостями.

Во многих случаях металлические материалы в конструкциях работают под статическими нагрузками. Поэтому для оценки механических свойств широко используются статические испытания, которые проводятся с применением разных схем напряженного состояния в образце. К основным разновидностям статических испытаний относятся испытания на растяжение, сжатие, изгиб и кручение.

Испытания на одноосное растяжение – наиболее распространенный вид испытаний для оценки механических свойств металлов и сплавов — сравнительно легко подвергаются анализу, позволяют по результатам одного опыта определять сразу несколько важных механических характеристик материала, являющихся критерием его качества и необходимых для конструкторских расчетов.

Методы испытания на растяжение стандартизованы. Имеются отдельные стандарты на испытания при комнатной температуре (ГОСТ 1497-73), при повышенных до 1473 °К (ГОСТ 9651-73) и пониженных от 273 °К до 173 °К (ГОСТ 11150-75) температурах. В них сформулированы определения характеристик, оцениваемых при испытании, даны типовые формы и размеры образцов, основные требования к испытательному оборудованию, методика проведения испытания и подсчета результатов.

4.1. Образцы и машины для испытаний на растяжение

Для испытаний на растяжение используют образцы с рабочей частью в виде цилиндра (цилиндрические образцы) или стержня с прямоугольным сечением (плоские образцы). На рис. 4.1 показаны наиболее часто используемые стандартные образцы для испытаний при комнатной (a , b), повышенных (c , d) и отрицательных (e) температурах. Помимо основной рабочей части, большинство образцов имеет головки различной конфигурации для крепления в захватах. Основные размеры образца:

1) рабочая длина l – часть образца между его головками или участками для захвата с постоянной площадью поперечного сечения;

2) начальная расчетная длина l_0 – участок рабочей длины, на котором определяется удлинение;

3) начальный диаметр рабочей части d_0 для цилиндрических или начальная толщина a_0 и ширина b_0 рабочей части для плоских образцов.

Между размерами образца должны существовать определенные соотношения. В частности, рабочая длина цилиндрических образцов должна быть от $l_0 + 0,5d_0$ до $l_0 + 2d_0$, а у плоских при толщине более 3 мм от $l_0 + 1,5\sqrt{F_0}$ до $l_0 + 2,5\sqrt{F_0}$ при толщине менее 3 мм от $l_0 + 0,5b_0$ до $l_0 + 2b_0$. Расчетная длина $l_0 = 5,65\sqrt{F_0}$ («короткие» образцы) или $l_0 = 11,3\sqrt{F_0}$ («длинные» образцы), где F_0 – начальная площадь поперечного сечения в рабочей части. Для цилиндрических образцов это равнозначно тому, что $l_0 = 5d_0$ (пятикратные) и $l_0 = 10d_0$ (десятикратные образцы). Действительно, для длинного образца $l_0 = \sqrt{F_0} = \frac{10d_0}{\sqrt{\frac{\pi d_0^2}{4}}} = \frac{20}{\sqrt{\pi}} \approx 11,3$. Литые образцы и образцы из хрупких материалов

допускается изготавливать с $l_0 = 2,5d_0$.

Абсолютные размеры образцов могут меняться в широких пределах. В частности, диаметр рабочей части пропорциональных цилиндрических образцов $d_0 = 3 - 25$ мм, у плоских $a_0 = 0,5 - 25$ мм, $b_0 = 20 - 30$ мм. При этом для каждой формы (типа) образца ГОСТ устанавливает свой диапазон основных размеров. На практике для испытаний при комнатной температуре чаще всего используют так называемые «гагаринские» цилиндрические короткие образцы с $d_0 = 6$ мм и $l_0 = 30$ мм (см. рис. 4.1, а). Из плоских наибольшее распространение получили образцы с конфигурацией, показанной на рис. 4.1, в. У этих образцов $a_0 = 1 - 2$ мм и $l_0 = 50 - 70$ мм.

В некоторых случаях, например, при работе с малогабаритными изделиями или дефицитными материалами, используют «микрообразцы» с $d_0 \leq 1$ мм и $l_0 = 4 - 7$ мм.

Диаметр рабочей части цилиндрических образцов может отклониться от заданного не более, чем на $\pm 0,1$ мм при $d_0 < 10$ мм, на $\pm 0,2$ мм при $d_0 = 10 - 20$ мм и на $\pm 0,25$ мм при $d_0 > 20$ мм. Допускаемая ГОСТом разница наибольшего и наименьшего диаметра рабочей части одного образца составляет 0,03; 0,04 и 0,05 мм для $d_0 < 10$ мм, $d_0 = 10 - 20$ мм и $d_0 > 20$ мм соответственно. Аналогичные допуски оговорены для плоских образцов.

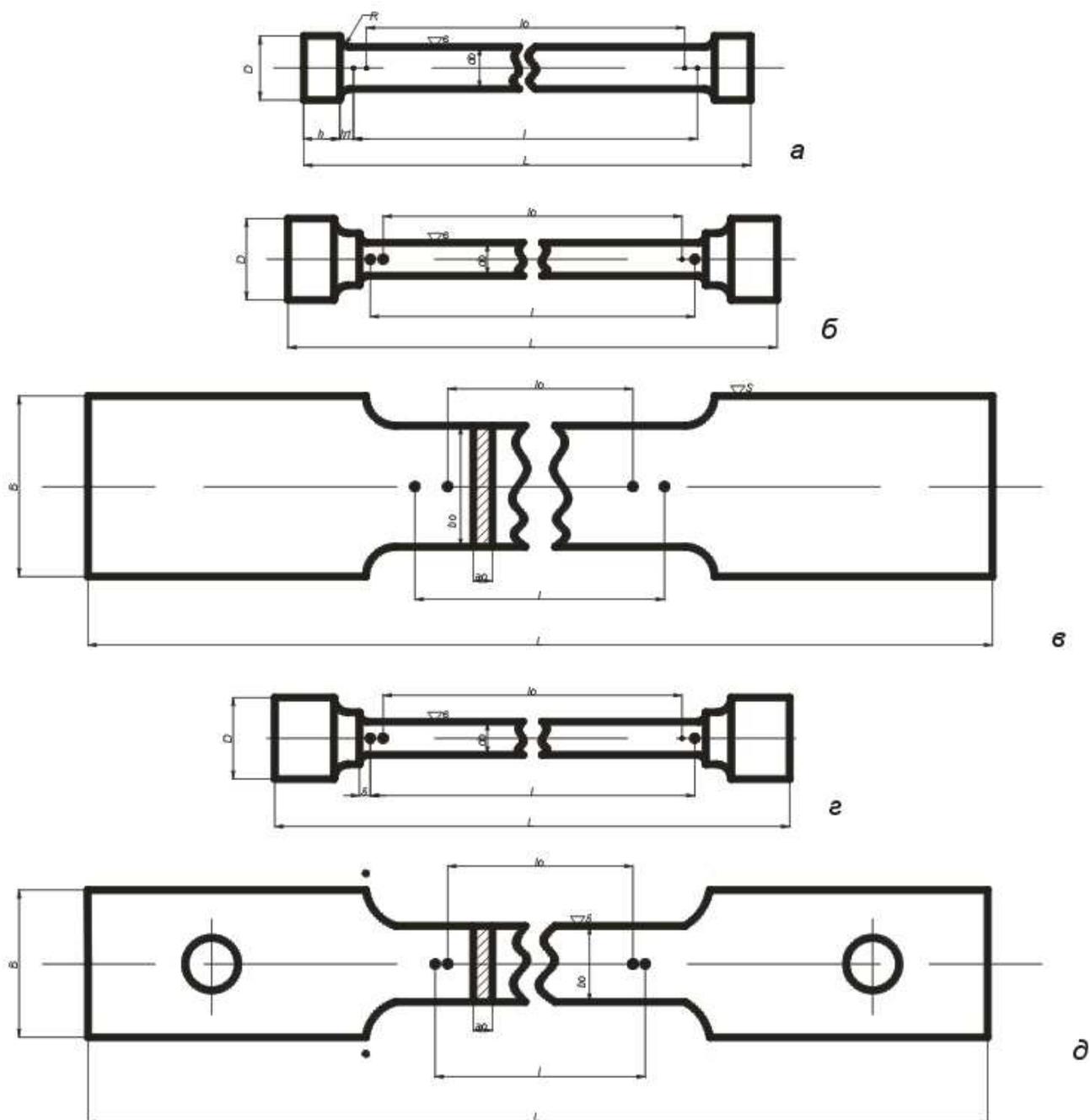


Рис. 4.1. – Стандартные образцы для испытаний на одноосное растяжение

Машины для испытаний на растяжение очень разнообразны. Многие из них универсальны и могут использоваться при проведении других статических испытаний (рис. 4.2). Современные испытательные машины высшего класса представляют собой сложные, частично автоматизированные устройства; они все оснащаются ЭВМ, при помощи которых может проводиться расчет любых характеристик свойств в процессе испытания или сразу же по его окончании.

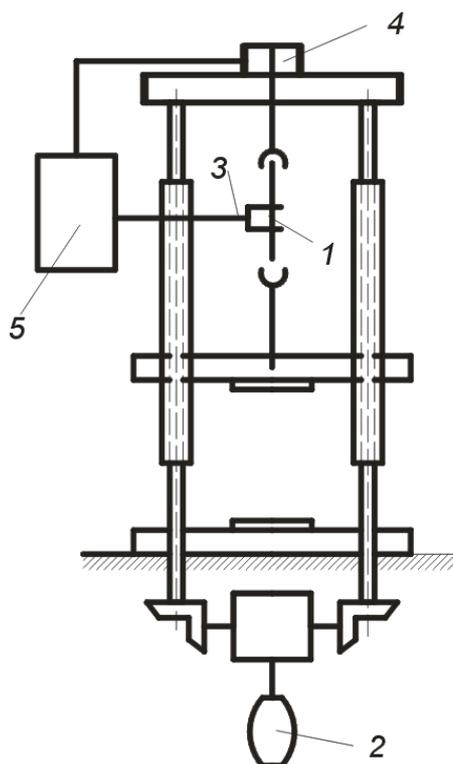


Рис. 4.2. – Схема универсальной испытательной машины:
 1 – образец; 2 – нагружающее устройство; 3 – датчик деформации;
 4 – датчик нагрузки; 5 – диаграммный прибор

Основными узлами любой испытательной машины являются приводное устройство, обеспечивающее плавное деформирование образца, и силоизмерительный механизм для измерения силы сопротивления образца создаваемой деформации.

По принципу действия приводного устройства различают машины с *механическим* и *гидравлическим* приводами. В машинах с механическим приводом от электродвигателя (рис. 4.2.1, а) подвижный захват 3 связан с грузовым винтом 5, находящимся в зацеплении с гайкой 4. Движение от электродвигателя через редуктор передается гайке. Вращаясь, она перемещает винт с захватом, растягивая испытываемый образец 2. Машины с механическим приводом обычно имеют небольшую мощность; они, как правило, рассчитаны на разрушающие усилия не более 0,1 – 0,15 МН. Гидравлический привод используется в машинах большей мощности, рассчитанных на нагрузки до 1 МН и выше. В этих машинах (см. рис. 4.2.1, б) подвижный захват 3 связан с поршнем 4, который перемещается в рабочем цилиндре 5 под давлением жидкости (обычно масла), создаваемым насосом.

На машинах с гидравлическим приводом труднее поддерживать заданную скорость деформирования образца 2, чем при использовании механического привода. По мере увеличения сопротивления материала образца деформированию растет давление масла в рабочем цилиндре. При этом усиливается просачивание жидкости через зазор между цилиндром и поршнем, и скорость деформирования уменьшается. Для ее поддержания на постоянном уровне необходим

дополнительный регулятор, увеличивающий подачу жидкости в цилиндр пропорционально ее утечке. Непостоянство скорости деформирования существенно, когда механические свойства испытываемого материала заметно зависят от нее, например, при повышенных температурах.

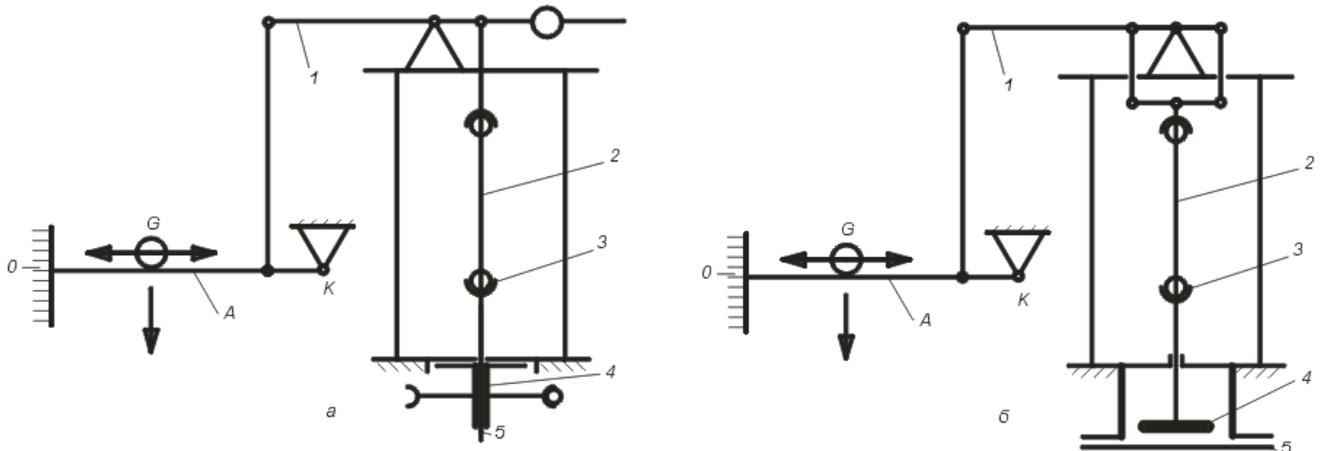


Рис. 4.2.1. – Схемы испытательных машин с механическим (а) и гидравлическим (б) приводами

Для измерения силы сопротивления образца деформации используют несколько типов устройств. Наиболее распространенными из них являются рычажные, маятниковые, торсионные, электротензометрические силоизмерители, мездозы.

Принцип действия рычажного силоизмерителя 1 ясен из рис. 4.2.1. Когда образец перемещается вниз вместе с подвижным захватом, то захват, следуя за образцом, также смещается вниз и стремится поднять вверх рычаг А, на котором имеется подвижный груз G. Передвигая этот груз влево, можно сохранить горизонтальное расположение рычага А, уравневав таким образом поданное на образец усилие. При этом величина смещения груза G относительно оси поворота рычага (точка К) будет пропорциональна силе сопротивления образца деформации. Остается определить коэффициент пропорциональности, что легко сделать по результатам тарировки, подавая на образец известные нагрузки.

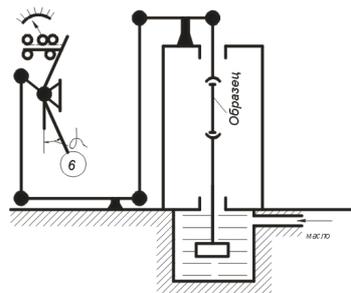


Рис. 4.3. – Схема гидравлической машины с маятниковым силоизмерителем

Еще большее распространение получил маятниковый силоизмеритель (рис. 4.3), отличающийся высокой надежностью. Здесь усилие на образец уравнивается тяжелым маятником G , связанным через систему рычагов с верхним захватом машины. Когда образец растягивается и верхний захват смещается вниз, маятник отклоняется на какой-то угол α от своего равновесного вертикального положения до тех пор, пока не уравнивает действующее на образец усилие. Маятник связан со стрелкой измерительного прибора, шкала которого проградуирована в единицах силы.

Рычажные и маятниковые силоизмерители успешно применяют при малых скоростях деформирования ($\leq 20 - 40$ мм/мин) и плавном изменении силы сопротивления образца деформации. В иных условиях из-за большой инерционности этих типов силоизмерителей измерение усилий выполняется со значительными ошибками. Например, при резком увеличении усилия в образце маятник по инерции поднимается выше положения равновесия, а затем возвращается обратно. Возникают колебания маятника, которые хоть и затухают, но могут серьезно нарушить точность оценки силы сопротивления образца деформации.

Значительно меньшей инерционностью отличаются месдозы и торсионные силоизмерители, используемые в гидравлических машинах. В месдозе усилие P на образце измеряется манометром, перемещение стрелки которого пропорционально силе, действующей на жидкость через поршень и эластичную мембрану.

В торсионном силоизмерителе цилиндрический стержень (пружина) одним концом закреплен неподвижно. Ко второму его концу через перпендикулярный рычаг прикладывается усилие, пропорциональное давлению жидкости в рабочем цилиндре машины.

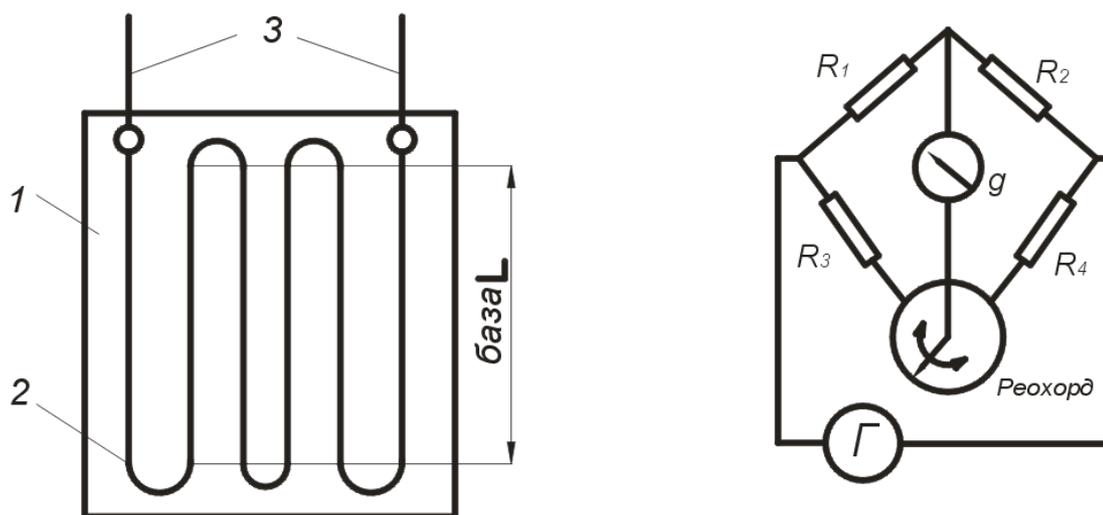


Рис. 4.4. – Резисторный тензодатчик (а) и схема измерения статических напряжений с помощью таких тензодатчиков (б):

1 – бумажная подкладка; 2 – плоская решетка из проволоки или фольги;
3 – выводные провода

Основными элементами электротензометрического силоизмерителя являются упругий элемент и тензодатчик, например резисторный (рис. 4.4, а). Резисторный датчик представляет собой тонкую проволоку или фольгу из материала с высоким коэффициентом тензочувствительности – отношением изменения электросопротивления ($\Delta R/R_0$) к упругому относительному удлинению. Проволоку укладывают определенным образом на тонкую бумажную подкладку. Тензодатчик наклеивают на упругий элемент (стальной цилиндр), к которому крепится неподвижный захват машины. При растяжении образца в упругом элементе возникают напряжения и соответствующие им упругие деформации, в результате чего пропорционально меняется электросопротивление тензодатчика. Для регистрации изменения сопротивления тензодатчик включают в схему измерительного моста. На рис. 4.4, б показан уравновешенный мост Уитстона, где плечо R_1 – резисторный датчик, R_2 – компенсационный датчик с тем же сопротивлением, что и у рабочего R_1 , до начала испытания. Сопротивления $R_3 = R_4 \gg R_1 = R_2$. На одну из диагоналей моста подают ток от источника G , а в другую включают электронный усилитель. Когда мост сбалансирован, индикатор усилителя g стоит на нуле. При растяжении R_1 изменяется и в цепи индикатора появляется ток. Изменяя положение реохорда (см. рис. 4.4, б), можно вновь восстановить равновесие моста, а показания реохорда проградуировать в единицах силы.

Все силоизмерительные механизмы позволяют не только визуально фиксировать силу сопротивления образца деформации в процессе испытания, но и записывать кривую изменения этой силы в зависимости от величины деформации (абсолютного удлинения) образца. Кривую в координатах нагрузка – удлинение называют первичной диаграммой растяжения, которая и является обобщенным результатом испытания. Перо самописца, перемещающееся по ленте на диаграммном барабане, связано только с силоизмерителем. Возможность фиксирования деформаций на диаграмме растяжения обеспечивается вращением барабана – направление движения ленты оказывается перпендикулярным оси нагрузок. В большинстве используемых машин скорость вращения диаграммного барабана, т. е. масштаб по оси удлинения, прямо связан со скоростью перемещения подвижного захвата машины. Это означает, что удлинение образца принимается равным перемещению подвижного захвата. Но величина удлинения должна определяться только на расчетной длине образца. Перемещение же захвата соответствует суммарному удлинению, включающему деформацию зажимов машины, а также упругие деформации других ее частей. Величина всех этих «паразитных» деформаций определяет *жесткость испытательной машины*.

По ГОСТ 1497-73 жесткость испытательной машины определяется как величина, обратная податливости K , равной перемещению подвижного захвата на единицу приложенной силы P . Перемещение подвижного захвата Δl_m включает суммарную упругую деформацию нагруженных частей машины. Таким образом, жесткость машины, МН/м, равна:

$$1/K = P / \Delta l_m.$$

Чем она больше, тем меньше упругая деформация частей машины при заданной нагрузке. Абсолютно жестких машин не бывает. Величина $1/K$ в современных испытательных машинах колеблется от десятков до сотен МН/м. Зависит она в основном от упругих деформаций в силоизмерительном механизме, которые вносят основной вклад в Δl_m (деформации станины, захватов и других частей машины обычно незначительны). Поэтому максимальную жесткость имеют машины с электротензометрическим силоизмерителем, а минимальную – с рычажно-маятниковым.

4.2. Методика проведения испытаний на растяжение

Основные требования к методике испытания на растяжение оговорены в стандартах. Эти требования следует рассматривать как минимальные.

Каждый образец перед испытанием маркируют, измеряют и размечают. Маркировку наносят вне пределов рабочей длины образца. Диаметр цилиндрических образцов следует измерять с точностью не ниже 0,01 мм при $d_o \leq 10$ мм и 0,05 мм при $d_o > 10$ мм. С такой же точностью необходимо измерять толщину плоских образцов, соответственно при $a_o \leq 2$ и $a_o > 2$ мм. Начальная расчетная длина образца l_o в пределах рабочей длины ограничивается неглубокими кернами или рисками с точностью до 1 % от величины l_o .

Все размеры после испытания определяют с точностью не ниже 0,1 мм. Для получения более точных результатов пользуются инструментальными микроскопами.

Каждый размер следует измерять несколько раз. Например, ГОСТ 1497-73 обязывает производить замер диаметра в середине и по краям рабочей части образца с последующим определением среднего значения, по которому рассчитывают площадь его поперечного сечения.

Величина нагрузки должна определяться с точностью до 0,5 наименьшего деления индикатора силоизмерительного механизма. Диапазон нагрузок выбирают таким образом, чтобы силы сопротивления образца деформации, по которым будут определяться прочностные характеристики, были не меньше 0,1 шкалы выбранного диапазона и не ниже 0,04 предельной нагрузки испытательной машины. При этом желательно, чтобы максимальная сила сопротивления образца находилась во второй половине шкалы. Именно при таком выборе диапазона нагрузок будет обеспечена наибольшая точность расчета характеристик свойств.

К методике проведения испытаний на растяжение при повышенных и отрицательных температурах предъявляют ряд специфических требований. При высокотемпературных испытаниях нагревательные устройства (термостаты и печи самых разнообразных конструкций) должны обеспечивать равномерный нагрев образца в пределах расчетной длины и поддержание заданной температуры в установленных пределах в течение всего времени испытания. Рекомендуется, чтобы длина рабочего пространства печи была, как минимум, в пять раз больше

начальной расчетной длины образца. При высокотемпературных испытаниях следует особое внимание уделять надежности крепления головок образцов в захватах, иначе возможно сильное искажение результатов из-за деформации, выскальзывания из захватов и преждевременного разрыва образца у головок, размягчающихся при нагреве. Поэтому при высокотемпературных испытаниях используют чаще всего цилиндрические образцы с резьбовыми головками, или плоские с отверстием, в которое вставляют проходящий через захват поперечный стержень (см. рис. 4.1, б). Точность поддержания температуры в образце тем меньше, чем она выше. До 873 °К эта точность не должна быть ниже ± 3 °К, от 873 °К до 1173 °К – ± 4 °К, от 1173 °К до 1473 °К – ± 6 °К. Время выдержки при температуре испытания, а также скорость нагрева могут существенно сказываться на механических свойствах. Обычно образцы выдерживают 5 – 30 мин. Скорость нагрева до заданной температуры, как правило, должна быть по возможности минимальной.

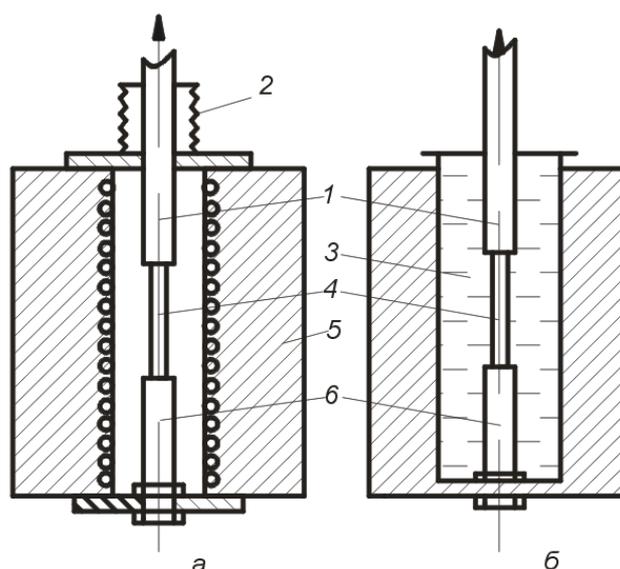


Рис. 4.5. – Схемы испытания на растяжение при повышенных (а) и отрицательных температурах (б):

1 – подвижный захват; 2 – сильфон; 3 – криостат с хладагентом;
4 – образец; 5 – печь; 6 – неподвижный захват

При повышенных температурах на свойствах многих металлов сильно сказывается окружающая образец среда. В частности, при нагреве, выдержке и в процессе испытания возможно взаимодействие материала образца с газами воздуха. За счет окисления, азотизации или наводороживания механические свойства могут кардинально изменяться. Поэтому при высокотемпературных испытаниях часто приходится использовать вакуумные печи с защитной атмосферой, например инертными газами (чаще всего аргоном). Тяги захватов при этом вводят в рабочее пространство печи через специальные устройства – сильфоны, позволяющие захватам перемещаться без разгерметизации внутреннего объема печи (рис. 4.5, а).

Для низкотемпературных испытаний между захватами машины устанавливают сосуд с теплоизолирующими стенками, содержащий охлаждающую жидкость (рис. 4.5, 6). Емкость такой криокамеры должна быть достаточно большой для того, чтобы обеспечить быстрое охлаждение и возможность поддержания заданной температуры образца при испытании.

До 213 °К в качестве охлаждающей среды используют смесь этилового спирта разных сортов с сухим льдом. Диапазон температур 213 °К – 173 °К получается в смесях чистого этилового спирта с жидким азотом. Использование жидкого азота без спирта позволяет получить температуру 77 °К. Изменение температуры охлаждающих смесей достигается за счет изменения соотношения компонентов. Кроме жидких охладителей, используются холодильные камеры с воздушной атмосферой. Допускаемые отклонения от заданной температуры испытания не должны быть больше ± 2 °К до 213 °К и ± 5 °К ниже 213 °К. Время выдержки при температуре испытания обычно составляет 10 – 20 мин в зависимости от размера образца. Для измерения отрицательных температур рекомендуется использовать жидкостные (нертутные) или термоэлектрические термометры сопротивления.

4.3. Прочностные характеристики при растяжении

Механические свойства при растяжении, как и при других статических испытаниях, могут быть разделены на три основные группы: прочностные, пластические и характеристики вязкости. Прочностные свойства – это характеристики сопротивления материала образца деформации или разрушению. Большинство стандартных прочностных характеристик рассчитывают по положению определенных точек на диаграмме растяжения, в виде условных растягивающих напряжений.

На практике механические свойства определяют по первичным кривым растяжения в координатах нагрузка – абсолютное удлинение, которые автоматически записываются на диаграммной ленте испытательной машины. Для поликристаллов различных металлов и сплавов все многообразие этих кривых при низких температурах можно свести в первом приближении к трем типам (рис. 4.6).

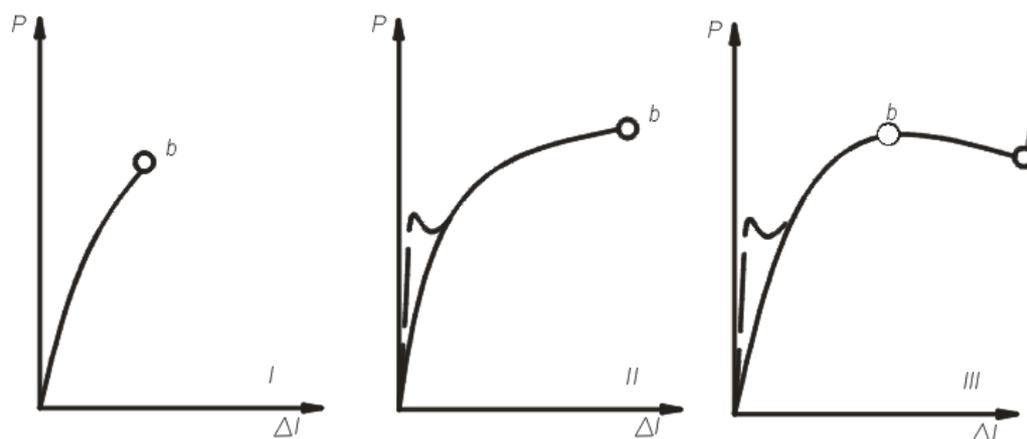


Рис. 4.6. – Типы первичных кривых растяжения

Диаграмма растяжения I типа характерна для образцов, разрушающихся без заметной пластической деформации. Диаграмма II типа получается при растяжении образцов, равномерно деформирующихся вплоть до разрушения. Наконец, диаграмма III типа характерна для образцов, разрушающихся после образования шейки в результате сосредоточенной деформации. Такая диаграмма может получиться и при растяжении образцов разрушающихся без образования шейки (при высокотемпературном растяжении); участок bk здесь может быть сильно растянут и почти параллелен оси деформации. Возрастание нагрузки до момента разрушения (рис. 4.6, II) или до максимума (рис. 4.6, III) может быть либо плавным (сплошные линии), либо прерывистым. В последнем случае на диаграмме растяжения могут, в частности, появиться «зуб» и площадка текучести (пунктир на рис. 4.6, II, III).

В зависимости от типа диаграммы меняется набор характеристик, которые по ней можно рассчитывать, а также их физический смысл. На рис. 4.7 (диаграмма III типа) нанесены характерные точки, по ординатам которых рассчитывают прочностные характеристики ($\sigma_i = P_i/F_0$). Как видно, на диаграммах двух других типов (рис. 4.6, I, II) могут быть нанесены не все эти точки.

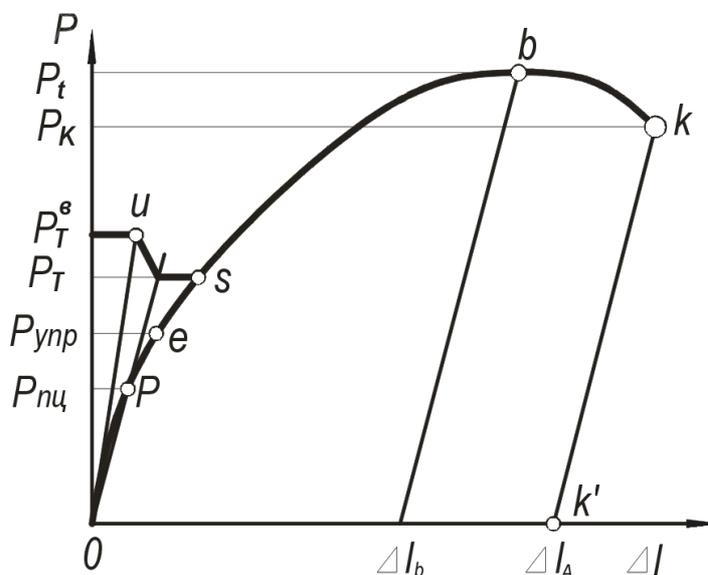


Рис. 4.7. – Характерные точки на диаграмме растяжения, по которым рассчитывают прочностные характеристики

Предел пропорциональности. Первая характерная точка на диаграмме растяжения – точка p (рис. 4.7). Усилие P_{nc} определяет величину *предела пропорциональности – напряжения, которое материал образца выдерживает без отклонения от закона Гука*. Приблизительно величину P_{nc} можно определить по

точке, где начинается расхождение кривой растяжения и продолжения прямолинейного участка (рис. 4.8).

Для того чтобы унифицировать методику и повысить точность расчета предела пропорциональности, его оценивают как условное напряжение (σ_{nu}), при котором отступление от линейной зависимости между нагрузкой и удлинением достигает определенной величины. Обычно допуск при определении σ_{nu} задают по уменьшению тангенса угла наклона, образованного касательной к кривой растяжения в точке p с осью деформаций, по сравнению с тангенсом на начальном упругом участке. Стандартная величина допуска 50 %, возможно также использование 10 % – ного и 25 % – ного допуска. Его величина должна указываться в обозначении предела пропорциональности – σ_{nu50} , σ_{nu25} , σ_{nu10} .

При достаточно большом масштабе первичной диаграммы растяжения величину предела пропорциональности можно определить графически прямо на этой диаграмме (рис. 4.8). В первую очередь продолжают прямолинейный участок до пересечения с осью деформаций в точке O , которую и принимают за новое начало координат, исключая, таким образом, искаженный из-за недостаточной жесткости машины начальный участок диаграммы. Далее можно пользоваться двумя способами. По первому из них на произвольной высоте в пределах упругой области восстанавливают перпендикуляр AB к оси нагрузок (рис. 4.8, *a*) откладывают вдоль него отрезок $BC = \frac{1}{2} AB$ и проводят линию OC . При этом $tga' = tga/l,5$. Если теперь провести касательную к кривой растяжения параллельно OC , то точка касания p определит искомую нагрузку P_{nu} .

При втором способе из произвольной точки прямолинейного участка диаграммы опускают перпендикуляр KY (рис. 4.8, *б*) на ось абсцисс и делят его на три равные части. Через точку C и начало координат проводят прямую, а параллельно ей – касательную к кривой растяжения. Точка касания p соответствует усилию P_{nu} ($tga' = tga/l,5$).

Более точное определение предела пропорциональности возможно при использовании специальных приборов – тензометров – для измерения малых деформаций. Используются тензометры с различными принципами действия: оптико-механические (зеркальные), емкостные, индуктивные, дифференциально-трансформаторные, механотронные и др.

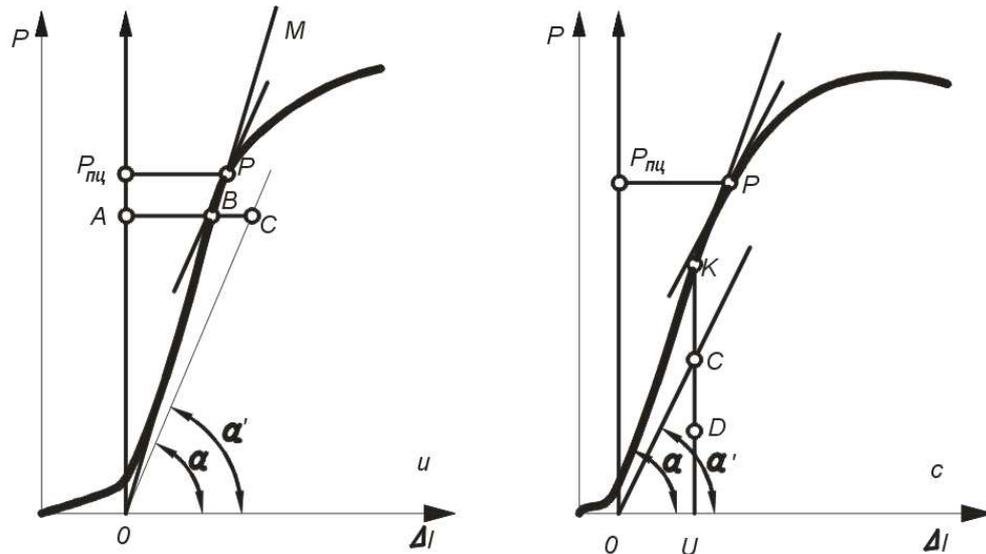


Рис. 4.8. – Графические способы определения предела пропорциональности

Методика определения предела пропорциональности с помощью тензометров сводится к следующему. Сначала образец без тензометров растягивают до достижения начального усилия P_0 , соответствующего $\sim 10\%$ от примерно ожидаемого предела пропорциональности. Затем на образец устанавливают тензометр, обеспечивающий измерение удлинений с двух противоположных сторон образца. Последующее нагружение образца производят ступенями и сразу же после каждой ступени нагружения (без разгрузки) снимают показания тензометров. До напряжения, отвечающего $70 - 80\%$ ожидаемого σ_{nc} , дают три – пять крупных (и равных по величине) ступеней ΔP . Дальнейшие ступени $\Delta P'$ делают более мелкими: $\Delta\sigma \approx 20 \text{ МПа}$. Испытание прекращают, когда прирост удлинения $\Delta l = \Delta_{cp} + f$ увеличится в $1,5 - 3$ раза по сравнению со средним приростом деформации Δ_{cp} (при той же степени нагружения) на прямолинейном участке кривой растяжения.

Искомая нагрузка P_{nc} должна отвечать приросту удлинения $\Delta l = \Delta_{cp} + f_{зад}$, где $f_{зад}$ – заданный допуск на отклонение от закона пропорциональности. Обычно $f_{зад} = 0,5\Delta$. Если после очередной малой ступени нагружения на ΔP_i получим $\Delta l > \Delta + f_{зад}$, то для определения P_{nc} допускается линейная интерполяция. Например, Δ_{cp} равно восьми делениям шкалы тензометра, а $f_{зад}$ – четырем делениям. При нагрузке 40000 Н величина Δl_i равна десяти делениям (не хватает двух делений для получения $f_{зад}$). После очередной ступени нагружения ($\Delta P' = 1000 \text{ Н}$) величина Δl_{i+1} составляет 14 делений. Следовательно, приросту усилия на 1000 Н соответствуют четыре деления шкалы тензометра, на одно деление приходится 250 Н . Тогда $P_{nc} = 40000 + 2 \times 250 = 40500 \text{ Н}$.

При определении предела пропорциональности можно оценить и величину модуля нормальной упругости. Для этого необходимо перевести использованную ступень нагружения ΔP в соответствующий прирост напряжений $\Delta\sigma$, а среднее абсолютное удлинение Δ_{cp} в упругой области, отвечающее каждой ступени, – в

относительное $\Delta\delta$. Поскольку в области упругой деформации поперечное сечение образца почти не меняется, $\Delta\sigma \approx \Delta S$, а $\Delta\delta$ очень близко к приросту истинного относительного удлинения Δe . Тогда $E = \Delta S/\Delta e \approx \Delta\sigma/\Delta\delta$.

При испытаниях на растяжение может быть определен коэффициент Пуассона. Для этого на образец в виде широкой пластины устанавливают два тензометра для измерения поперечной и продольной деформации.

Предел упругости. Следующая характерная точка на первичной диаграмме растяжения (рис. 4.7) – точка e . Ей отвечает нагрузка, по которой рассчитывают условный *предел упругости* – *напряжение, при котором остаточное удлинение достигает заданной величины*, обычно 0,05 %, иногда меньше – вплоть до 0,005 %. Использованный при расчете допуск указывается в обозначении условного предела упругости: $\sigma_{0,05}$, $\sigma_{0,01}$ и т. д.

Предел упругости характеризует напряжение, при котором появляются первые признаки макропластической деформации. В связи с малым допуском по остаточному удлинению даже $\sigma_{0,05}$ трудно с достаточной точностью определить по первичной диаграмме растяжения. Поэтому в тех случаях, когда высокой точности не требуется, предел упругости принимается равным пределу пропорциональности. Если же необходима точная количественная оценка $\sigma_{0,05}$, то используют тензометры. Методика определения $\sigma_{0,05}$ во многом аналогична описанной для σ_{nc} , но имеется одно принципиальное различие. Поскольку при определении предела упругости допуск задается по величине остаточной деформации, после каждой ступени нагружения необходимо разгружать образец до начального напряжения $\sigma_0 \leq 10\%$ от ожидаемого $\sigma_{0,05}$ и затем только измерять удлинение по тензометру.

Если масштаб записи диаграммы растяжения по оси удлинений составляет 50:1 и более, а по оси нагрузок ≤ 10 МПа на 1 мм, ГОСТ 1497-73 допускает графическое определение $\sigma_{0,05}$. Для этого по оси удлинений от начала координат откладывают отрезок $OK = 0,05l_0/100$ и через точку K проводят прямую, параллельную прямолинейному участку диаграммы (рис. 4.9). Ордината точки e будет соответствовать величине нагрузки $P_{0,05}$, определяющей условный предел упругости: $\sigma_{0,05} = P_{0,05}/F_0$.

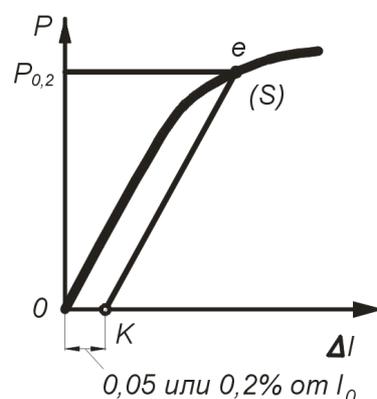


Рис. 4.9. – Определение условных предела упругости и текучести по диаграмме растяжения

Предел текучести. При отсутствии на диаграмме растяжения зуба и площадки текучести рассчитывают *условный предел текучести* – *напряжение, при котором остаточное удлинение достигает заданной величины*, обычно 0,2 %, иногда 0,1 % или 0,3 % и более. Соответственно условный предел текучести обозначается $\sigma_{0,2}$, $\sigma_{0,1}$ или $\sigma_{0,3}$. Как видно, эта характеристика отличается от условного предела упругости только величиной допуска. Предел текучести характеризует напряжение, при котором происходит более полный переход к пластической деформации.

Наиболее точная оценка величины $\sigma_{0,2}$ может быть выполнена при использовании тензометров. Методика здесь полностью аналогична применяемой для определения $\sigma_{0,05}$. Поскольку допуск по удлинению для расчета условного предела текучести относительно велик, его часто определяют графически по диаграмме растяжения, если последняя записана в достаточно большом масштабе (не менее 10:1 по оси деформаций). Делается это так же, как при расчете предела упругости (рис. 4.9), только отрезок $OK = 0,2 l_0/100$.

Условные пределы пропорциональности, упругости и текучести характеризуют сопротивление материала малым деформациям. Величина их незначительно отличается от истинных напряжений, отвечающих соответствующим допускам по деформации. Техническое значение этих пределов сводится к тому, чтобы оценить уровни напряжений, под действием которых та или иная деталь может работать, не подвергаясь остаточной деформации (предел пропорциональности) или деформируясь на какую-то небольшую допускаемую величину, определяемую условиями эксплуатации ($\sigma_{0,01}$, $\sigma_{0,05}$, $\sigma_{0,2}$ и т.д.).

Предел прочности. После прохождения точки s на диаграмме растяжения (рис. 4.7) в образце развивается интенсивная пластическая деформация. До точки b рабочая часть образца сохраняет первоначальную форму. Удлинение здесь равномерно распределяется по расчетной длине. В точке b эта макроравномерность пластической деформации нарушается. В какой-то части образца, обычно вблизи концентратора напряжений, который был уже в исходном состоянии или образовался при растяжении (чаще всего в середине расчетной длины), начинается локализация деформации. Ей соответствует местное сужение поперечного сечения образца – образование шейки.

Возможность значительной равномерной деформации и «оттягивание» момента начала образования шейки в пластичных материалах обусловлены деформационным упрочнением. Если бы его не было, то шейка начала бы формироваться сразу же по достижении предела текучести. На стадии равномерной деформации увеличение напряжения течения из-за деформационного упрочнения полностью компенсируется удлинением и сужением расчетной части образца. Когда же прирост напряжения из-за уменьшения поперечного сечения становится больше прироста напряжения из-за деформационного упрочнения, равномерность деформации нарушается и образуется шейка.

Шейка начинает образовываться по достижении удлинения, которому соответствует тот участок кривой истинное напряжение – истинная деформация,

наклон которого численно равен величине истинного напряжения в этот момент деформации. Шейка развивается от точки b вплоть до разрушения в точке k (рис. 4.7), одновременно снижается действующее на образец усилие. По максимальной нагрузке P_b (рис. 4.6, 4.7) на первичной диаграмме растяжения рассчитывают *временное сопротивление* (часто его называют *условным пределом прочности*) $\sigma_s = P_b/F_0$.

Для материалов, разрушающихся с образованием шейки, σ_s – это условное напряжение, характеризующее сопротивление максимальной равномерной деформации. Предельную прочность таких материалов σ_s не определяет.

4.4. Характеристики пластичности при растяжении

Основные характеристики пластичности при испытании на растяжение – относительное удлинение δ и относительное сужение φ . Относительное удлинение можно рассчитывать по первичной диаграмме растяжения. Определив абсолютное удлинение Δl к моменту разрушения в точке k (рис. 4.6) и зная начальную расчетную длину l_0 , получим величину δ . Но при записи диаграммы без применения тензометров фиксируется удлинение не только расчетной части, а всего образца вместе с головками. Этот факт, а также недостаточная жесткость многих испытательных машин, делает расчет δ по диаграмме растяжения менее точным, чем по результатам измерения конечной расчетной длины l_k разорванного образца.

Если разрушение происходит в средней трети расчетной длины образца, то l_k определяют как расстояние между границами расчетной длины после плотного составления двух половин разрушенного образца. Когда эти половинки нельзя составить плотно, без заметного зазора, следует определять l_k как сумму расстояний от границ расчетной длины до края излома каждой части разорванного образца.

Методика несколько усложняется, если разрыв происходит вблизи головок – в одной из крайних третей расчетной части образца. Дело в том, что распределение удлинения в пределах расчетной длины неравномерно (рис. 4.10). Вблизи шейки, где локализуется пластическая деформация, удлинение, естественно, больше, чем вдали от нее, где оно не превышает величины равномерного удлинения Δl_b . Если образец разрывается вблизи головки, то измерение расстояния между границами расчетной длины даст явно заниженную величину l_k по сравнению с той, которую бы получили при аналогичном разрыве образца на две примерно равные половины.

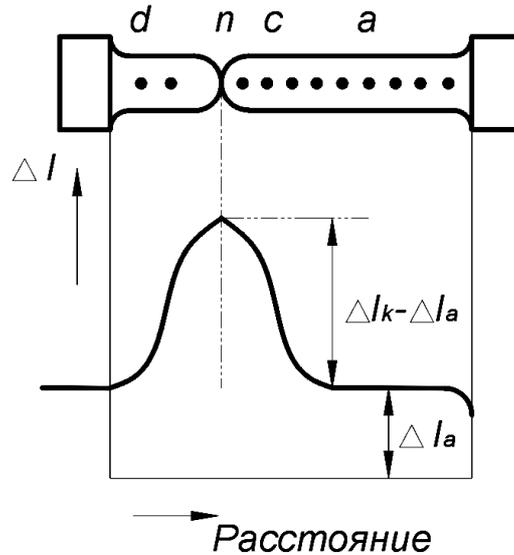


Рис. 4.10. – Распределение удлинения по рабочей длине растянутого образца

Для того, чтобы избежать такого занижения l_k и соответственно относительного удлинения, используют специальный прием «переноса» места разрыва к середине образца. Для этого расчетную длину до начала испытания делят рисками на N (обычно 6 – 10) равных интервалов. Если отрыв происходит в средней трети расчетной длины, то эти риски не нужны. Если же излом пройдет по одной из крайних третей расчетной длины, например, между второй и третьей рисками на рис. 4.10, то l_k определяют следующим образом. Обозначим буквой d крайнюю риску на короткой части разрушенного образца. Риска c располагается, так, что $dn \approx cn$. Расстоянию cd соответствует какое-то число N' интервалов. Если N' четное число, то далее от точки c в сторону более длинной части образца откладываем $(N - N')/2$ интервалов. Если N' нечетно, то откладываем $(N - N' - 1)/2$ интервалов, получаем точку a . Теперь можно определить «истинную» $l_k = cd + 2ac$.

Схема на рис. 4.10 позволяет сделать несколько важных выводов. Ширина зоны сосредоточенной деформации cd обычно не превышает двух диаметров d_0 образца. Поэтому место разрыва имеет смысл «переносить», если он происходит в одной из крайних третей образца. Ошибки в определении l_k при меньшем удалении места излома от середины образца незначительны. «Перенос» места разрыва теряет также смысл при отсутствии шейки или небольшой ее величине ($\varphi < 10\%$).

Значения cd и l_k примерно постоянны для данного материала при одинаковой F_0 и не зависят от l_0 . Поэтому, чем больше l_0 , тем меньше влияние сосредоточенной деформации на суммарное относительное удлинение, т. е., чем короче образец, тем большая доля длины приходится на сильную сосредоточенную деформацию и тем больше измеряемая после испытания величина δ . При использовании стандартных образцов с пяти- и десятикратным отношением l_0/d_0 вклад сосредоточенной деформации в общее относительное удлинение (обозначается δ_5 δ_{10}) для большинства металлов и сплавов сравнительно невелик. Поэтому для них величина δ характеризует в основном способность к равномерной деформации, а не

предельную пластичность материала. В некоторых случаях целесообразно отдельно определять равномерное и сосредоточенное относительное удлинение.

Для характеристики предельной способности материала к пластическому растяжению до разрыва более правильно использовать относительное сужение φ , также определяемое суммой равномерного и сосредоточенного сужения. Но здесь вклад равномерной деформации в суммарное относительное сужение обычно невелик. Величина равномерного относительного сужения $\varphi_b = (F_0 - F_b)/F_0$ пластичных материалов (за исключением случаев сверхпластической деформации) не превышает 10 – 15 %, в то время как φ достигает 70 – 99 %. Общее φ является, таким образом, характеристикой в основном сосредоточенной деформации, если в образце перед разрушением образуется шейка.

Для экспериментального определения относительного сужения после разрыва образца достаточно измерить его минимальный диаметр в месте разрыва. Величину φ определяют обычно при испытании цилиндрических образцов. Образование шейки при растяжении плоских образцов сопровождается усложнением формы поперечного сечения, площадь которого и соответственно величину φ точно установить довольно трудно.

Характеристики пластичности часто связаны с прочностными свойствами. При достаточно высоких значениях относительного удлинения и сужения (> 10 – 20 %) прочность обычно тем меньше, чем выше пластичность. Но переход к хрупкому разрушению сопровождается, как правило, снижением прочностных свойств.

В зависимости от величины удлинения меняется разница между пределами текучести и прочности. Отношение $\sigma_{0,2} (\sigma_{т.н}) / \sigma_v$ является важной характеристикой материала. Обычно оно тем меньше, чем выше пластичность. Например, у высокопластичных ($\delta = 15 - 35 \%$) отожженных алюминиевых сплавов $\sigma_{0,2}/\sigma_v = 0,38 - 0,45$, а у искусственно состаренных – 0,77 – 0,96 (при $\delta < 5 \%$).

4.5. Работа пластической деформации при растяжении

Пластическая деформация образца, в частности при растяжении, требует затраты определенной работы. Эта работа частично рассеивается образцом в виде тепла (образец слегка нагревается при деформации), но большая ее часть остается в виде запасенной, накопленной энергии, связанной главным образом с дислокациями. Величина работы деформации служит важной характеристикой материала, которой в последние годы уделяется все большее внимание.

Полная работа деформации A при растяжении определяется площадью между первичной кривой растяжения и осью деформаций. Например, на рис. 4.7 работе деформации соответствует площадь *O p e s b k k''*. Тогда:

$$A = \int_0^{\Delta_k} P d(\Delta l) = \int_0^{\Delta_k} P dl.$$

Кроме полной, определяют удельную работу деформации (вязкость), т. е. работу, отнесенную к единице объема расчетной части образца: $a = A/V = (P\Delta l)/Fl = S e$, где P и S – усредненные величины. Отсюда следует, что величина a определяется как площадь под кривой истинных напряжений (рис. 4.11, *obk*):

$$a = \int_0^{l_k} S de$$

В первом приближении (пунктир на рис. 4.11) $a = (S_\tau + S_k) e_k/2$.

Видно, что $e_k = (S_k - S_\tau)/tg\beta$, где $tg\beta$ – коэффициент деформационного упрочнения. Тогда:

$$a = \frac{S_k^2 - S_\tau^2}{2tg\beta}$$

Из формул следует, что удельная работа деформации – это комплексная характеристика. Она определяется совокупностью более «простых» механических свойств материала – прочностных и пластических.

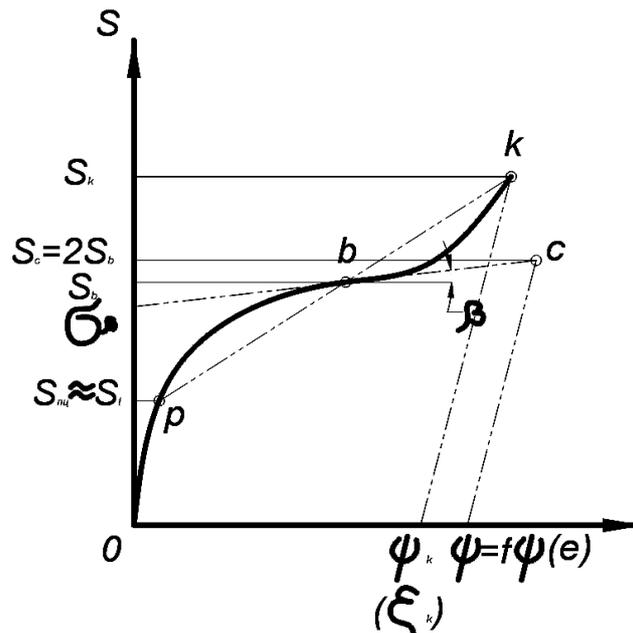


Рис. 4.11. – Диаграмма истинных напряжений при растяжении

Следует подчеркнуть, что по формуле $a = \frac{S_k^2 - S_\tau^2}{2tg\beta}$ экспериментальным точкам

на зависимостях вязкости от различных параметров, например от температуры или концентрации легирующего элемента, не должны в общем случае соответствовать экстремумы на соответствующих зависимостях предела текучести, истинного сопротивления разрыву или коэффициента деформационного упрочнения. При плавном, монотонном изменении этих свойств на кривой вязкости могут наблюдаться максимумы и минимумы. Таким образом, удельная работа

деформации может оказаться более чувствительной характеристикой изменения структурного состояния материала, чем «простые» свойства.

4.6. Контрольные вопросы

1. Какие статические испытания используются для оценки механических свойств материалов экспозиционно-рекламных объектов?
2. Назовите и поясните, какие виды стандартных образцов используются для проведения испытаний на растяжение?
3. Какова схема универсальной испытательной машины? Поясните.
4. Как работают машины с механическим и гидравлическим приводами?
5. Каков принцип действия рычажного силоизмерителя?
6. Как работает электротензометрический силоизмеритель?
7. Какова методика проведения испытаний на растяжение?
8. Как на практике определяют механические свойства металлов и сплавов? Поясните.
9. Как определяют предел пропорциональности?
10. Как определяют предел упругости?
11. Как определяют предел текучести?
12. Как определяют предел прочности?
13. Поясните характеристики пластичности при растяжении.
14. Что понимают под работой пластической деформации при растяжении?

Тема №5

СТАТИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ НА СЖАТИЕ, ИЗГИБ И КРУЧЕНИЕ

Цель работы: Ознакомиться с испытаниями материалов и основными расчетами, проводимыми при изгибе, кручении и сжатии.

5.1. Испытания на сжатие

Схема одноосного сжатия характеризуется большим коэффициентом мягкости ($a = 2$) по сравнению с растяжением ($a = 0,5$), поэтому испытаниям на сжатие целесообразно подвергать относительно хрупкие материалы. На практике по этим испытаниям оценивают свойства чугуна и других хрупких сплавов.

Расчет нормальных и касательных напряжений при сжатии и растяжении производят аналогично. В результате пластической деформации при сжатии образец укорачивается и уширяется. Следовательно, вместо измерившихся после растяжения δ и φ в качестве характеристик пластичности при сжатии можно определять относительное укорочение:

$$\varepsilon = [(h_0 - h_k) / h_0] \cdot 100 \%$$

и относительное уширение:

$$\varphi = [(F_n - F_0) / F_0] \cdot 100 \%,$$

где h_0 и h_k – начальная и конечная высота образца;

F_0 и F_k – начальная и конечная площади поперечного сечения.

Линейность схем напряженного и деформированного состояния при одноосном сжатии и растяжении обуславливает близость характеристик сопротивления малым деформациям одного материала, испытываемого двумя методами. Но после перехода к существенной пластической деформации (при напряжениях выше предела текучести) схема одноосного сжатия в реальных испытаниях нарушается, и фиксируемые характеристики прочностных свойств уже резко отличаются от определяемых при растяжении. Это связано с трением по опорным поверхностям образца.

Схема испытания на сжатие и геометрия используемых образцов показаны на рис. 5.1. Испытания проводят на тех же машинах, что и растяжение. Образец устанавливают на опорную плиту в нижнем захвате и сжимают подвижным захватом. Для устранения перекоса образца усилие сжатия следует передавать на

него с помощью какого-либо направляющего приспособления, например шарового вкладыша в верхнем захвате (рис. 5.1, *а*).

По мере сжатия на торцовых поверхностях образца возникают силы трения, направленные по радиусам к его центру и препятствующие деформации в горизонтальном направлении. В результате образец приобретает характерную бочкообразную форму (рис. 5.1, *а*), а схема напряженного состояния усложняется и становится различной в разных точках образца. В точках 1 и 2, например, возникает схема объемного сжатия, а в точке 3 – разноименное плоское напряженное состояние. Неоднородность напряженного состояния образца в практике не учитывают, рассчитывая прочностные характеристики при сжатии по тем же формулам, что и при растяжении ($\sigma_i = P_i/F_0$). Это придает дополнительную условность определяемым свойствам. Поэтому стараются уменьшить силы трения на опорных поверхностях образца, что достигают обычно одним из следующих способов или их сочетанием:

1) введением различных смазок (вазелин, солидол) и прокладок (тефлон, пропитанная парафином фильтровальная бумага) между торцовыми поверхностями образца и опорными плитами;

2) использованием подкладок и образцов с конической поверхностью на торцах (рис. 5.1, *в*). Углы конусности α подбирают так, чтобы $l g \alpha$ был равен коэффициенту трения;

3) помимо конусности, в образце делают центральное отверстие, устраняющее концентрацию напряжений у острия конуса (рис. 5.1, *г*).

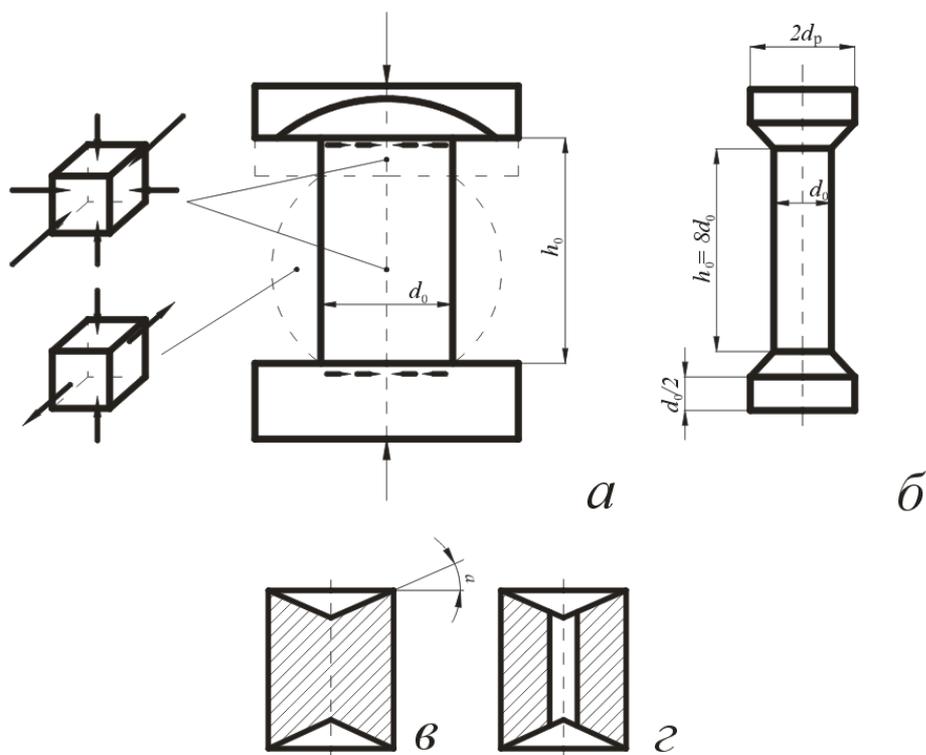


Рис. 5.1. – Схема (*а*) и формы образцов (*б – г*) для испытания на сжатие

Но полностью устранить контактные силы трения и обеспечить в течение всего испытания линейное напряженное состояние в образце не удастся. Это принципиальный недостаток испытаний на сжатие.

Чем меньше отношение высоты образца к диаметру, тем сильнее контактное трение влияет на результаты испытаний. С этих позиций следовало бы проводить испытания на возможно более длинных образцах. Но при сжатии длинных образцов трудно избежать их продольного изгиба. Как показывает опыт, оптимальной для цилиндрического образца является величина отношения h_0/d_0 в пределах 1 – 3.

Для определения модуля нормальной упругости при сжатии, пределов упругости и пропорциональности иногда используют плоские образцы в виде пластин толщиной 2 – 5 мм, длиной 100 мм и шириной 20 мм. Они испытываются в специальных приспособлениях, обеспечивающих их продольную устойчивость.

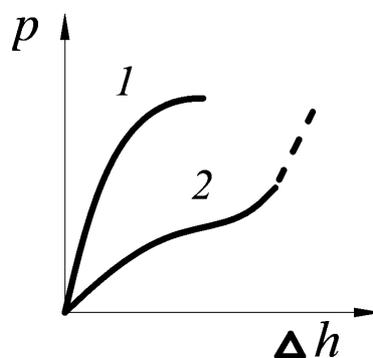


Рис. 5.2. – Диаграммы сжатия материалов, разрушающихся (1) и не разрушающихся (2) при испытании

При испытании на сжатие машина может зафиксировать первичную диаграмму сжатия – зависимость усилия P от уменьшения высоты образца (абсолютной деформации) Δh . Вид диаграммы сжатия различен для материалов, разрушающихся (рис. 5.2, 1) и не разрушающихся (рис. 5.2, 2) в результате испытания. В отличие от испытаний на растяжение при сжатии удастся разрушить далеко не любой материал. Достаточно пластичные металлы и сплавы при сжатии расплющиваются в тонкие пластины и не разрушаются при максимально возможных усилиях испытательной машины.

Характер разрушения сжимаемых образцов зависит от величины контактных сил трения. Если они велики, то обычно наблюдается разрушение путем среза; если же они незначительны, то фиксируется разрушение отрывом.

По диаграмме сжатия определяют условные пределы пропорциональности, упругости, текучести и прочности. Понятно, что условный предел прочности материалов, не разрушающихся при сжатии, определить нельзя. Методика определения прочностных свойств по диаграмме сжатия полностью аналогична методике для растяжения. При определении характеристик сопротивления малым деформациям для повышения точности рекомендуется использовать удлиненные образцы (рис. 5.1, б) с $h_0 = 8 d_0$. Головки обеспечивают устойчивость образца на

опорных плитах и предотвращают изгиб. Для прецизионного определения пределов пропорциональности, упругости и текучести используют, как и при испытаниях на растяжение, тензометры.

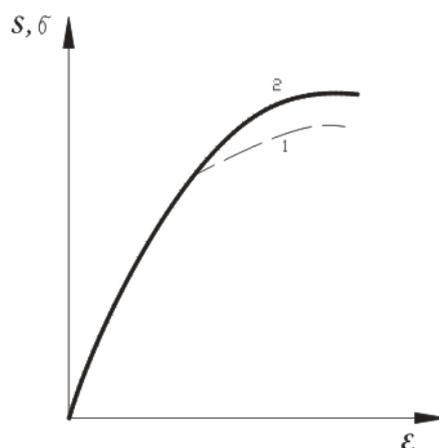


Рис. 5.3. – Диаграммы истинных (1) и условных (2) напряжений при сжатии

Искажение схемы линейного сжатия контактными силами трения затрудняет определение истинной величины сопротивления металла пластической деформации. Но, учитывая правило постоянства объема образца в процессе пластической деформации, можно перестроить первичную диаграмму сжатия $P - \Delta h$ в кривую истинных напряжений $S - \varepsilon$. Поскольку объем образца

$$V = F_0 h_0 = F h = const,$$

$$F = F_0 h_0 / h = F_0 / (h / h_0 + 1 - 1) = F_0 / (1 - \varepsilon).$$

При этом

$$d^2 = d_0^2 h_0 / h.$$

Здесь:

F – площадь поперечного сечения образца, отвечающая условию постоянства объема и равномерности сжатия по высоте образца;

d – средний диаметр цилиндрического или бочкообразного образца.

Отсюда:

$$F / F_0 = 1 / (1 - \varepsilon),$$

$$\varphi = (F - F_0)/F_0 = F/F_0 - 1 = 1/(1 - \varepsilon) - 1 = \varepsilon/(1 - \varepsilon),$$

$$\varepsilon = (\varphi / (1 + \varphi)).$$

Истинное напряжение сжатия:

$$S = P/F = P(1 - \varepsilon)/F_0 = \sigma(1 - \varepsilon) = \sigma/(1 + \psi).$$

Отсюда видно, что при сжатии, в противоположность растяжению, $S < \sigma$, так как $F > F_0$. Диаграммы истинных напряжений при сжатии строят обычно в координатах $S - \varepsilon$ (рис. 5.3, 1).

На рис. 5.3, 2 нанесена кривая условных напряжений $\sigma - \varepsilon$, которая при сжатии всегда имеет вид, качественно аналогичный диаграмме истинных напряжений, поскольку на первичной диаграмме сжатия никогда нет максимума и участка снижения нагрузки.

Значения прочностных характеристик при сжатии, особенно предела прочности, обычно значительно выше, чем при растяжении.

5.2. Испытания на изгиб

Применение испытаний на изгиб обусловлено широкой распространенностью этой схемы нагружения в реальных условиях эксплуатации и большей ее мягкостью по сравнению с растяжением, что дает возможность оценивать свойства материалов, хрупко разрушающихся при растяжении. Испытания на изгиб удобны для оценки температур перехода из хрупкого состояния в пластичное. При испытаниях на изгиб применяют две схемы нагружения образца, лежащего на неподвижных опорах:

- 1) нагрузка прикладывается сосредоточенной силой на середине расстояния между опорами (рис. 5.4, а);
- 2) нагрузка прикладывается в двух точках на одинаковом расстоянии от опор (рис. 5.4, б).

Экспериментально первую схему реализовать гораздо проще, поэтому она и нашла наибольшее распространение. Следует учитывать, что вторая схема «чистого изгиба» во многих случаях обеспечивает более надежные результаты, поскольку здесь максимальный изгибающий момент возникает на определенном участке длины образца, а не в одном сечении, как при использовании первой схемы.

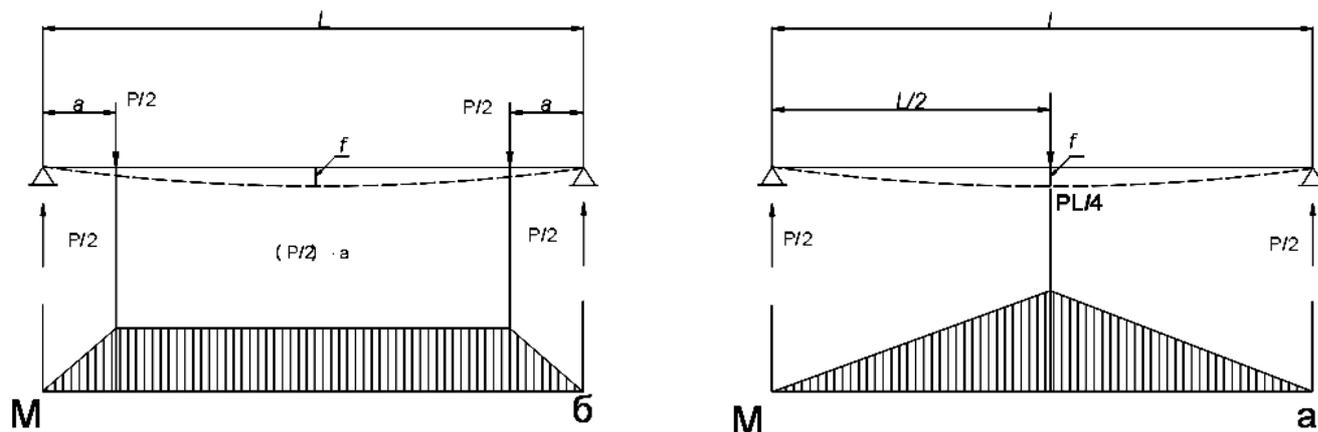


Рис. 5.4. – Схемы изгиба сосредоточенной силой (а) и двумя симметричными нагрузками (б) с эпюрами изгибающего момента M

В изгибаемом образце создается неоднородное напряженное состояние, зависящее от геометрии образца и способа нагружения. При чистом изгибе узких образцов с прямоугольным сечением напряженное состояние в каждой точке можно считать линейным. В широких образцах (с отношением ширины к высоте сечения более трех) при обеих схемах изгиба (рис. 5.4) создается двухосное напряженное состояние из-за затруднения поперечной деформации. Нижняя часть образца оказывается растянутой, верхняя – сжатой. К тому же напряжения, связанные с величиной изгибающего момента, различны по длине и сечению образца. Максимальные напряжения возникают вблизи поверхности. Все это затрудняет оценку средних истинных напряжений и деформаций, строго характеризующих механические свойства при изгибе.

Образцы для испытаний на изгиб не имеют головок. Это еще одно преимущество по сравнению с растяжением, так как изготовление образцов с головками, особенно из хрупких материалов, значительно сложнее. На изгиб испытывают прямоугольные или цилиндрические стержни. Для определения свойств отливок из чугуна используют цилиндрические образцы диаметром 30 ± 1 мм и длиной 340 мм или 650 мм (при растяжении между опорами 300 и 600 мм соответственно). Для исследовательских целей испытания на изгиб обычно ведут на цилиндрических образцах с $d_0 = 2 - 10$ мм и расстоянием между опорами $l \geq 10 d_0$ или плоских образцах с высотой $b = 1 - 3$ мм, шириной $h = 3 - 15$ мм и $l \geq 10 h$. Для оценки характеристик конструкционной прочности рекомендуется применять образцы большого сечения до 30 x 30 мм.

Испытания на изгиб можно проводить на любой универсальной испытательной машине, используемой для испытаний на растяжение. Образец устанавливают на опорную плиту в нижнем захвате и деформируют изгибающим ножом, крепящимся в верхнем захвате машины. Для уменьшения трения опоры, на которых лежит образец, часто делают из роликоподшипников. Образец изгибается при опускании верхнего или подъеме нижнего захвата. При этом на диаграммной ленте может быть записана диаграмма изгиба в координатах нагрузка P – стрела

прогиба f . Для пластичного материала диаграмма изгиба выглядит так, как показано на рис. 5.5. Если материал хрупкий, то кривая обрывается в точке b . Знание величины нагрузок $P_{пц}$, $P_{упр}$, P_m , P_b позволяет определять пределы пропорциональности, упругости, текучести и прочности при изгибе. Напряжения на стадии упругой деформации рассчитывают по обычным формулам сопротивления материалов.

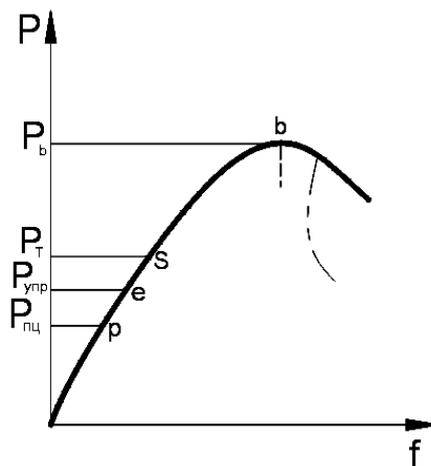


Рис 5.5. – Диаграмма изгиба

Условное нормальное напряжение в крайнем растянутом волокне

$$\sigma = M/W,$$

где M – изгибающий момент;

W – момент сопротивления сечения.

В случае нагружения сосредоточенной силой (рис. 5.4, а) $M = P l/4$. Для прямоугольного образца $W = b h^2/6$, а для цилиндрического $W = \pi d_0^3/32$.

Следовательно, рабочей формулой для расчета упругих напряжений при изгибе образцов прямоугольного сечения является:

$$\sigma = \frac{3Pl}{2bh^2},$$

а для цилиндрических образцов

$$\sigma = \frac{8Pl}{\pi d_0^3}$$

По указанным формулам часто рассчитывают все прочностные характеристики при изгибе. Но достаточно точные результаты получаются только при определении пределов пропорциональности и упругости.

Из-за неравномерности распределения напряжений по сечению изгибаемого образца определяют два предела текучести – номинальный и реальный. Номинальный предел текучести при изгибе рассчитывают по указанным формулам, предполагая, что напряжения линейно возрастают от оси образца до его поверхности, где и достигается заданный допуск на удлинение. Реальный предел текучести определяют с учетом действительного распределения напряжений по сечению как истинное напряжение, при котором в поверхностных волокнах возникает остаточная деформация заданной величины.

На практике чаще находят номинальный предел текучести, используемый в инженерных расчетах. Для большинства металлических материалов он на ~ 20 % выше условного предела текучести при одноосном растяжении.

Предел прочности при изгибе можно рассчитать по указанным формулам только в случае хрупкого разрушения. При значительных пластических деформациях эти формулы неприменимы.

Графические методы определения прочностных свойств по первичной диаграмме изгиба (рис. 5.5) аналогичны применяемым при растяжении. Допуски на величину деформации при определении $\sigma_{нц}^{изг}$, $\sigma_{0,05}^{изг}$ и $\sigma_{0,2}^{изг}$ задаются по величине стрелы прогиба, которая связана с относительным удлинением крайнего растянутого волокна в изогнутом образце. Для прямоугольного стержня $f = \frac{l^2 \delta}{6h}$. Отсюда при определении пределов текучести допуск на остаточный прогиб $f_{0,2}$, соответствующий удлинению крайнего волокна на 0,2 %, будет $f_{0,2} = \frac{0,002l^2 \delta}{bh}$.

Если номинальный предел текучести рассчитывается по усилию P_T на первичной диаграмме изгиба (рис. 5.5), то для определения реального предела текучести рекомендуется проводить испытание на чистый изгиб прямоугольного образца и строить диаграмму наибольшее нормальное напряжение S_{max} – максимальный сдвиг g_{max} путем последовательного пересчета из диаграмм $P - f$ и $M_{изг} - \delta$:

$$M_{изг} = \frac{Pl}{2}, \quad \delta = \frac{4hf}{l^2}.$$

При этом:

$$S_{max} = \frac{2(2M_{изг} + \theta dM_{изг})/d\theta}{bh^2},$$

где θ – угол наклона касательной к упругой линии изогнутого образца, $\theta = \frac{l\delta}{h}$;

$\frac{dM}{d\theta}$ – касательная к кривой $M_{изг} = f(\theta)$.

Реальный предел текучести $S_{0,2}$ находят графически по диаграмме $S_{max} - g_{max}$ при допуске, соответствующем $\delta = 0,2 \%$. Величина $S_{0,2}$ при изгибе близка к $\sigma_{0,2}$ при растяжении.

При испытаниях на изгиб, как и в случае сжатия, достаточно пластичные материалы не разрушаются. Образец при этом загибается вплоть до параллельности его частей, расположенных по обе стороны от ножа (рис. 5.6, в). Материалы, которые разрушаются при изгибе, могут предварительно деформироваться на разную величину. Разрушение может произойти в любой точке диаграммы изгиба (рис. 5.4). У пластически деформирующихся образцов точка максимума b на диаграмме часто совпадает с появлением первой трещины. Иногда образование трещин сопровождается резкими спадами нагрузки на правой ветви диаграммы (штрихпунктир на рис. 5.4).

В качестве характеристики пластичности при изгибе, помимо f , часто используют угол загиба β , являющийся дополнительным до 180° к углу изгиба a (рис. 5.6). Угол β возрастает по мере повышения деформационной способности материала, а угол a уменьшается.

Простота испытания на изгиб и наглядность получаемых при этом характеристик пластичности привели к разработке ряда технологических проб, которые применяются в заводских условиях. Задача всех этих проб – оценить пластичность деформированных полуфабрикатов, отливок и изделий (листов, труб, проволоки и др.). ГОСТ 14019-80 «Методы испытаний на изгиб» предусматривает изгиб сосредоточенной силой плоских образцов из проката, поковок и отливок, помещаемых на две опоры (рис. 5.6, а). Критерием годности продукции может быть:

- а) заданный угол загиба образцов β (рис. 5.6, б);
- б) появление первой трещины после загиба на угол β , равный или больший заданного;
- в) возможность загиба пластины до параллельности (рис. 5.6, в) или соприкосновения сторон (рис. 5.6, г).

Существуют также пробы на перегиб листа, ленты (ГОСТ 13813-68) и проволоки (ГОСТ 1579-80), в которых фиксируют заданное число перегибов либо количество перегибов, после которых появились трещины или образец разрушился.

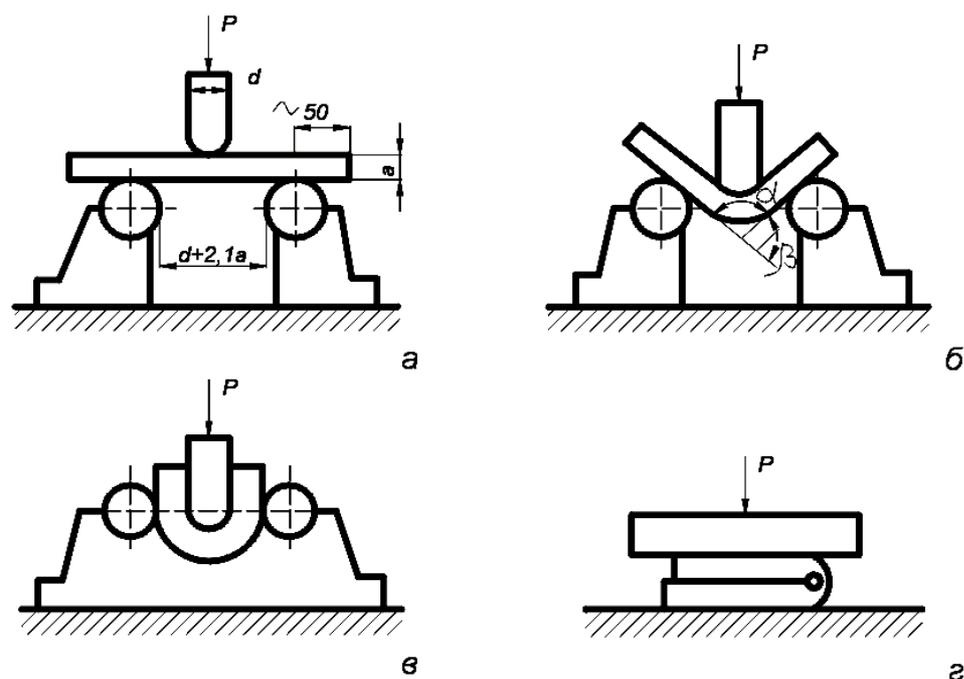


Рис. 5.6. – Технологическая проба на изгиб:
a – образец перед испытанием; *б* – загиб до определенного угла;
в – загиб до параллельности сторон; *г* – загиб до соприкосновения сторон

5.3. Испытания на кручение

Кручение осуществляется двумя разными по величине и противоположно направленными крутящими моментами, которые прикладываются к концам образца в плоскостях, нормальных его продольной оси. В рабочей части образца возникает разноименное плоское напряженное состояние с коэффициентом мягкости $a \approx 0,8$, т. е. большим, чем при растяжении. В то же время в отличие от сжатия и изгиба при испытании на кручение до разрушения можно довести любой материал.

Максимальные касательные напряжения при кручении действуют в плоскостях, перпендикулярных оси образца, наибольшие же нормальные напряжения – под углом 45° . причем $S_{max} = t_{max}$. После разрушения срезом и отрывом получают характерные формы излома (рис. 5.7), по которым можно однозначно определить тип разрушения. В отличие от других статических испытаний геометрия излома реальных образцов здесь строго соответствует определенным схемам. Это объясняется тождеством напряженного состояния по всей длине скручиваемого образца от начала испытания до момента разрушения (при однократном скручивании). Другим важным следствием неизменности напряженного состояния является постоянство рабочей длины и поперечного сечения образца во время испытания. Описанные особенности испытаний на кручение определяют их важность и распространенность на практике. Особенно часто эти испытания используют для оценки свойств материалов валов и

проволоки. Методика испытаний образцов из любых материалов диаметром не менее 5 мм стандартизована (ГОСТ 3565-80). Образцы должны иметь цилиндрическую рабочую часть и квадратные головки (рис. 5.7, 5.8). Образец с диаметром рабочей части 10 мм и расчетной длиной 100 мм или 50 мм принят за нормальный. Допускается использование образцов пропорциональных, геометрически подобных нормальному, а также трубчатых.

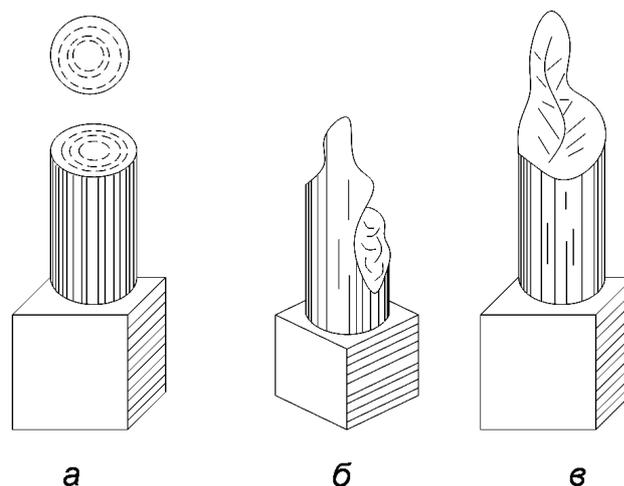


Рис. 5.7. – Вид образцов, разрушенных при кручении путем среза (*а*) и отрыва (*б*)

Испытания на кручение проводят на специальных машинах, которые должны обеспечивать надежную центровку образца, плавность нагружения и отсутствие изгибающих усилий, возможность достаточно точного задания и измерения величины крутящего момента. Используются машины с горизонтальным и вертикальным расположением образца. Максимальный крутящий момент меняется от 60 Н·м до 2 МН·м. Основные узлы этих машин – станина, привод, от которого вращается активный захват, силоизмеритель с несколькими шкалами нагрузок, диаграммный механизм, счетчик оборотов и угломер для определения угла закручивания образца.

На рис. 5.8 дана принципиальная схема горизонтальной испытательной машины с маятниковым силоизмерителем. Образец 13 крепится в захватах 4 и 5. Левый захват 5 не связан с приводом и может перемещаться в горизонтальном направлении по направляющим 7 и 8. Правый захват устанавливается в неподвижном подшипнике 14 и получает вращение от червячного колеса 2, приводимого в движение электродвигателем через редуктор и вал 1 (возможно вращение и вручную). Число оборотов и угол закручивания активного захвата 4 можно определить по неподвижной круговой шкале с помощью указателя 3, который вращается вместе с захватом. Второй захват 5 жестко связан с тяжелым маятником 11. Меняя груз или переставляя штангу 12 в вертикальном направлении относительно захвата, можно менять масштаб шкалы силоизмерителя. Вращение захвата 5 вместе с маятником 11 создаст крутящий момент, направленный противоположно этому вращению и равный моменту кручения, переданному на

образец активным захватом 4. Отклонение маятника 11 от вертикального положения приводит к перемещению конца б штанги 12, затем стержня 9 и стрелки 10 силоизмерителя. Перемещение стрелки прямо пропорционально моменту кручения $M_{кр}$, который служит мерой сопротивления образца деформации, заменяя при кручениях усилие P , измерявшееся в других статических испытаниях.

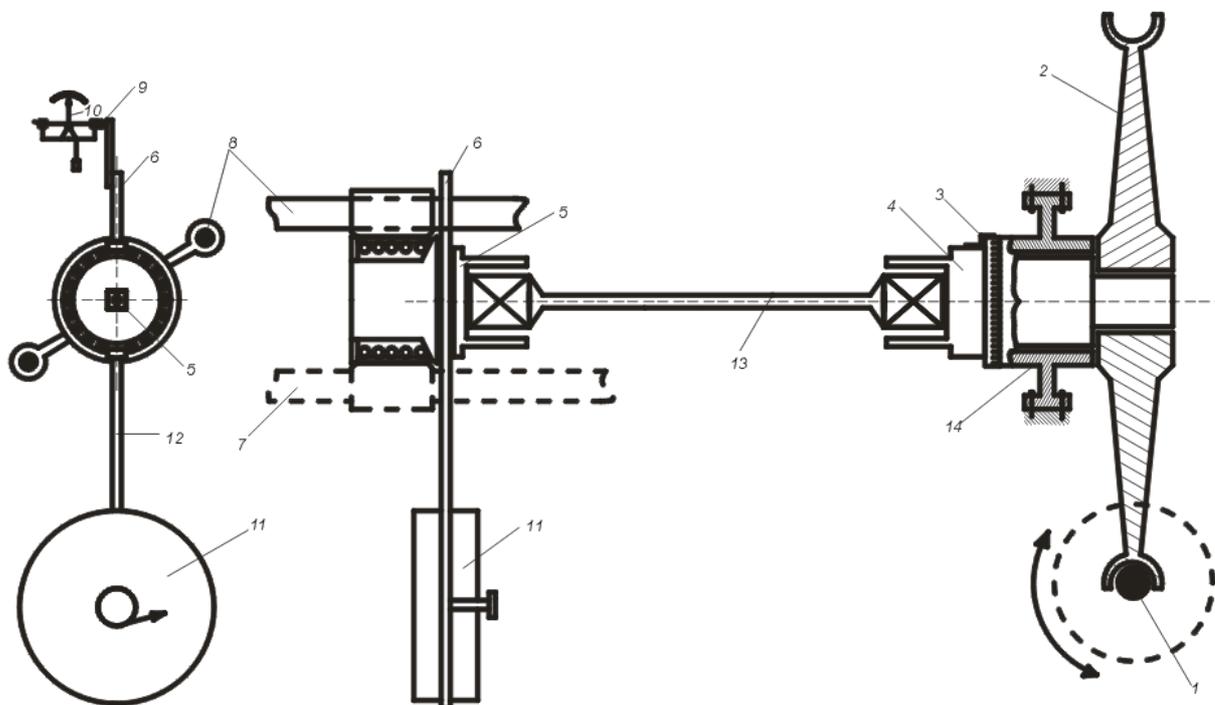


Рис. 5.8. – Принципиальная схема горизонтальной испытательной машины

В качестве меры деформации в процессе испытания фиксируется угол закручивания φ . Для точного измерения этого угла, особенно в области малых деформаций, рекомендуется использовать зеркальный прибор Мартенса или другой тензомер с большой точностью. Схема измерения показана на рис. 5.9. Два зеркала 1, крепятся на границах расчетной длины образца 4. Напротив каждого из зеркал устанавливаются шкалы 3 и зрительные трубы 2, с помощью которых фиксируют отраженные в зеркалах показания шкалы. Во время испытания каждый захват машины поворачивается на определенный угол (большой у активного захвата). Угол закручивания образца равен разности этих углов. Однако он включает паразитные деформации зажимов и головок образца. Для их исключения угол закручивания определяют на расчетной длине l_0 , помещая зеркала на некотором расстоянии от головок: $\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$. В области малых углов (рис. 5.9) $\text{tg}2\varphi_1 \approx 2\varphi_1 = (a_1 - a_0)/L$ и $\text{tg}2\varphi_2 \approx 2\varphi_2 = (b_1 - b_0)/L$, где a_0 и b_0 – начальные отсчеты; a_1 и b_1 – отсчеты по шкалам после закручивания. Отсюда угол закручивания:

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = [(a_1 - b_1) - (a_0 - b_0)]/2L = \Delta/2L.$$

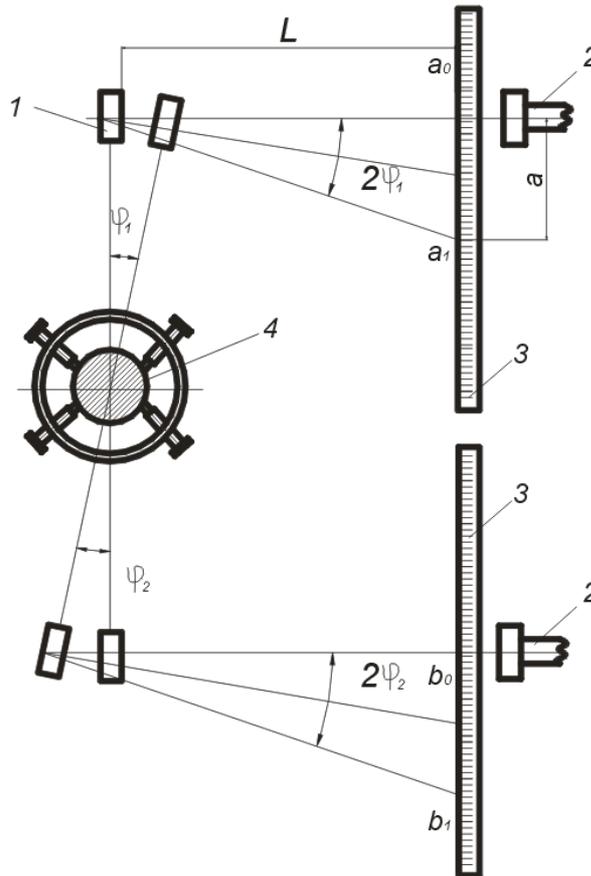


Рис. 5.9. – Схема измерения угла закручивания зеркальным прибором Мартенса

Зная текущие значения крутящего момента и угла закручивания, можно построить диаграмму кручения в координатах $M_{кр} - \varphi$ (рис. 5.10). Эта диаграмма состоит из участка упругой (Op) и пластической деформации pk . Из-за отсутствия значительного местного сужения ниспадающего участка на диаграмме кручения не бывает, хотя после образования первых трещин деформация становится неравномерной, сосредоточиваясь вблизи излома.

По аналогии с другими статическими испытаниями при кручении определяют условные пределы пропорциональности, упругости, текучести и прочности, а также истинный предел прочности. Но все эти свойства выражают не через нормальные, а через касательные напряжения. В области упругой деформации кручением цилиндрического образца:

$$\tau_{\max} = \frac{M_{кр}}{W} = \frac{M_{кр} d}{2J_p} = \frac{16M_{кр}}{\pi d^3}.$$

где d – диаметр рабочей части образца;

W – момент сопротивления;

J_p – полярный момент инерции сечения для круглого образца, $J_p = \frac{\pi d^4}{32}$.

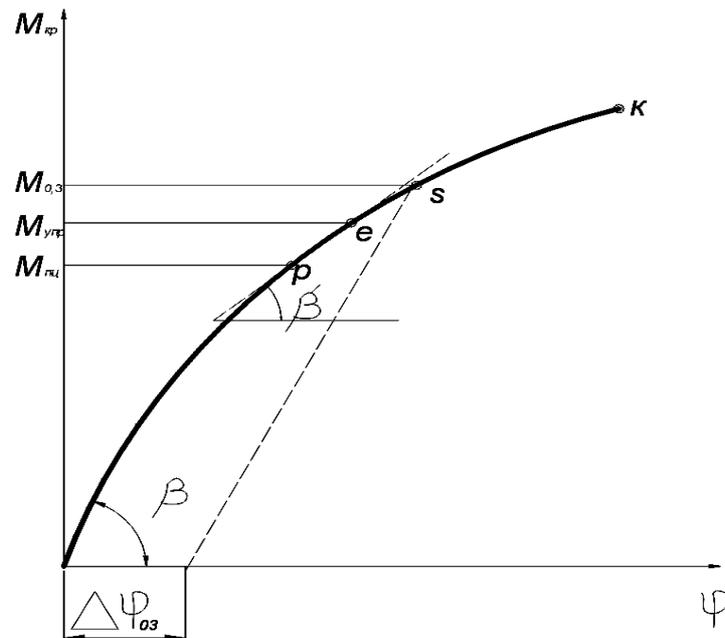


Рис. 5.10. – Диаграмма кручения

Формула дает хорошие результаты и в области малых пластических деформаций, но после значительного пластического течения она уже непригодна. По ней рассчитывают все перечисленные выше прочностные свойства при кручении, кроме истинного предела прочности. Последний определяют по формуле, учитывающей поправку на пластическую деформацию:

$$\tau_k = \frac{M_{кр}}{W} = \frac{M_{кр} d}{2J_p} = \frac{4}{\pi d^3} \left(3M_{кр} + \theta \frac{dM_{кр}}{d\theta} \right),$$

где $M_{кр}$ – наибольший крутящий момент, предшествующий разрушению образца;

θ – удельный угол закручивания перед разрушением (в радианах на 1 мм):

$$\theta = (\varphi_1 - \varphi_2).$$

Предел пропорциональности при кручении $\tau_{пл}$ – это условное касательное напряжение, при котором отступление от линейной зависимости между напряжениями и деформациями достигает такой величины, когда тангенс угла (рис. 5.10, β'), образуемого касательной к диаграмме кручения и осью деформаций, превышает первоначальное значение ($tg \beta$) на 50 %.

Методика определения $\tau_{пл}$ аналогична описанной на примере предела пропорциональности при растяжении. Вначале образец нагружают крутящим моментом, соответствующим касательному напряжению 30 МПа для стали и ≤ 10 % от ожидаемого предела пропорциональности для других материалов. Затем на образец устанавливают тензометр и фиксируют его начальные показания. Дальнейшее нагружение производят ступенями, сначала большими, потом малыми,

и после каждой ступени измеряют величину Δ . Испытание заканчивают после того, как величина Δ_i после очередной малой ступени превысит в 2 – 3 раза величину Δ_{i-n} , полученную от первой малой ступени. После этого рассчитывают среднее значение величин Δ на участке нагружения малыми ступенями и найденное значение увеличивают на 50 %. Крутящий момент, соответствующий этому полуторному углу закручивания, и есть $M_{кр.нпр}$, по которому определяют предел пропорциональности.

Предел упругости при кручении $\tau_{упр}$ – условное касательное напряжение, при котором образец подвергается остаточной сдвиговой деформации на заданную величину. Допуск на остаточную деформацию задается по величине относительного сдвига:

$$g = (\varphi_1 - \varphi_2) \frac{d}{2l_0} 100\% .$$

который должен быть равен 0,0045 %; 0,0075 % или 0,016 %.

Методика определения предела упругости аналогична рассмотренной для $\tau_{нц}$. За предел упругости $\tau_{упр}$ принимают напряжение, при котором относительный сдвиг становится равным сумме сдвига в момент достижения $\tau_{нц}$ и заданного допуска.

На стадии упругой деформации по результатам испытания на кручение может быть определен модуль сдвига:

$$G = \frac{M_{кр} l}{(\varphi_1 - \varphi_2) J_p} .$$

Определяемый при кручении предел текучести обычно условный. Это касательное напряжение, вычисляемое по формуле $\tau_{max} = \frac{16M_{кр}}{\pi d^3}$, которому соответствует остаточный относительный сдвиг на 0,3 % ($\tau_{0,3}$), что эквивалентно удлинению $e = 0,2$ %; Методика определения предела текучести при помощи тензометра аналогична рассмотренной для $\tau_{упр}$.

Условный предел прочности при кручении $\tau_{нц}$ соответствует моменту кручения перед разрушением, его рассчитывают без учета пластической деформации по формуле $\tau_{max} = \frac{16M_{кр}}{\pi d^3}$.

Условные пределы пропорциональности, упругости, текучести и прочности при кручении имеют физический и технический смысл, аналогичный соответствующим прочностным свойствам при других статических испытаниях для материалов, разрушающихся после сжатия и изгиба и дающих первичную диаграмму растяжения без максимума. Для материалов, в которых при растяжении образуется шейка, величины $\tau_{нц}$ и особенно t_K являются более строгими

характеристиками предельной прочности в условиях кручения, чем при растяжении.

Разновидностью испытаний на кручение является проба на скручивание проволоки диаметром d менее 10 мм (ГОСТ 1545-80). Образец длиной $100d$ зажимается в твердых губках захватов и скручивается при вращении одного из них с постоянной скоростью (30 – 90 об/мин). В результате испытания определяют число оборотов активного захвата до момента разрушения проволоки. Это число и считают критерием ее качества (пластичности).

5.4. Контрольные вопросы

1. Как определяют относительное укорочение и относительное уширение образцов при сжатии?
2. Какова схема испытания на сжатие и геометрия используемых образцов?
3. Как уменьшают силы трения на опорных поверхностях образца при сжатии?
4. Поясните диаграмму сжатия материалов, разрушающихся и не разрушающихся при испытании?
5. Какова диаграмма истинных и условных напряжений при сжатии?
6. Поясните схемы испытаний образцов на изгиб.
7. Поясните диаграмму изгиба материалов.
8. Поясните технологические пробы на изгиб в заводских условиях.
9. Как работает горизонтальная испытательная машина с маятниковым силоизмерителем?
10. Как работает зеркальный прибор Мартенса?
11. Поясните диаграмму кручения?

Тема №6 ИСПЫТАНИЕ МАТЕРИАЛОВ НА УСТАЛОСТЬ

Цель работы: Ознакомиться с понятиями усталости и выносливости. Познакомиться с методикой проведения усталостных испытаний материалов. Изучить конструкции испытательных машин на усталость.

6.1. Понятие усталости и выносливости

Под действием циклических напряжений в металлах и сплавах зарождаются и постепенно развиваются трещины, вызывающие в конечном итоге полное разрушение детали или образца. Это разрушение особенно опасно потому, что может протекать под действием напряжений, намного меньших пределов прочности и текучести. Подсчитано, что более 80 % всех случаев эксплуатационного разрушения происходит в результате циклического нагружения.

Процесс постепенного накопления повреждений в материале под действием циклических нагрузок, приводящий к изменению его свойств, образованию трещин и разрушению, называют *усталостью*, а свойство противостоять усталости – *выносливостью*.

Усталостная трещина зарождается в поверхностных слоях и затем развивается вглубь образца или детали, образуя острый надрез. Распространение усталостной трещины обычно длительно. Оно продолжается до тех пор, пока сечение не окажется столь малым, что действующие в нем напряжения превысят разрушающие. Тогда произойдет быстрое разрушение, как правило, хрупкое, из-за наличия острого надреза.

Задача усталостных испытаний – дать количественную оценку способности материала работать в условиях циклического нагружения без разрушения.

6.2. Методика проведения усталостных испытаний

Современные методы испытаний на усталость (выносливость) разнообразны. Они отличаются характером изменения напряжений во времени, схемой нагружения (изгиб, растяжение – сжатие, кручение), наличием или отсутствием концентраторов напряжений. Как и другие виды, усталостные испытания проводятся при различных температурах и в разных средах. Основные требования и методика усталостных испытаний обобщены в ГОСТ 25.502 - 79.

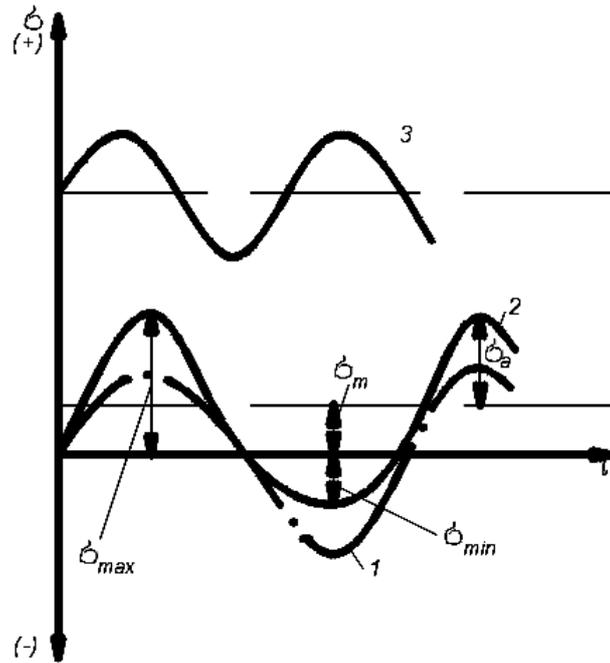


Рис. 6.1. – Разновидности циклов напряжений

Во время любого усталостного испытания на образец действуют циклические напряжения, непрерывно изменяющиеся по величине и часто по знаку. Типичные примеры используемых циклов напряжений показаны на рис. 6.1. *Цикл напряжений* – это совокупность переменных значений напряжений за один период их изменения. Каждый цикл характеризуется несколькими параметрами. За максимальное напряжение цикла σ_{max} принимают наибольшее по алгебраической величине напряжение. Минимальное напряжение цикла – σ_{min} – наименьшее по алгебраической величине напряжение.

Среднее напряжение цикла

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}.$$

Амплитуда напряжений цикла

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}.$$

Сложение и вычитание максимальных и минимальных напряжений производят с учетом их знака. Из рис. 6.1 ясно, что $\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a$. Цикл характеризуется также коэффициентом асимметрии:

$$R_\sigma = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}.$$

Если $R_\sigma = -1$, то такой цикл называют симметричным (рис. 6.1, кривая 1). Если же минимальное и максимальное напряжения цикла не равны по величине, то он называется асимметричным (рис. 6.1, кривые 2 и 3). Когда напряжения меняются по величине и знаку, цикл считается знакопеременным (рис. 6.1, кривые 1 и 2), если только по величине – знакопостоянным (рис. 6.1, кривая 3). Для испытаний чаще всего используют симметричные знакопеременные циклы с $R_\sigma = -1$.

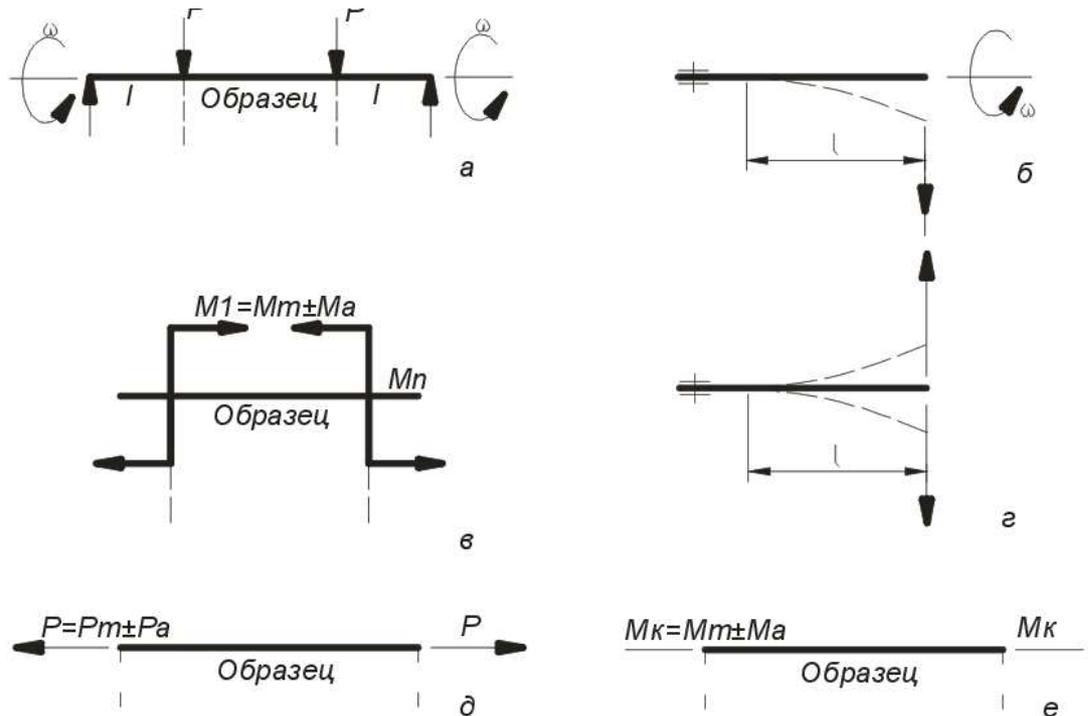


Рис. 6.2. – Схемы нагружения образцов при усталостных испытаниях (ГОСТ 20.502-79):

- a* – чистый изгиб при вращении; *б* – поперечный изгиб при вращении;
- в* – чистый изгиб в одной плоскости; *г* – поперечный изгиб в одной плоскости;
- д* – повторно-переменное растяжение – сжатие;
- е* – повторно-переменное кручение

Наиболее распространенная схема нагружения при усталостных испытаниях – изгиб (рис. 6.2). Эта схема реализуется по-разному. Особенно проста и чаще всего применяется схема чистого изгиба образца при вращении (рис. 6.2, *a*). Нагрузка здесь прилагается в двух точках, что обеспечивает постоянство изгибающего момента на всей рабочей длине образца.

На рис. 6.3 показана схема одной из машин подобного типа. Образец 8 вращается электродвигателем 1 через двухступенчатый шкив 2 и шкив 3 программного устройства. Нагрузка на образец подается рычагом 11 с перемещающимся грузом 10 и съёмными грузами 14. Рычажная система с грузами подвешена к образцу на тягах 12. Грузовой рычаг устанавливается в рабочее

положение маховиком 13. Биение (деформация) образца фиксируется на индикаторах 9. Количество циклов нагружения регистрирует счетчик 4, который соединен со шпинделем 7 через редуктор 5 и гибкий валик 6. Программное устройство позволяет изменять нагрузку в процессе испытания по заданной программе.

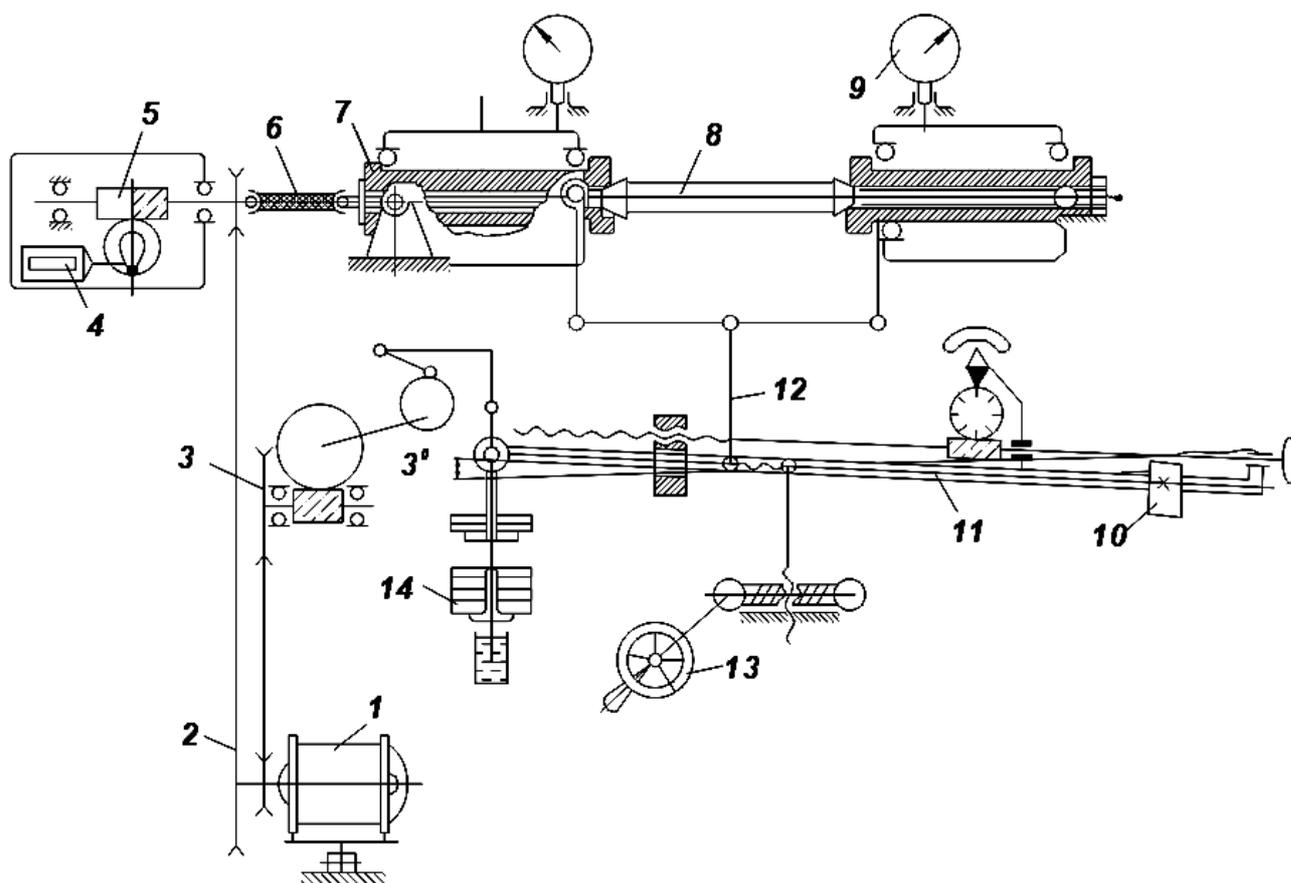


Рис. 6.3. – Схема машины МВП-10000 для усталостных испытаний по схеме чистого изгиба

Помимо схемы чистого изгиба, часто применяют круговой изгиб консольно закрепленного образца (рис. 6.2, б). Его головка крепится в патроне, а на другой конец действует изгибающий момент. Максимального значения изгибающий момент достигает только в одном сечении – вблизи основания консоли, что является недостатком данной схемы нагружения.

В испытательных машинах, где осуществляется схема консольного изгиба, образец может вращаться или оставаться неподвижным. В первом случае прикладывается изгибающий момент одного направления, а во втором точка приложения этого момента «вращается» относительно неподвижного образца.

Для испытаний в условиях циклического растяжения – сжатия (рис. 6.2, д) используют гидропульсационные и резонансные машины. Первые представляют собой универсальные машины с гидравлическим приводом для статических

испытаний, снабженные гидропульсатором. Это однопоршневой масляный насос, который присоединяется к рабочему цилиндру машины. Ход поршня насоса устанавливают в соответствии с заданной амплитудой напряжений цикла.

Резонансные машины для усталостных испытаний осуществляют циклическое растяжение – сжатие с помощью независимой от образца вибрирующей системы. Она состоит из плоской или цилиндрической рессоры и массы силового возбуждения.

Некоторые из стандартных образцов, рекомендуемых для усталостных испытаний, показаны на рис. 6.4. Их рабочая часть имеет круглое или прямоугольное сечение. Диаметр цилиндрической части гладких образцов d обычно составляет 5 – 10 мм, а у образцов с надрезом $D = 10 – 20$ мм при глубине надреза $t = 0,25 D$. Ширина рабочей части плоских образцов $b = 10 – 20$ мм и толщина $h = 5 – 10$ мм.

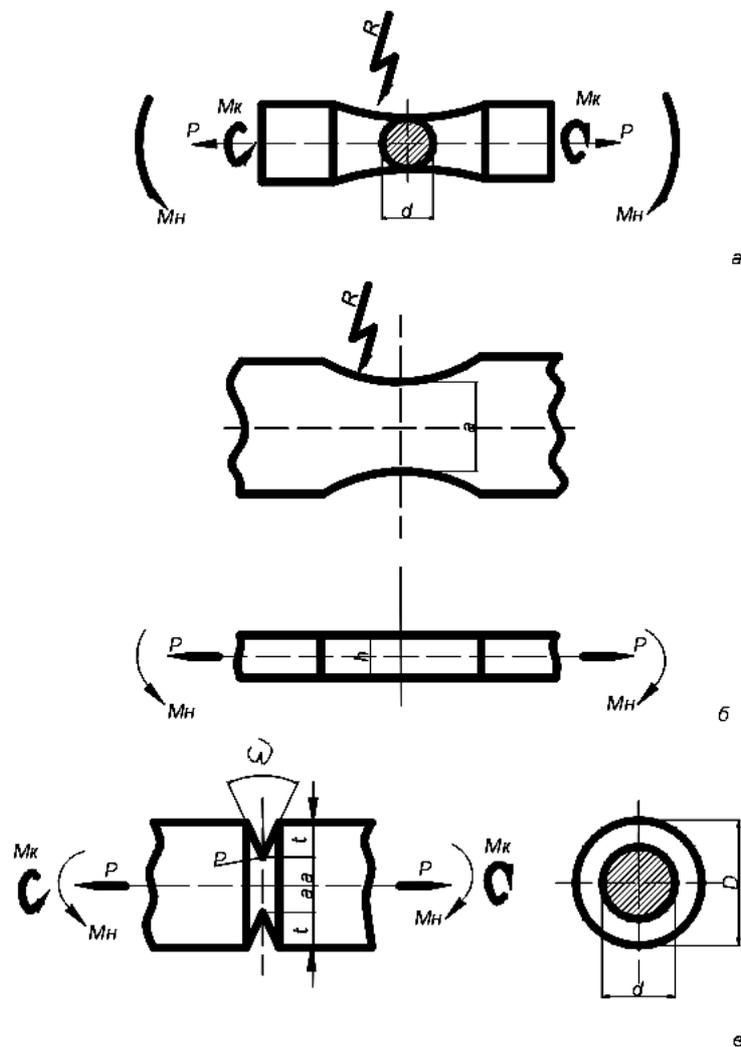


Рис. 6.4. – Форма и основные размеры рабочей части стандартных образцов для испытаний на усталость

Характеристики выносливости сильно зависят от размеров образца, часто они значительно выше у образцов с меньшим сечением. Поэтому для получения сравнимых данных следует проводить испытания на одинаковых образцах.

Результаты усталостных испытаний очень чувствительны к качеству и состоянию поверхностного слоя образца. Следовательно, для получения воспроизводимых результатов здесь особенно необходимо соблюдение идентичности методики изготовления образцов. Качество их поверхности по ГОСТу должно соответствовать 9 – 10 – му классу чистоты.

Первичным результатом усталостного испытания одного образца является число циклов до разрушения (долговечность) при заданных характеристиках цикла. По результатам испытаний серии образцов могут быть определены различные характеристики выносливости. Главной из них является *предел выносливости* σ_R – наибольшее значение максимального напряжения цикла, при действии которого не происходит усталостного разрушения образца после произвольно большого или заданного числа циклов нагружения. Если испытания ведут при постоянном среднем напряжении цикла, σ_R определяется как наибольшее значение средней амплитуды напряжений цикла, при которых не происходит усталостного разрушения после неограниченного или заданного количества циклов.

Для того, чтобы оценить предел выносливости, необходимо испытывать целую серию образцов, как правило, не меньше 15. Каждый образец испытывают при определенном значении максимального напряжения цикла (или его амплитуды). При этом циклы для всех образцов одной серии должны быть подобны, т. е. иметь одинаковую форму и отношение различных характеристик цикла:

$$\frac{\sigma'_{\max}}{\sigma''_{\max}} = \frac{\sigma'_m}{\sigma''_m} = \frac{\sigma'_a}{\sigma''_a}.$$

По результатам испытания отдельных образцов строят кривую усталости в координатах максимальное напряжение цикла σ_{max} (или σ_a) – долговечность N (рис. 6.5).

Максимальное напряжение для первого образца обычно задают на уровне $^{2/3} \sigma_e$. Нижний предел используемых напряжений составляет 0,3 – 0,5 σ_e . Из-за относительно большого разброса экспериментальных точек строить эти кривые рекомендуется методом наименьших квадратов. Наиболее наглядны кривые усталости в логарифмических или полулогарифмических координатах (рис. 6.5, б).

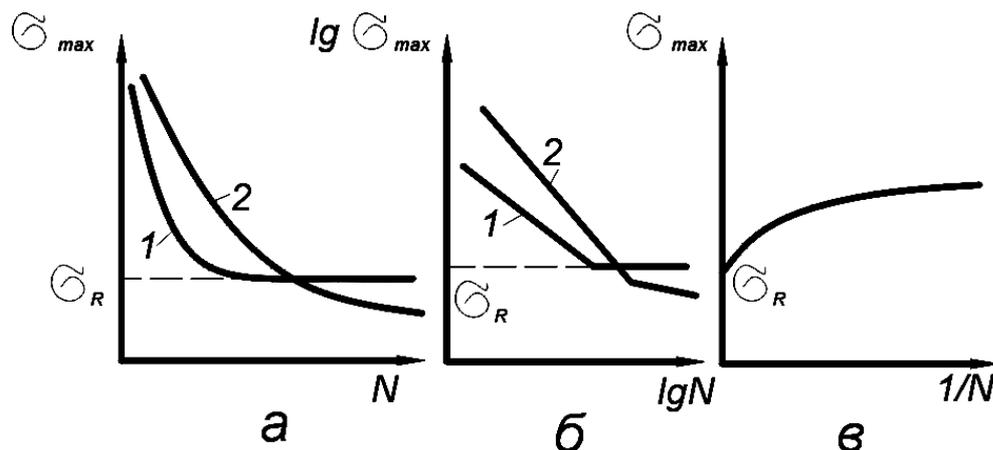


Рис. 6.5. – Кривые усталости в различных координатах

По мере уменьшения максимального напряжения цикла долговечность всех материалов возрастает. При этом у сталей и некоторых цветных сплавов, склонных к динамическому деформационному старению, кривая усталости асимптотически приближается к прямой, параллельной оси абсцисс (рис. 6.5, а, кривая 1). Ордината, соответствующая постоянному значению σ_{max} , и есть предел выносливости таких материалов σ_R – наибольшее напряжение, которое не вызывает разрушения при любом числе циклов N (так называемый физический предел выносливости). Наиболее просто определяется σ_R при использовании логарифмического масштаба (рис. 6.5, б). Удобно оценивать σ_R и по кривым в координатах $\sigma_{max} - 1/N$ (рис. 6.5, в). Здесь предел выносливости определяют, экстраполируя кривую в точку ее пересечения с осью ординат, где $1/N = 0$. Этот способ особенно целесообразен для приближенной оценки σ_R по результатам испытания небольшого числа образцов.

Для оценки среднего значения предела выносливости и его среднего квадратичного отклонения строят кривые распределения предела выносливости. Для этого партию испытываемых образцов делят на шесть – семь групп. По результатам испытаний 8 – 15 образцов первой группы по обычной методике строят кривую усталости и оценивают σ_R при вероятности разрушения $P = 0,5$. Образцы других групп испытывают с использованием разных уровней напряжений (обычно шести). Максимальный уровень, при котором все образцы должны разрушаться до базового числа циклов, принимают равным $1,3 - 1,5$ от σ_R для $P = 0,5$, а остальное подбирают таким образом, чтобы до достижения базы испытания разрушилось примерно 90, 70 – 80, 50, 20 – 30 и 10% образцов.

По результатам этих испытаний для каждого образца определяют *усталостную долговечность* – число циклов нагружения, которое выдерживает материал перед разрушением при определенном напряжении. Усталостная долговечность – вторая по важности после σ_R характеристик выносливости металлических материалов.

Данные испытаний образцов при каждом уровне напряжений подвергают первичной статистической обработке последовательно определяя i , P , N_i и $\lg N_i$; i – порядковый номер данного образца в возрастающем ряду долговечности образцов этой группы (от 1 до n – общего числа образцов в группе); P – накопленная частота, соответствующая вероятности разрушения $P = (i - 0,5) / n$; N_i – долговечность i – того образца.

По полученным данным строят графики функции распределения вероятности разрушения образцов. Для этого рекомендуется использовать специальную «вероятностную бумагу». На ней по оси абсцисс отложены десятичные логарифмы числа циклов, а по оси ординат – накопленные частоты в предположении, что ряд значений долговечности подчиняется закону нормального распределения. Масштаб вероятностной бумаги подбирают таким образом, что если этот закон действительно соблюдается, то зависимость $P - \lg N$ (функция распределения) будет прямой. На рис. 6.6, III показано несколько таких зависимостей для разных уровней напряжений.

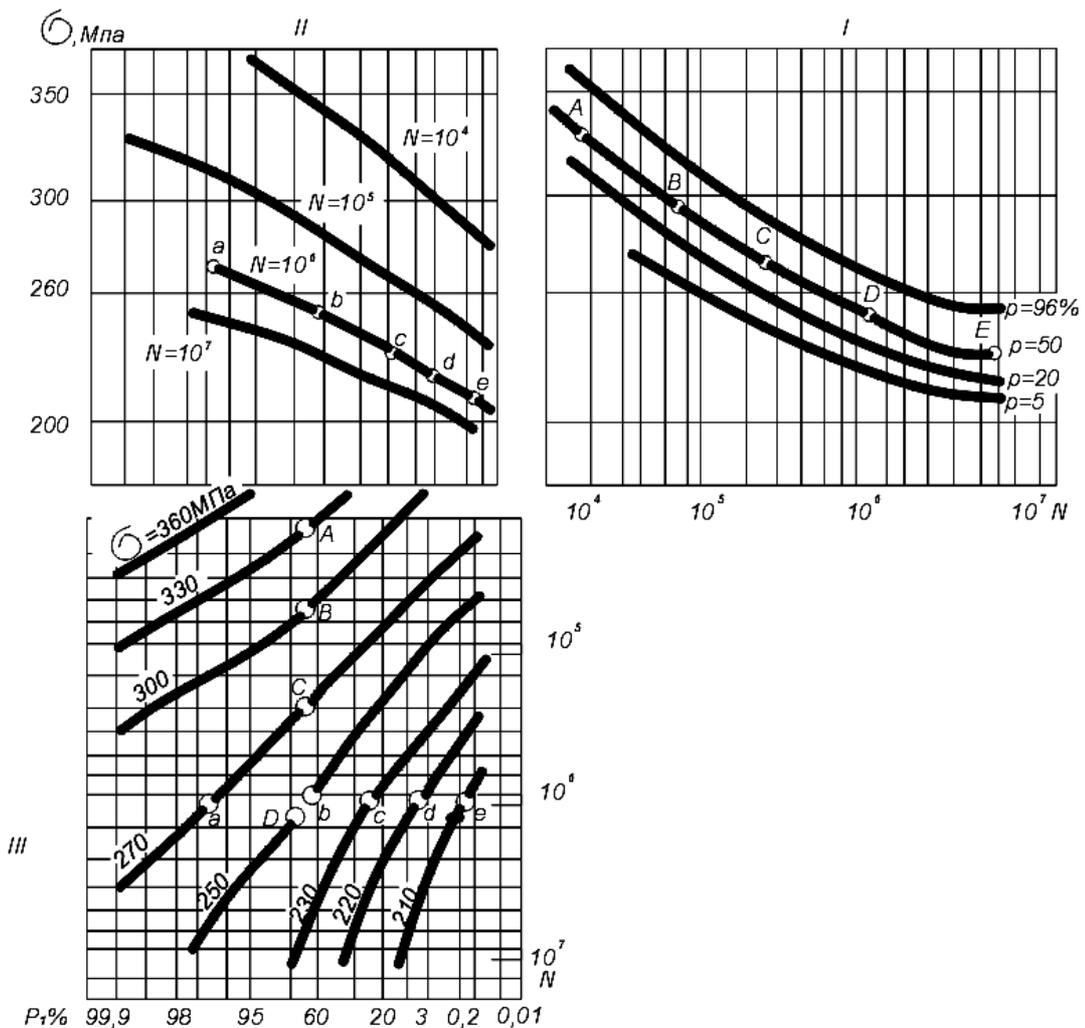


Рис. 6.6. – Пример вероятностной диаграммы усталости

Для определенной вероятности разрушения находят напряжения и отвечающие им долговечности (при $P = 50\%$ точки $A - D$ на рис. 6.6, III), по которым строят обычные кривые усталости ($ABCDE$ на рис. 6.6, I). Каждой вероятности разрушения соответствует своя кривая усталости. Теперь, задаваясь долговечностью (например, 10^6), получают по графикам $P - \lg N$ необходимые данные (точки $a - e$) для построения графических зависимостей вероятности разрушения от уровня напряжений ($abcde$ на рис. 6.6, II). Эти зависимости можно трактовать и как графики функции распределения предела выносливости. Тогда, разделив диапазон предела выносливости на 8 – 12 (n) интервалов, рассчитывают среднее значение предела выносливости ($\bar{\sigma}_R$) и его среднее квадратичное отклонение:

$$\bar{\sigma}_R = \sum_1^n \Delta P_i \sigma_{R_i}, \quad s_{\sigma_R} = \sqrt{\sum_1^n \Delta P_i (\sigma_{R_i} - \bar{\sigma}_R)^2},$$

где σ_{R_i} – значение предела выносливости в середине интервала;

ΔP_i – прирост вероятности разрушения внутри одного интервала.

Кроме того, графики функции распределения предела выносливости (рис. 6.6, II) используют для определения σ_R при заданном уровне вероятности разрушения. Например, если этот уровень $P = 0,2$, то по рис. 6.6, II при базе испытания $N = 10^7$ циклов $\sigma_R \approx 200$ МПа.

Рассмотренные методики определения характеристик выносливости относятся к испытаниям на *многоцикловую* усталость, где используются большие базы испытания и значительная частота нагружения (от 10 до 300 Гц).

6.3. Испытания на малоцикловую усталость

В настоящее время широкое распространение получили испытания на *малоцикловую* усталость (статическую выносливость). Их проводят с использованием относительно высоких напряжений и малой частоты циклов напряжений, обычно не более 3 – 5 Гц, имитируя условия эксплуатации конструкций, которые подвергаются воздействию относительно редких, но значительных по величине циклических нагрузок. База испытания на малоцикловую усталость не превышает $5 \cdot 10^4$ циклов. Таким образом, малоцикловая усталость относится к левой ветви кривых усталости (рис. 6.5, а, б) до их выхода на горизонталь или появления перегиба.

Границей между мало – и многоцикловой усталостью является зона перехода от упруго-пластического к упругому деформированию в условиях циклического нагружения. Названная выше база ($5 \cdot 10^4$ циклов) является такой условной границей, характеризующей среднее число циклов нагружения для этой переходной зоны у пластичных сталей и сплавов цветных металлов. Для высокопластичных сплавов переходная зона смещается в сторону большего числа циклов, а для хрупких – в сторону меньшего.

Малоцикловые испытания чаще всего проводят по схеме растяжение – сжатие. При этом по ГОСТ 25.502-79 необходимо обеспечить непрерывное измерение и регистрацию деформирования рабочей части образца. В отличие от испытаний на многоцикловую усталость, где в основном используют цилиндрические образцы, в малоцикловых испытаниях предпочитают образцы с прямоугольным сечением, в частности пластины толщиной $h = 3 - 6$ мм, шириной $B = 30 - 40$ мм и длиной $L > 4B$ с отверстием диаметром d ($B/d = 6$). Испытывают также и цилиндрические образцы.

Испытания на малоцикловую усталость могут проводиться на некоторых машинах, предназначенных для многоцикловых испытаний, а также универсальных машинах (например, УМЭ-10Т), используемых для статических испытаний и снабженных специальным пульсатором с механическим или гидравлическим приводом.

В условиях эксплуатации конструкции обычно должны выдерживать определенный уровень напряжений, но в ряде важных случаев процесс усталостного разрушения определяется амплитудой деформации при циклическом нагружении. Нагружение с заданной амплитудой деформации называют *жестким*, а нагружение с заданным размахом нагрузки – *мягким*.

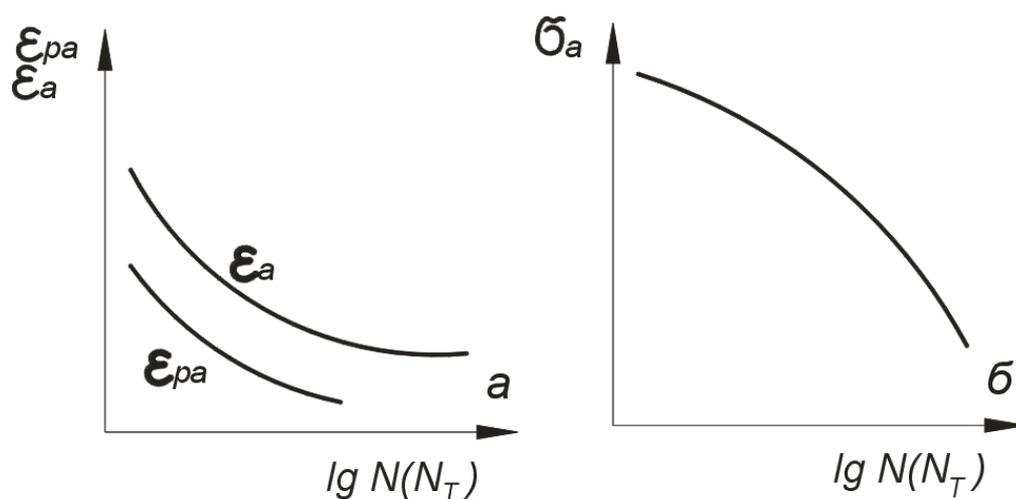


Рис. 6.7. – Кривые усталости при жестком (а) и мягком (б) нагружении

При жестком нагружении кривые малоцикловой усталости строят в двойных логарифмических координатах: а) амплитуда полной деформации ϵ_a – число циклов до образования трещины N_T или до разрушения N ; б) амплитуда пластической деформации $\epsilon_{pa} - N_T$ или N (рис 6.7, а). По результатам испытаний при мягком нагружении кривые усталости строят в координатах $\sigma_a - \lg N(N_T)$ (рис 6.7, б), или $\lg \epsilon_{pa} - \lg K$ (рис. 6.8), где K – число полуциклов нагружения. Величина ϵ_{pa} оценивается по ширине петли гистерезиса, характеризующей зависимость между напряжениями и деформациями на протяжении одного цикла нагружения. Для оценки чувствительности к поверхностным нагружениям в упруго-пластической области результаты малоцикловых испытаний часто представляют в виде кривых $\sigma_{max} / \sigma_e - N$, где σ_{max} – максимальное напряжение

цикла, вызывающее разрушение через N циклов. Критериями выносливости материала в условиях малоциклового усталости могут служить ограниченный предел выносливости, усталостная долговечность, величина отношения σ_{max} / σ_b , при котором образец разрушается после заданного числа циклов нагружения.

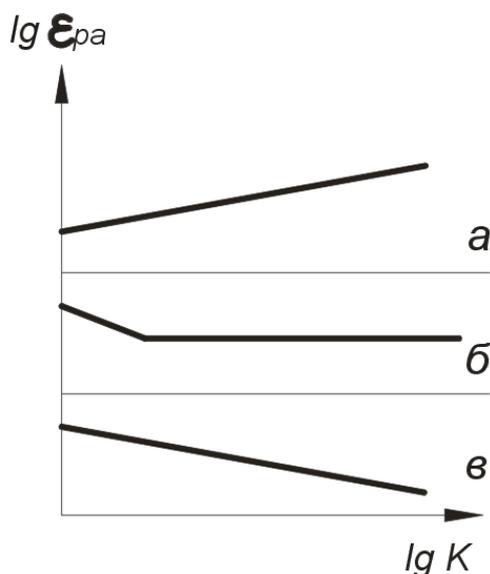


Рис. 6.8. – Возможные зависимости амплитуды пластической деформации от числа полуциклов нагружения:

- a – для циклически разупрочняющегося материала;
- b – для циклически стабилизирующегося материала;
- v – для циклически упрочняющегося материала

Характеристики выносливости в большинстве случаев снижаются при наличии концентраторов напряжений. Для количественной оценки чувствительности предела выносливости к концентраторам напряжений определяют коэффициент чувствительности q :

$$q = \frac{K_\sigma - 1}{\alpha_\sigma - 1},$$

где $K_\sigma = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1H}}$ – эффективный коэффициент концентрации напряжений;

σ_{-1H} – предел выносливости образца с концентратором (надрезом);

α_σ – теоретический коэффициент концентрации напряжений, являющийся коэффициентом пропорциональности между напряжением в вершине надреза σ_I и номинальным напряжением $\sigma_{ном}$ вдали от концентратора, $\sigma_I = \alpha_0 \sigma_{ном}$.

Коэффициент q можно оценивать по его зависимости от радиуса надреза и временного сопротивления материала. Для сталей такая зависимость показана на рис. 6.9.

Еще одной важной характеристикой сопротивления усталости является скорость роста трещины при усталости dl/dN (СРТУ), которую особенно часто определяют в условиях малоциклового нагружения.

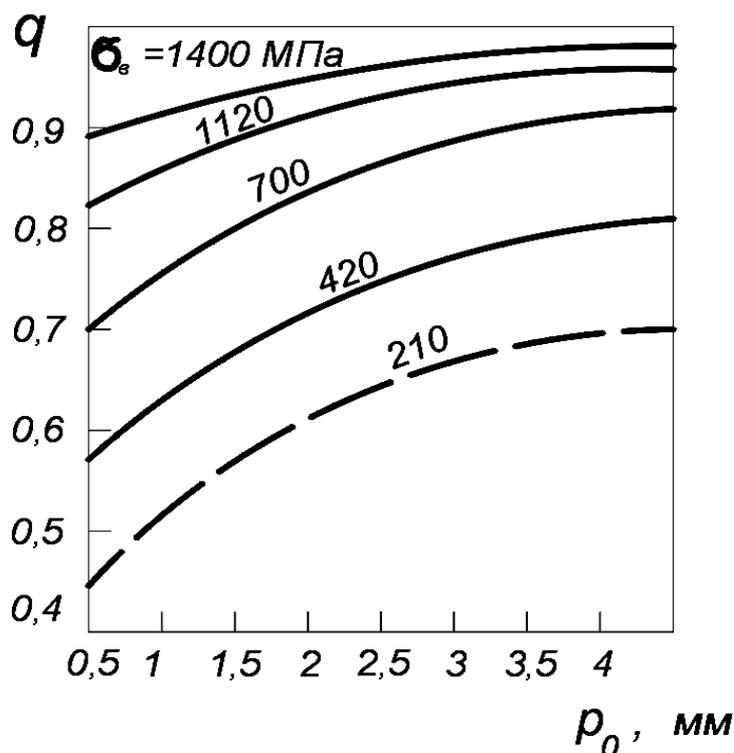


Рис. 6.9. – Зависимость коэффициента чувствительности к концентраторам напряжений q от радиуса надреза для сталей разной прочности

Для этого используют образцы обычно прямоугольного сечения с прорезью и усталостными трещинами, вводимыми перед испытанием с каждой стороны прорези. Удобно проводить испытания на больших по размеру образцах (шириной $B = 200 - 500$, длиной $L = 3B$ и длиной исходной щели $2l_0 = 0,3B - 4$ мм, при этом $2l/B \approx 0,3$, где $l = l_0 + \Delta l$, а Δl – длина предварительно выращенной усталостной трещины от 1,5 мм до 2 мм). В этом случае легко проводить замеры величины l на поверхности образца и рассчитывать dl/dN с достаточно высокой точностью.

6.4. Испытания на циклическую трещиностойкость

Все большее развитие в последние годы получают усталостные испытания, базирующиеся на концепциях механики разрушения. Эти испытания получили название испытаний на *циклическую трещиностойкость*. Их основным результатом является построение *диаграммы усталостного разрушения* – зависимости СРТУ от наибольшего значения K_{max} или размаха ΔK коэффициента интенсивности напряжений цикла (рис. 6.10).

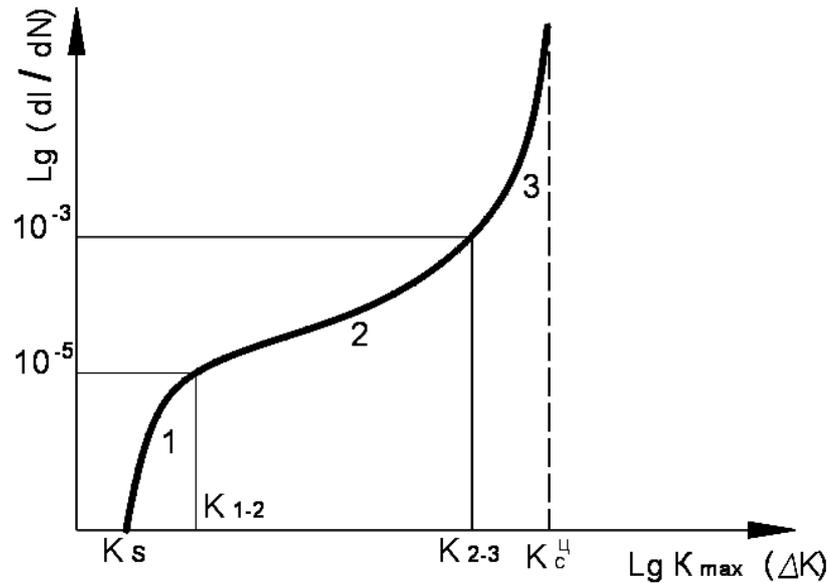


Рис. 6.10. – Диаграмма усталостного разрушения

При этом:

$$\lg K_{\max} = \lg \left[\frac{\Delta K}{1 - R_{\sigma}} \right].$$

Диаграмма усталостного разрушения состоит из трех участков. Первый, соответствующий низким скоростям роста усталостных трещин (менее 10^{-5} мм/цикл), характеризуется затуханием СРТУ с увеличением K_{\max} или ΔK . Величина K_{\max} на участке 1 близка к пороговому значению K_s , за которое принимают величину K_{\max} при которой трещина не развивается на протяжении заданного числа циклов нагружения.

Линейный участок 2 диаграммы усталостного разрушения (рис. 6.10) описывается степенной зависимостью:

$$\frac{dl}{dN} = C(\Delta K)^m \text{ или } \frac{dl}{dN} = C'(K_{\max})^{m'} \quad (6.1)$$

где для различных материалов $m = 2 - 10$, а $m' = 2 - 6$. Данная зависимость обычно реализуются в диапазоне СРТУ от $10^{-5} - 10^{-3}$ мм/цикл.

На участке 3 скорость роста трещины возрастает с увеличением K_{\max} , приближающимся к критическому коэффициенту интенсивности напряжений K_c^u или K_{lc}^u – значению K_{\max} , при котором образец разрушается. Критические коэффициенты K_c^u и K_{lc}^u называют циклической вязкостью разрушения.

S – образная диаграмма усталостного разрушения может быть описана различными уравнениями, например, по С. Я. Яреме и С. И. Микитишину:

$$\frac{dl}{dN} = C_0 \left(\frac{K_{\max} - K_s}{K_c^u - K_{\max}} \right)^q,$$

где C_0 и q – постоянные материала.

Данное выражение учитывает основные свойства диаграммы усталостного разрушения: $dl/dN = 0$, если $K_{\max} \leq K_s$; dl/dN практически неограниченно возрастает при приближении K_{\max} и K_c^u (K_{lc}^u); при средних значениях K_{\max} зависимость СРТУ от K_{\max} описывается степенной функцией.

Испытания на циклическую трещиностойкость состоят в последовательном измерении длины l развивающейся трещины по мере увеличения числа циклов N нагружения. По результатам этих измерений строят сначала графики $l - N$, по ним вычисляют скорость роста трещины dl/dN , а затем строят диаграмму усталостного разрушения.

Испытания проводят на образцах с надрезом и трещиной, в которых поверхность исходной трещины перпендикулярна растягивающим напряжениям. Геометрия образцов подобна используемым для стандартных испытаний на усталость и статическую вязкость разрушения. Нагружение образцов ведут в условиях непрерывно изменяющихся или при постоянных значениях K_{\max} и ΔK . Это достигается выбором формы и способа нагружения образца, применением жесткого нагружения, а также программным изменением нагрузки по мере роста трещины. Обычно рекомендуется проводить испытания с коэффициентом асимметрии цикла $R_\sigma = 0,05 - 0,1$ при частоте нагружения 15 – 20 Гц и синусоидальной форме цикла.

Для испытаний на циклическую трещиностойкость используют «усталостные» машины, оснащенные аппаратурой для измерения длины трещины, числа и параметров циклов нагружения. Наиболее важной методической задачей является обеспечение достаточной точности измерения прироста трещины (не хуже 0,1 мм). Для этого используют известные методы определения длины трещины, в частности простой визуальный метод при 10 – 40-кратном увеличении при помощи катетометра или передвижного микроскопа и метод разности электрических потенциалов.

В результате испытаний по диаграмме усталостного разрушения определяют несколько характеристик циклической трещиностойкости. Наиболее важными из них считают: коэффициенты C и m в уравнении (6.1), пороговый коэффициент интенсивности напряжений K_s , критический коэффициент интенсивности напряжений K_c^u (K_{lc}^u). Оценивают также величины K_{\max} и ΔK при заданной СРТУ и, наоборот, величину СРТУ при определенных значениях K_{\max} и ΔK , коэффициенты интенсивности напряжений K_{1-2} и K_{2-3} , соответствующие началу и концу второго участка диаграммы усталостного разрушения (рис. 6.10) и другие характеристики.

Расчет коэффициентов интенсивности напряжений ведут по формулам, вид которых зависит от используемой схемы нагружения. При циклическом растяжении – сжатии:

$$K_{\max} = \left[\frac{P_{\max} \sqrt{\lambda}}{t \sqrt{b}} \right] Y,$$

а при изгибе с вращением цилиндрического образца:

$$K_{\max} = \left[\frac{11,2 M_{\max}}{\sqrt{b^5}} \right] \sqrt{\lambda} \cdot Y,$$

где P_{\max} – максимальная нагрузка цикла;

λ – безразмерная длина трещины;

t – толщина образца;

b – размер образца вдоль оси трещины;

M_{\max} – максимальный изгибающий момент;

Y – коэффициент, определяемый геометрией образца.

При экспериментальном определении порогового коэффициента K_c , наибольшую нагрузку цикла P_{\max} снижают и находят ее значение, при котором трещина не растет на протяжении заданного числа циклов ($10^6 - 10^8$ циклов). Для оценки $K_c^u (K_{lc}^u)$ проводят испытания с возрастающим K_{\max} и определяют нагрузку P_{\max} и длину трещины $l_{кр}$ в момент начала макроразрушения образца.

Для определения коэффициентов C и m на диаграмме усталостного разрушения проводят прямую через второй линейный участок и выделяют на ней отрезок, его начало принимают соответствующим первой экспериментальной точке, лежащей выше прямой, а конец – последней, находящейся ниже нее. Уменьшив выделенный отрезок на 1/10 длины с обеих сторон, получают расчетный интервал, значения K_{\max} и dl/dN , внутри которого используют для вычисления m и C :

$$m = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}, \quad \lg C = \bar{y} - m \bar{x},$$

где $x = \lg K_{\max}$, $y = \lg \left(\frac{dl}{dN} \right)$; n – число точек в расчетном интервале;

$$\bar{x} = \frac{1}{n \sum_{i=1}^n x_i}, \quad \bar{y} = \frac{1}{n \sum_{i=1}^n y_i}.$$

Последнее время большое внимание уделяется третьему участку диаграммы усталостного разрушения. Помимо $K_c^u (K_{lc}^u)$, здесь определяют значение коэффициента интенсивности напряжений K_a , соответствующего переходу

процесса роста усталостной трещины в область больших ускорений. Величину K_a можно использовать в качестве предельной при расчетах конструкций на выносливость.

Экспериментально K_a определяют по кинетическим кривым изменения СРТУ ($dl/dN - N$) или ускорения ($d^2l/dN^2 - N$) роста трещины с использованием определенного допуска, а также непосредственно по диаграмме усталостного разрушения.

6.5. Контрольные вопросы

1. Поясните понятия усталости и выносливости.
2. Что такое цикл напряжений?
3. Как определяются параметры цикла напряжений?
4. Какой цикл называют симметричным, а какой называют асимметричным?
5. Поясните схемы усталостных нагружений.
6. Из чего состоит и как работает машина МВП-10000 для усталостных испытаний по схеме чистого изгиба?
7. Как проводят испытания в условиях циклического растяжения – сжатия?
8. Каковы характеристики образцов для усталостных испытаний?
9. Что является первичным результатом усталостного испытания одного образца?
10. Какие характеристики выносливости определяют по результатам испытаний?
11. Поясните кривые усталости в координатах $\sigma_{max} - 1/N$?
12. Как определяют усталостную долговечность?
13. Как рассчитывают среднее значение предела выносливости и его среднее квадратичное отклонение?
14. По какой схеме проводят малоцикловые испытания?
15. Чем характеризуются жесткое и мягкое нагружение? Поясните.
16. Для чего используют и как определяют коэффициент чувствительности?
17. Для чего проводят испытания на циклическую трещиностойкость?
18. Поясните диаграмму усталостного разрушения.
19. Какие параметры циклической трещиностойкости определяют по диаграмме усталостного разрушения и как?

Тема №7

СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ. ПРИНЦИПЫ ОЦЕНКИ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Цель работы: Изучить: природу предельных состояний и свойств сварных соединений; целевое назначение испытаний и расчетов сварных соединений и конструкций; использование коэффициента запаса в расчетах на прочность.

7.1. *Предельные состояния и свойства сварных соединений*

Состояния конструкций или деталей, когда их эксплуатация считается невозможной, опасной или нежелательной, носят названия *предельных состояний*. Примерами предельных состояний могут быть – наступление текучести, потеря устойчивости, появление течи, образование трещины в детали и др. Чаще всего наступление предельного состояния связывают с появлением в металле, детали или элементе конструкции какого-то явления или процесса. Но в некоторых случаях в качестве предельных состояний принимают момент, когда достигается определенный количественный уровень того или иного параметра, например прогиб балки заданной величины, определенное удлинение металла при ползучести и т.д.

Следует подчеркнуть различие между предельным состоянием и допустимым эксплуатационным состоянием. Между ними должна существовать некоторая разница, например в уровне нагрузок или температур, которая регламентируется техническими условиями, путем установления требуемых коэффициентов запаса, т.е. конкретных значений отношения нагрузок предельных и эксплуатационных.

Иногда приходится рассматривать возможность наступления в одной и той же детали нескольких предельных состояний. Например, в сварном раскосе фермы, работающем при переменных растягивающих и сжимающих нагрузках, возможными предельными состояниями будут: наступление текучести, потеря устойчивости (при сжатии), появление трещины усталости или разрушение в момент приложения максимальной растягивающей нагрузки.

Наиболее опасными предельными состояниями следует считать различные виды разрушений. Наступление текучести, хотя и используется часто в расчетах для определения требуемого сечения элементов, не относится к аварийно-опасным, так как вызывает лишь нарушение размеров вследствие пластических деформаций.

В большинстве случаев конструкции проектируют так, чтобы предельное состояние в них в период эксплуатации не наступало. В некоторых случаях, если достижение предельного состояния не вызывает аварийной ситуации, предусматривают возможность ремонта конструкции или замены узла тогда, когда предельное состояние уже наступит.

Степень близости эксплуатационного состояния к предельному может быть различной, что оценивают вероятностью ненаступления предельного состояния. Считается, что, чем больше вероятность ненаступления предельных состояний, тем выше уровень работоспособности сварной конструкции.

Под *работоспособностью сварных конструкций* понимают их способность сопротивляться наступлению тех предельных состояний, которые ограничивают их нормальную эксплуатацию. Имеются в виду не только предельные состояния, наступление которых связано с действием нагрузок, но также и такие, как коррозионная стойкость, герметичность, сопротивление потоку и другие. В отличие от работоспособности, *под несущей способностью* обычно понимают сопротивляемость конструкций наступлению предельных состояний, связанных с действием нагрузок. Понятие работоспособности и несущей способности относят не только к сварным конструкциям, но и к отдельным сварным соединениям.

В ряде случаев отождествляют понятие несущей способности и прочности, понимая под последней в широком (инженерном) смысле слова способность материала, сварного соединения, детали или конструкции сопротивляться не только разрушению, но и наступлению текучести, потере устойчивости, распространению трещин и другое. В более узком, научном смысле слова, под прочностью следует понимать только сопротивление разрушению.

Сварные соединения характеризуются рядом свойств. Для несущей способности наиболее важны механические свойства сварных соединений, т.е. их способность сопротивляться деформированию и разрушению под действием внешних механических сил. Прочность, пластичность, вязкость, жесткость – это все отдельные виды механических свойств. Высокая работоспособность сварных конструкций во многих случаях зависит от механических свойств сварных соединений, реже от их физических или химических свойств, например таких, как электропроводность, сопротивление коррозии, плотность и др.

Свойства сварных соединений отличаются от свойств основного металла, так как они формируются под влиянием многочисленных факторов. Это исходный основной металл, сварочные материалы, воздействие источников энергии, сложные процессы плавления и металлизации металла в процессе сварки, взаимодействие его с окружающими жидкими и газовыми компонентами, структурные превращения при воздействии изменяющихся температур, случайное возникновение разного рода несплошностей и другие. Ввиду большого числа факторов, свойства сварных соединений могут изменяться в широких пределах. Основная задача при организации технологического процесса состоит в ограничении возможных вариантов и смещении их, по возможности, в благоприятную сторону, имея в виду, что одной из характерных особенностей механических свойств сварных соединений по сравнению с основным металлом является их значительное рассеяние.

Второй и, пожалуй, главной особенностью большинства сварных соединений является неоднородность свойств отдельных участков сварного соединения. Это относится как к механическим, так и к физическим и химическим свойствам.

Третья особенность сварных соединений связана с их формой вызванной не только условиями их образования, но и возможными дефектами сплошности, что предопределяет в ряде случаев высокую концентрацию напряжений. Концентрация пластических деформаций в процессе сварки и термическое воздействие могут вызывать у ряда сталей деформационное старение, что неблагоприятно сказывается в отношении их хладостойкости.

Четвертая особенность сварных соединений связана с наличием в них высоких остаточных собственных напряжений. Остаточные напряжения сами по себе не способны изменить свойства металла, но в некоторых случаях могут существенно влиять на механические свойства сварного соединения в целом, когда возникает взаимодействие остаточных напряжений с эксплуатационными.

Необходимо также указать на особенность листовых сварных конструкций, которая связана с третьей и четвертой особенностям сварных соединений, а также с условиями их сборки. Имеется в виду такое искажение формы листовой конструкции, вызывающее пружинение, которое не устраняется пластическими деформациями возникающими при приложении нагрузок.

Таким образом, механические свойства сварных соединений зависят от свойств металла отдельных его участков, геометрической формы сварного соединения, остаточных напряжений и степени рассеяния каждого из указанных факторов.

Следует различать простейшие механические свойства металла отдельных участков сварного соединения и механические свойства сварного соединения в целом. Простейшие механические свойства металла отдельных зон оценивают временным сопротивлением, пределом текучести, относительным удлинением и поперечным сужением, определяемыми в круглых цилиндрических образцах при статическом растяжении.

Сравнительно экономной в определении и достаточно информативной является твердость металла. Ее распределение в сечении сварного соединения при наличии корреляционных зависимостей между твердостью и другими простейшими механическими свойствами позволяют судить об уровне прочности отдельных зон, а также о степени неоднородности механических свойств. По твердости можно приближенно судить о структурном состоянии металла.

Свойства однородного металла оценивают также многими другими характеристиками: ударной вязкостью, волокнистостью поверхности разрушения, сопротивлением усталости, вязкостью разрушения при наличии в металле трещины и т.д.

Свойства сварных соединений оценивают в ряде случаев теми же характеристиками или критериями, что и однородный основной металл, при этом в них вкладывают иное содержание. Например, распространенной характеристикой прочности является временное сопротивление. Можно говорить о временном сопротивлении металла шва или околошовной зоны, если образцы взяты достаточно малыми, чтобы содержать в себе относительно однородный по свойствам металл. Временное сопротивление сварного соединения σ'_s , напротив, следует определять на достаточно крупных образцах, которые бы включали в себя

все типичные зоны сварного соединения и обеспечивали такое взаимодействие их между собой, которое характерно для работы сварного соединения в конструкции. Такая характеристика, как предел текучести сварного соединения, в большинстве случаев вообще не может определена, так как, во-первых, из-за неоднородности механических свойств пластические деформации возникают не по всей длине образца одновременно, во-вторых, пластические деформации неравномерны в поперечном сечении образца из-за эффекта контактного упрочнения, в-третьих, натуральное сварное соединение с неснятым усилением создает концентрацию напряжений и даже может иметь собственные напряжения, что делает поле напряжений в образце неоднородным. Предел выносливости сварного соединения следует определять для практических целей также на достаточно крупных образцах, содержащих в себе все особенности сварного соединения, в том числе и остаточные напряжения, хотя последнему условию трудно удовлетворить из-за необходимости увеличения размеров образца.

Таким образом, механические свойства сварных соединений – это способность сопротивляться деформированию и разрушению под действием внешних и собственных механических сил в условиях характерной для сварных соединений концентрации напряжений, однородности свойств и собственных напряжений.

7.2. Целевое назначение испытаний и расчетов сварных соединений и конструкций

Одна из главных задач науки о прочности состоит в определении степени соответствия материала и, в частном случае, сварных соединений тем эксплуатационным условиям, которые возникают в конструкциях. Наиболее естественным путем определения свойств является экспериментальный. Однако воспроизведение реальной обстановки в условиях лаборатории осложняется несколькими существенными обстоятельствами. Во-первых, сложным характером воздействий, которые встречаются в условиях эксплуатации. Во-вторых, многообразием вариантов эксплуатационных условий. В-третьих, тем, что конструкция в процессе работы, как правило, не должна переходить в предельное состояние многие годы. Следовательно, испытание должно быть ускорено путем усиления действия тех или иных факторов.

Сложилась определенная система взаимодействия экспериментального и расчетного начал в науке о прочности. Эта система непрерывно изменяется в зависимости от успехов в той или иной отрасли знаний. Цель ее состоит в определении разнообразными средствами свойств материалов, деталей, сварных соединений и конструкций. Частные задачи, которые ставят перед испытаниями, обычно состоят в следующем.

1. Контроль свойств при приемке и сдаче продукции. Для этой цели отбирают отдельные изделия или изготавливают специальные образцы, чтобы путем испытаний определить их соответствие установленным требованиям. При этом

используют, как правило, простейшие и недорогие виды испытаний, обычно стандартные.

2. Сравнение между собой различных металлов, вариантов технологических процессов, способов сварки, термической обработки с целью выбора лучшего варианта. Эти испытания также часто являются стандартными, но в некоторых случаях сравнение ведут на основе специальных критериев, которые более точно отвечают условиям эксплуатации, или даже на основе данных натуральных испытаний.

3. Получение количественных характеристик, которые предназначены для оценки несущей способности соединения, узла или сварной конструкции. Результаты таких испытаний используются либо для непосредственной оценки испытываемого объекта, либо должны служить в качестве исходной информации для последующих расчетных оценок на основе теории или расчетной схемы.

4. Оценка опасности дефектов. Исследования в этом случае проводят, чтобы установить закономерности влияния различных видов дефектов в конкретных условиях нагрузок, сред, температур.

5. Установление причин непредвиденных разрушений. Испытания в этих случаях могут иметь самый различный характер: от простейших, когда необходимо определить стандартные свойства, до совершенно оригинальных, если необходимо раскрыть и понять природу ранее не изученного явления.

6. Поисковые исследования, когда путем испытаний в различных условиях пытаются найти причины слабо изученных явлений, установить или вскрыть новые закономерности.

Рассмотрим некоторые вопросы организации испытаний. Обычно стремятся поставить испытываемый объект в такие условия, чтобы достичь наступления *предельного* состояния. Во время эксплуатации сварных конструкций такое явление в общем случае довольно редкое и оно обычно вызывается либо серьезным нарушением нормальных условий эксплуатации либо отклонением размеров, форм и свойств сварных соединений от предусмотренных, либо ошибками в проектировании и изготовлении. Регистрировать наступление предельных состояний конструкций с соответствующей аппаратурной записью происходящих процессов удается лишь при специальных испытаниях. Вследствие высокой стоимости таких испытаний чаще идут по другому пути. На основе первичной теоретической модели разрабатывают методы испытаний, пригодные для лабораторных условий. При этом стремятся обеспечить по возможности более близкое соответствие лабораторных условий испытаний реальным, чтобы уменьшить количество принимаемых допущений.

Важным вопросом является выбор способа усиления фактора, действующего в условиях эксплуатации. Если ограничиться воспроизведением эксплуатационных условий, то предельное состояние может не наступить или для его возникновения необходимо весьма продолжительное время. В ситуациях, связанных с действием нагрузок, чаще всего прибегают к их увеличению по сравнению с эксплуатационными. Могут быть и другие пути, например усиление действия того иного фактора. Однако использование усиливающего действия факторов

обязательно должно выполняться на базе обоснованной расчетной модели. Проведение форсированных испытаний без четкой теоретической модели может привести к серьезным недоразумениям и ошибкам.

Должен быть обоснован выбор критерия или нескольких критериев, по которым ведется оценка свойств. Критерии должны быть достоверно регистрируемыми, а если их определяют путем последующего промежуточного расчета, то должна быть уверенность, что этот расчет не содержит в себе существенных допущений. Уместно в связи с этим подчеркнуть, что во время большинства механических испытаний регистрируют непосредственно только две величины – силу и перемещение, все остальное многообразие критериев получают путем последующих пересчетов.

Крайне желательно, чтобы выбранные критерии могли быть использованы для расчета наступления предельных состояний, а не служить только мерой сравнения при однотипных условиях.

Достаточность свойств сварных соединений для обеспечения их нормальной работы в конструкциях, т.е. меру или уровень работоспособности можно оценивать различными способами. Один из прогрессивных современных методов заключается в определении надежности – вероятности ненаступления предельных состояний, ограничивающих нормальную работу изделия. Менее совершенным методом оценки, но весьма распространенным в практике, является определение коэффициента запаса как отношения численного уровня критерия, при котором наступает предельное состояние, к численному уровню аналогичной величины, достигаемой в процессе эксплуатации.

В практике часто применяют и более простые, но менее совершенные критерии работоспособности. Например, требование в отношении достаточной работоспособности сварного соединения часто сводят к тому, чтобы свойства металла отдельных зон сварного соединения и сам шов совпадали со свойствами основного металла или были весьма близкими к нему. В этом случае фактор неоднородности свойств исключают.

Достаточно элементарным в случае наличия неоднородности свойств является также подход, когда о прочности, пластичности или вязкости соединения судят по свойствам наиболее слабой зоны. Ограничиваются при этом определением прочности и пластичности наплавленного металла, ударной вязкости и угла загиба отдельных зон соединения, хотя при этом участвуют в работе и соседние участки, и по ним судят о свойствах соединения в целом.

Хотя в большинстве случаев свойства отдельных зон или свойства соединения не совпадают со свойствами основного металла, однако это не означает, что работоспособность сварной конструкции должна оказаться ниже работоспособности аналогичной конструкции без сварных соединений.

В методах оценки работоспособности сварных соединений и элементов сварных конструкций, независимо от того, какое предельное состояние используется, в явном или неявном виде присутствуют два начала: одно, связанное с напряженно – деформированным состоянием объекта, другое – со свойствами металла.

Напряженно – деформированное состояние в большинстве случаев определяют расчетным путем аналитически или численно; реже используют экспериментальные методы. Знание только напряженно – деформированного состояния еще не позволяет дать ответ на вопрос о прочности соединения, о возможности его разрушения. Это вытекает из того обстоятельства, что в расчетах напряженно-деформированного состояния участвуют такие характеристики металла, как модуль упругости, диаграмма деформирования металла и другие, которые не имеют прямой связи с характеристиками, ответственными за разрушение металла.

Механические свойства металлов и сварных соединений определяют обычно экспериментальным путем. Роль расчета состоит в том, чтобы с его помощью определить, так называемую, левую часть равенства, в которой находится та или иная характеристика напряженно – деформированного состояния, а в правой части присутствует характеристика механического свойства. Сравнение этих двух величин является заключительной стадией расчета при принятии решения о допустимости тех или иных состояний.

Подавляющее большинство современных характеристик механических свойств может быть определено и вычислено путем привлечения расчета напряженно – деформированного состояния испытываемого образца. Например, определение критического коэффициента интенсивности напряжений K_c и многих других критериев механики разрушения возможно лишь в том случае, если результаты испытаний обработаны с применением расчетов, позволяющих определить деформированное состояние в момент достижения критических условий.

Простейшие методы расчета по средним напряжениям обычно не нуждаются в каких-либо сложных методах определения напряженно – деформированного состояния.

7.3. Неравнопрочность сварного соединения и требования к испытаниям

Главная задача испытаний сварных соединений со свойствами, не совпадающими со свойствами основного металла, состоит в том, чтобы установить действительную степень неравнопрочности. Искусственно воспроизведенная неравномерность свойств, не соответствующая возможным ситуациям, порождает необоснованное сомнение в отношении действительной работоспособности сварного соединения. Поэтому выбор усиливающего воздействия при организации испытаний, предназначенных для использования в расчетах, имеет большое практическое значение.

Рассмотрим статически нагруженный элемент, имеющий сварное соединение. Основным предельным состоянием для случая статического нагружения принимают в расчетах наступление текучести металла, которое является нежелательным из-за большой изменчивости размеров детали после

начала ее текучести. Допускаемое напряжение устанавливают, ориентируясь на предел текучести основного металла, с учетом возможного его рассеяния, превышения нагрузки и уменьшения поперечного сечения элемента. Коэффициент запаса n_τ по предельному состоянию наступления текучести составляет при этом отношение σ_m к эксплуатационному напряжению σ_ε . Существует большое число факторов, вызывающих снижение прочности сварного соединения по сравнению с основным элементом. Это и пониженные значения σ_m в зонах высокого отпуска, неоднородность механических свойств, значительное рассеяние механических характеристик вследствие колебаний параметров режима сварки, химического состава, присутствие различных концентраторов как неизбежных (форма шва), так и дефектов в виде различных несплошностей.

По указанным причинам для сварных соединений при статических нагрузках необходимо рассматривать оба предельных состояния как наступление текучести, так и разрушение. Рассмотрим роль этих двух предельных состояний в обеспечении нормальной эксплуатации и уместные подходы к их определению опытным путем. Наступление текучести сварного соединения, если оно происходит при $\sigma < \sigma_m$ (σ_m – предел текучести основного металла), представляет куда меньшую опасность, чем текучесть основного металла. Объясняется это тем, что текучесть сварного соединения охватывает очень небольшой объем металла и поэтому играет небольшую роль в изменении формы конструкции.

Таким образом, не сам факт наступления текучести сварного соединения, а уровень изменчивости размеров и формы конструкции является определяющим для суждения о допустимости течения сварного соединения. Наступление текучести в основном элементе означает возможность существенного искажения конструкции. В сварном соединении это является исключением.

Рассмотрим особенности наступления предельного состояния разрушения. В основном металле при вязком его состоянии разрушение считают наступающим по достижении напряжением уровня временного сопротивления σ_B . Получающийся при этом коэффициент запаса по разрушению

$$n_p = \frac{\sigma_B}{\sigma_\varepsilon}$$

следует рассматривать не как требуемый, а как естественно сложившийся. При другом соотношении σ_B и σ_m он мог бы оказаться другим.

Существенными являются условия определения уровня разрушающей нагрузки для сварного соединения, которое, как правило, не является однородным ни по механическим свойствам, ни по напряженному состоянию. Условия работы сварного соединения радикальным образом изменяются при переходе основного металла элемента из упругого состояния в пластическое. Но в действительности, во время эксплуатации, такое состояние исключено из-за невозможности перехода основного элемента в состояние общей текучести. Поэтому определение уровня разрушающей нагрузки для сварного соединения в условиях, когда основной металл течет, неправомерно. Исследование несущей способности сварного

соединения при статической нагрузке должно выполняться путем усиления действия тех отрицательных факторов, которые в действительности на практике могут привести к его разрушению. Это, в первую очередь, уменьшение сечений угловых швов, снижение σ_s и σ_m наплавленного металла в стыковых и угловых швах, усиление степени разупрочнения мягких прослоек, увеличение их размеров, присутствие различных концентраторов или дефектов, в том числе трещиноподобных.

Неприемлемость уровней нагрузок, создающих в основном металле при испытаниях $\sigma_s > \sigma_m$, может быть показана на примере стыковых соединений с мягкой прослойкой. После начала текучести основного металла эффект контактного упрочнения в мягкой прослойке существенно ослабевает и может быть сделано неверное заключение о значительной неравнопрочности сварного соединения.

Во многих случаях неравнопрочность сварных соединений существенно зависит от концентрации напряжений. Это, во-первых, случаи статического нагружения сварных соединений с ограниченной пластичностью металла, вызванной либо хрупким состоянием металла, например, от низких температур, либо высоким уровнем прочности и повышенной чувствительностью металла к концентрации напряжений. Во-вторых, это прочность при переменных нагрузках, которая в основном зависит от концентрации напряжений. Следует отметить особую роль испытаний для этих случаев, поскольку экспериментальный путь остается практически единственным для ее определения. С появлением численных методов расчета концентрации напряжений, роль испытаний как инструмента для получения обобщающих данных возрастает.

Двоякая природа концентрации напряжений в сварных соединениях (от формы шва и от неравномерности передачи сил по длине швов) позволяет ввести принципы расчленения в организацию испытаний сварных соединений. Этот принцип заключается в следующем. Испытанию подвергают отдельный участок соединения, например с лобовым или фланговым швом, чтобы определить его прочность или пластичность, зависящие только от концентрации напряжений, вызванной формой и размерами шва. Полученная информация в дальнейшем служит для предсказания прочности сложных сварных соединений, в которых имеет место концентрация напряжений по длине швов. Эта концентрация может быть определена расчетным или экспериментальным путем. Испытание сложных сварных соединений следует рассматривать как метод контрольной проверки предсказываемых результатов, как метод определения конструкционной прочности.

Метод расчленения в испытаниях сварных соединений особенно целесообразен для определения пределов выносливости. Наибольший перерасход металла ощущается в сварных конструкциях, работающих при переменных нагрузках, так как конструкторы, не располагая развитым расчетным аппаратом определения выносливости сложных соединений, вынуждены ориентироваться на наиболее неблагоприятные случаи и завышать сечения несущих элементов. Для

практической реализации этого подхода необходим доступный метод определения обоих видов концентрации напряжений в сварных соединениях.

7.4. Коэффициенты запаса

Понятие вероятности неразрушимости в практике проектирования сварных конструкций пока используют редко, обычно оценку ведут по коэффициентам запаса.

Следует различать требуемое (установленное) значение коэффициента запаса и его фактическое значение. *Установленное значение коэффициента запаса* формируется под влиянием очень многих факторов, не только технических, но также экономических, организационных и др.

Требуемый коэффициент запаса определяет как безопасность эксплуатации конструкций, так и их экономичность. Эти два требования находятся в некотором противоречии. Облегчение конструкции с целью повышения ее показателей возможно лишь в разумных пределах, пока не идет во вред безопасности ее эксплуатации. Требуемые коэффициенты запаса обычно регламентированы нормативными документами и присутствуют в неявном виде, например в виде допустимого напряжения, которое заметно ниже напряжения, соответствующего возникновению предельного состояния. В некоторых случаях требуемый коэффициент запаса может быть указан в виде конкретного числа. Несмотря на то, что практика расчетов с использованием коэффициентов запаса исчисляется многими десятилетиями, теория этого вопроса разработана еще недостаточно. Обычно оценка коэффициента запаса в расчетах на прочность идет по уровню напряжений, например в виде отношения критического напряжения, к эксплуатационному.

В проектных методах расчета часто используют нормативное значение предела текучести σ_m или временного сопротивления σ_v для определенных марок сталей. Эти значения приводят в качестве справочных для последующего определения по ним расчетных сопротивлений или допустимых напряжений.

Указанное в справочниках нормативное сопротивление σ_v означает тот уровень прочности, ниже которого металлургические заводы не должны выпускать конкретную марку стали. Сталь при этом часто имеет более высокий уровень прочности, чем нормативное значение. Графически распределение свойств фактически выпускаемой марки стали выглядит, как показано на рис. 7.1. Сталь со значениями σ_v ниже, чем $\sigma_{v \text{ норм}}$ металлургическим заводом отбраковывается. Казалось бы, что в этом случае не следует вводить какие-либо коэффициенты запаса на механические свойства материала. На самом деле коэффициенты запаса на свойства материала n_m несколько выше единицы вводятся. Объясняется это тем, что имеется рассеяние свойств металла даже в пределах одного листа, а тем более плавки. Отдельные детали, изготовленные из одного листа, могут иметь свойства несколько более низкие, чем $\sigma_{v \text{ нор}}$. Смысл вводимого коэффициента запаса в этом случае заключается в учете неточностей, связанных с определением механических

свойств металла на ограниченном числе образцов и невозможностью отыскания минимальных значений.

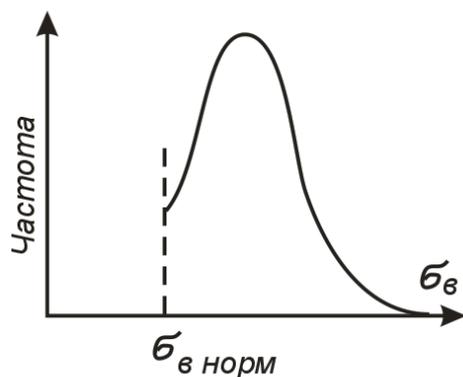


Рис. 7.1. – Гистограмма распределения значений σ_v

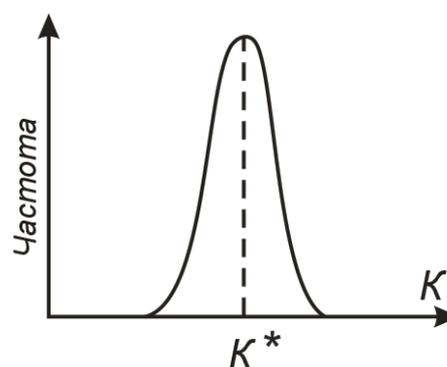


Рис. 7.2. – Гистограмма распределения размеров угловых швов K

Введение коэффициентов запаса на размеры швов и на размеры выявленных несплошностей имеет различное назначение. Размеры швов, например угловых, имеют характер рассеяния, близкий к закону нормального распределения (рис. 7.2). Нет полной уверенности, что в каждом соединении обязательно встретятся участки с отклонениями от K^* как в меньшую, так и в большую сторону. Кроме того, возможны непровары в корне угловых швов, что уменьшает расчетное сечение. Коэффициент запаса на расчетное сечение шва в этом случае призван увеличить катет, указываемый на чертежах, или толщину металла для стыковых швов.

Используемые в контрольных расчетах размеры уменьшающих прочность несплошностей приходится увеличивать, доводя коэффициенты запаса, ввиду возможных ошибок и неточностей при определении их размеров неразрушающими методами. Здесь назначение коэффициента запаса иное, чем при определении необходимых размеров катетов угловых или сечений стыковых швов.

Необходимо также отметить целесообразность введения коэффициентов запаса при определении напряженно-деформированного состояния сварных соединений. Что касается установления уровня рассеяния максимальных нагрузок за длительный период эксплуатации сварных конструкций, то это прямого отношения к сварным соединениям не имеет, и в большинстве расчетов нагрузка считается заданной без необходимости введения коэффициента запаса. Если запас необходим, то он должен быть учтен расчетчиками конструкций до выдачи нормативных нагрузок расчетчикам сварных соединений. Необходимость введения коэффициента запаса при определении напряженно деформированного состояния (НДС) сварных соединений диктуется тем, что применяемые методы расчета НДС часто несовершенны, не учитывают концентрацию силовых потоков и концентрацию напряжений в местах резких изменений сечений. Чем в меньшей мере проявляется пластичность и вязкость металла при наступлении разрушений,

тем выше должны быть коэффициенты запаса на неточность определения НДС сварных соединений.

Запас на учет неконтролируемого изменения температур (низких или высоких) и влияние этого фактора на свойства металла осуществляют обычно не путем введения коэффициентов запаса, а изменением расчетной температуры в большую или меньшую сторону на ΔT .

Подразумевается, что установленный коэффициент запаса должен компенсировать возможные отклонения нескольких параметров: нагрузки, свойств металла, сечений элементов и других. Поэтому при установлении требуемых коэффициентов запаса целесообразно пользоваться такими понятиями, как частные коэффициенты запаса и общий коэффициент запаса.

Рассмотрим указанные понятия на простейшем примере статического расчета нахлесточного сварного соединения с угловыми швами, передающего эксплуатационную силу $P_{\text{э}}$, для которой необходимо введение коэффициента запаса. Будем понимать под требуемыми частными коэффициентами запаса $[n] > 1$ числа, показывающие, во сколько раз нормативные значения должны быть изменены для устранения их возможных неблагоприятных отклонений:

$$[n]_p = \frac{P_{\text{расч}}}{P_{\text{э}}};$$

$$[n]_{\tau} = \frac{\tau_p}{[\tau]};$$

$$[n]_a = \frac{a_{\text{пр}}}{a_{\text{расч}}},$$

где $P_{\text{расч}}$ – расчетная сила;

$P_{\text{э}}$ – эксплуатационная сила;

τ_p – нормативное минимальное значение прочности швов на срез;

$[\tau]$ – допускаемое (расчетное) напряжение среза в швах;

$a_{\text{пр}}$ – проектное сечение шва, указываемое на чертеже;

$a_{\text{расч}}$ – расчетное сечение шва.

Здесь предполагается, что длина швов, которая легко может быть проконтролирована, точно соответствует указанной на чертеже. Общий требуемый коэффициент запаса равен произведению частных требуемых коэффициентов запаса:

$$[n] = [n]_p [n]_{\tau} [n]_a.$$

Расчетная формула для определения необходимого (проектного) сечения шва будет иметь вид:

$$a_{np} = \frac{P_3 [n]_p [n]_k [n]_a}{\tau_p l},$$

где l – длина периметра швов соединения.

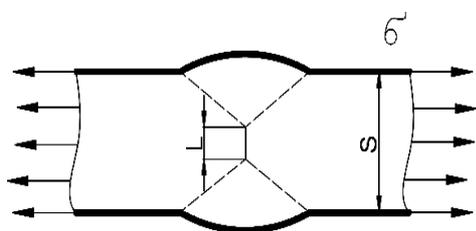


Рис. 7.3. – Стыковое соединение с непроваром

Не во всех случаях расчетные формулы имеют такую структуру, что все параметры входят в первой степени. Например, при расчете стыкового сварного соединения с непроваром (рис. 7.3) на сопротивляемость разрушению при высокой чувствительности металла к концентрации напряжений формула имеет вид:

$$\sigma_c = \frac{K_c}{A\sqrt{l}}$$

где σ_c – критическое напряжение, при котором происходит разрушение;

K_c – критический коэффициент интенсивности напряжений,

l – характерный размер непровара по толщине листа s ;

A – численный коэффициент, отражающий расположение непровара или трещины в соединении.

Пусть заданы требуемые коэффициенты запаса по нагрузке (напряжению) $[n]_p$, механической характеристике $[n]_k$, возможному отклонению от установленного размера непровара $[n]_l$.

Тогда расчетная формула для определения допустимого эксплуатационного напряжения примет вид:

$$\sigma_3 = \frac{K_c}{[n]_k [n]_p A\sqrt{l[n]_l}}.$$

Общий коэффициент запаса, показывающий, во сколько раз возможно отклонение какого-либо из параметров для достижения критического состояния, если остальные параметры считать неизменными, будет в данном случае в отношении K_c и σ_c иметь одно значение, а в отношении l – другое. Для K_c и σ_c :

$$[n]_l = [n]_p [n]_k [n]_l^{1/2},$$

для l :

$$[n]_2 = [n]_p^2 [n]_k^2 [n]_l.$$

Если требуемые частные коэффициенты запаса обычно устанавливают директивным путем и они, как правило, никакому расчетному определению не подлежат, то фактические коэффициенты запаса могут быть определены либо экспериментально, либо расчетным путем.

Чаще всего в экспериментах определяют фактический коэффициент запаса как общий коэффициент по тому параметру, который определяют во время опыта. Если, например, в испытании регистрируют разрушающую нагрузку P сварного соединения с угловыми швами, а механические свойства и размеры катетов швов считают отвечающими нормативным значениям, то отношение P / P_0 дает общий коэффициент запаса.

Более прогрессивными, но и более трудоемкими являются методы проектирования, использующие в качестве расчетной базы вероятностные методы. Для таких расчетов необходимо располагать достаточно достоверной информацией о рассеянии участвующих в расчете величин. В простейших случаях это механические характеристики металла, нагрузки и сечения проектируемых элементов. Рассеяние каждого из указанных параметров должно быть описано соответствующими реальной действительности законами распределения с указанием количественных характеристик этих распределений. Если указанные условия выполнены и задана вероятность неразрушимости детали в виде конкретного числа, например 0,999 или 0,995, то метод расчета, вообще говоря, сводится к построению рациональной процедуры математических действий на основе аппарата теории вероятностей и математической статистики.

Пусть параметром, имеющим рассеяние по нормальному закону, является механическая характеристика, например предел выносливости σ_0 (рис.7.4, а), в то время как нагрузка, отнесенная к сечению σ_s , остается строго постоянной. Разным принятым проектировщиком сечениям будут соответствовать различные уровни напряжений σ_{s1} , σ_{s2} , которые будут давать различную вероятность разрушимости (зачерненная площадь левее σ_{s1} или σ_{s2}). Значение предела выносливости может быть задано либо в виде математической зависимости $f(\sigma_0)$, либо в виде числа $\sigma_{0\min}$, взятого, например, на расстоянии $2s$ от среднего значения σ_0^* .

В последнем случае отношения $\frac{\sigma_{0\min}}{\sigma_{s1}}$ и $\frac{\sigma_{0\min}}{\sigma_{s2}}$ могут формально рассматриваться как коэффициенты запаса, соответствующие различным вероятностям неразрушимости (или разрушимости).

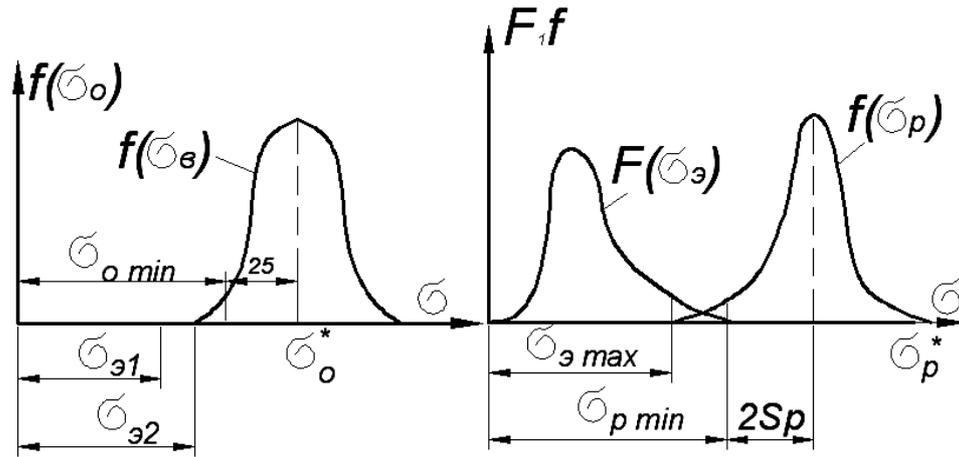


Рис. 7.4. – Законы распределения:

a – предела выносливости;

b – сопротивляемости хрупкому разрушению σ_p и максимального напряжения σ_ε ,

В другом примере (рис. 7.4, б) пусть механическая характеристика σ_p – сопротивляемость хрупкому разрушению сварного соединения при низкой температуре имеет закон $f(\sigma_p)$. Пиковые максимальные нагрузки дают распределение максимальных напряжений σ_ε в виде $F(\sigma_\varepsilon)$. За счет выбора различных сечении элементов конструкций расчетчик может изменить положение кривой $F(\sigma_\varepsilon)$ без изменения ее формы. Если минимальное значение $\sigma_p \min$ задать как отстоящее от σ_p^* на $2s$, а максимально возможную расчетную нагрузку также задать в виде числа, которое при каком-то значении сечения дает $\sigma_\varepsilon \max$, то $\frac{\sigma_p \min}{\sigma_\varepsilon \max}$

будет восприниматься как коэффициент запаса, отдельные значения которого будут соответствовать различной вероятности разрушимости – зачерненной площади на рис. 7.4, б.

Представленные примеры показывают, что форма проведения расчетов еще не предопределяет его качество и достоверность. Можно было бы привести примеры, в которых расчеты ведутся по вероятностным моделям, в то время как достоверных численных значений в правой части кривой $F(\sigma_\varepsilon)$ и в левой части кривой $f(\sigma_p)$ нет. Они априорно приняты как соответствующие каким-либо законам распределения, а численные значения получены путем экстраполяции кривых в области, где нет опытных данных.

В связи с изложенным представляется, что при построении конкретной процедуры расчета на первом этапе необходимо четко установить, факторы, влияющие на прочность, и дать их связь на основе детерминированной модели. В последующем учет рассеяния факторов позволит учесть и вероятностный аспект происходящих процессов.

При выполнении контрольных расчетов сварных соединений с несплошностями в большинстве случаев бывает, достаточен альтернативный ответ, наступит или нет рассматриваемое предельное состояние при известных нагрузках,

свойствах металла и размерах несплошностей. Однако, в некоторых случаях бывает необходима количественная оценка фактического состояния по отношению к критическому. Ответ может быть дан в виде вероятности неразрушимости (разрушимости) либо в виде фактического коэффициента запаса. Анализ ситуации показывает, что для вероятностной оценки фактического состояния сварного соединения приходится задаваться законом распределения несплошностей, а также вероятности механических свойств при таких низких значениях их уровней, при которых никаких экспериментальных данных нет. Фактически дело сводится к сложному и весьма точному расчету по произвольно заданным зависимостям, что представляется нелогичным.

7.5. Расчетная и конструкционная прочность

Большую часть сварных конструкций в процессе проектирования рассчитывают на прочность или жесткость. Существующие нормы расчета ставят проектировщика в определенные условия. При стремлении получить экономичную конструкцию с минимальной массой и недорогую в изготовлении у него остаются только возможности, связанные с выбором материала и конструктивных форм. Напротив, при желании перестраховаться и получить конструкцию более прочную, даже путем увеличения массы, проектировщик также ограничен нормами расчета.

Мерилом правильности использованного расчета является фактическая прочность конструкции, которая зависит не только от точности расчета, но и от конкретной технологии изготовления, наличия дефектов в конструкции, использованных методов контроля.

Расчетная прочность – это установленная в результате расчета путем использования характеристик материала и аппарата теории способность сварного соединения или конструкции сопротивляться наступлению тех предельных состояний, которые соответствуют наступлению отказа в работе.

Конструкционная (фактическая) прочность – это установленная в результате испытания или эксплуатации при конкретных свойствах материала, значении и характере действия нагрузок, температуре, среде, а также технологии изготовления способность сварного соединения или конструкции сопротивляться наступлению тех же предельных состояний, от которых зависят их служебные свойства.

Конструкционная прочность по своей природе является величиной, которая имеет рассеяние, поскольку имеют рассеяние свойства материала и размеры. Отсюда следует, что уровень рассеяния различных видов прочности может оказаться существенно разным. Например, если ведется оценка прочности по предельному состоянию наступления текучести стенки сосуда, работающего под давлением, то рассеяние будет находиться в пределах рассеяния свойств металла по σ_T и толщины листового металла. Для многих марок металла это рассеяние обычно невелико. Если же оценка прочности будет проводиться по предельному состоянию разрушения сосуда, изготовленного из высокопрочной стали,

чувствительной к концентрации напряжений, то рассеяние будет зависеть от концентрации напряжений, которая в свою очередь зависит от радиусов закруглений в зонах концентрации. Рассеяние в этом случае окажется более значительным. Сравнение по долговечности при испытании сосудов при переменном давлении даст еще большее рассеяние результатов. Расчеты на прочность обычно ведут, используя детерминистический подход. Поэтому одному полученному расчетному уровню прочности будет всегда соответствовать некоторая совокупность неодинаковых значений фактически наблюдаемой конструкционной прочности. Это одна из основных причин несовпадения расчетной и конструкционной прочности, вытекающая из самого принципа построения расчета, не рассматривающего рассеяние факторов, участвующих в расчете. Не следует переоценивать значение отмеченного обстоятельства для практической деятельности. Если ориентироваться на статистически минимальное значение величины, например на $(\sigma_m^* - 3 s_m)$, где σ_m^* – среднее значение предела текучести, s_m – среднее квадратическое отклонение значения предела текучести, что обычно и делают при расчетах с использованием σ_m , а значение конструкционной прочности брать также по статистически минимальному уровню, то отличие расчетной и конструкционной прочности при условии минимального влияния других факторов будет невелико.

Значительное влияние на различие уровней расчетной и конструкционной прочности оказывают дефекты. В современных расчетах не принято заранее включать дефект как фактор, подлежащий учету на стадии проектирования. Технологические требования к сварным конструкциям обычно таковы, что не допускают наличия в них опасных дефектов. Принципиально это может быть достигнуто применением 100% контроля качества неразрушающими методами. Поскольку даже в этом случае сохраняется некоторая вероятность пропуска дефекта, то, естественно, остается и вероятность отклонения расчетной прочности от конструкционной. При выборочном контроле вероятность несовпадения расчетной и фактической прочности будет еще значительней. Если поток дефектов в производстве является стабильным, а уровень максимально возможных дефектов не превышает какого-то значения, то может быть назначен определенный коэффициент запаса по прочности, который сделает вероятность разрушения при эксплуатационных нагрузках близкой к нулю, несмотря на значительное отличие расчетной и конструкционной прочности.

Следующая причина несовпадения расчетной и конструкционной прочности заключается в недостаточных знаниях комплексного влияния нескольких одновременно действующих факторов. Большая часть методов расчета развита для отражения влияния какого-либо одного фактора. Учет в расчетах каждого фактора в отдельности является недостаточным, что и порождает неизбежные расхождения между предсказанной и фактической прочностью. Недостаточность учета влияния слабо изученных факторов также является одной из причин несовпадения расчетной и конструкционной прочности.

Типичным примером может служить неучет низких климатических температур, существенно влияющих на чувствительность материала к

концентрации напряжений. Методы расчета, способные отразить это влияние, только создаются, тогда как разрушения конструкций при низких температурах довольно часты. Меры повышения сопротивления хрупким разрушениям при низких температурах состоят пока в использовании хладостойких металлов и термической обработки после сварки.

Использование высокопрочных металлов, работающих при высоком уровне напряжений и весьма чувствительных к концентрации напряжений послужило мощным стимулом для разработки научного направления механики разрушения при наличии трещин. Начальный опыт применения таких сталей без учета фактора трещиностойкости дал немало примеров разрушений.

Несовпадение расчетной и конструкционной прочности является также следствием неправильного выбора предельных состояний и критериев. Широко распространенным примером такого рода является расчет сварной конструкции по предельному состоянию наступления текучести, в то время как она должна быть рассчитана на выносливость по предельному состоянию разрушения от усталости или на сопротивляемость разрушению из-за концентрации напряжений.

При создании сварных конструкций необходимо стремиться к сближению расчетной и конструкционной прочности. Если расчетная прочность выше конструкционной, то при небольших коэффициентах запаса не исключены выходы конструкций из строя по причине наступления предельного состояния. Если расчетная прочность ниже конструкционной, то это означает, что допущен перерасход металла. Проектировщик располагает большими возможностями, чтобы расчетные уровни прочности мало отличались от фактических. Необходимо принимать такие конструкторские решения, которые бы исключали действие неясных в расчетном и физическом плане факторов. При высокой чувствительности материала к концентрации напряжений обязательно должен быть установлен для расчета размер возможного невыявленного дефекта в виде трещины и проведена оценка опасности этого дефекта в условиях эксплуатации.

Значительно влияние технологии на конструкционную прочность. Сварка относится к технологическим процессам, способным сильно повлиять на качество металла. Послесварочная термическая обработка, хотя и удорожает стоимость производства, в некоторых случаях является необходимой для улучшения, а главное для выравнивания свойств металла в различных частях сварных соединений и конструкции в целом. При создании новых изделий, в которых действуют слабо изученные факторы, расчет прочности может оказаться недостаточным ввиду его неполного соответствия реальной ситуации. В таких случаях следует прибегать к испытанию узлов и элементов конструкций на прочность, исследованию напряжений и деформаций в них.

7.6. Контрольные вопросы

1. Что понимают под предельным состоянием? Приведите примеры.
2. В чем различие между предельным состоянием и допустимым эксплуатационным состоянием?
3. Что понимают под работоспособностью сварных конструкций?
4. Что понимают под несущей способностью сварных конструкций?
5. Каковы свойства и особенности сварных конструкций?
6. Как оценивают свойства сварных конструкций?
7. Каковы общие и частные задачи испытаний сварных конструкций?
8. Какие проблемы решают при организации испытаний сварных конструкций?
9. Как определяют напряженно-деформированное состояние сварных конструкций?
10. Как определяют механические свойства металлов и сварных соединений?
11. Что понимают под неравнопрочностью сварного соединения?
12. Какие предельные состояния рассматривают для сварных соединений при статических нагрузках?
13. Как определяют коэффициент запаса по разрушению?
14. Как определяют установленное значение коэффициента запаса и требуемый коэффициент запаса?
15. Что понимают под расчетной прочностью?
16. Что понимают под конструкционной (фактической) прочностью?
17. В чем причины несовпадения расчетной и конструкционной прочности?
18. В чем проявляется влияние технологии на конструкционную прочность?

Тема №8

МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И КОНСТРУКЦИЙ

Цель работы: Ознакомиться с видами испытаний сварных соединений и конструкций. Изучить методики проведения статических испытаний на: одноосное растяжение стыковых сварных соединений; одноосный изгиб; статический и малоцикловый двухосный изгиб. Познакомиться с испытаниями: сварных узлов стержневых конструкций из труб; угловых швов.

8.1. Классификация методов испытаний

Большая часть современных методов механических испытаний предназначена для получения такой информации о свойствах, которая может быть использована в расчетных оценках. Это пределы текучести металла, пределы выносливости, значения критических коэффициентов интенсивности напряжений и другие. Некоторая часть определяемых механических характеристик предназначена для сравнения металлов и сварных соединений между собой с целью выбора лучших из рассматриваемых вариантов. Это относительное удлинение, угол загиба, ударная вязкость, твердость, процент волокнистости в изломе и др.

Методы механических испытаний сварных соединений можно разделить на две большие группы в зависимости от того, предназначены они только для сварных соединений и швов или могут быть в равной мере использованы и для основного металла.

Испытываемый образец может не иметь концентраторов напряжений, свойственных сварному соединению или шву. Иногда образец вообще содержит в себе только однородный металл, соответствующий шву или участку какой-либо зоны термического влияния. В последнем случае цель испытания состоит в определении механических свойств металла конкретной зоны. Испытание механически обработанных сварных соединений без естественной концентрации напряжений, но с механической неоднородностью, как, например, в случае испытаний для определения угла загиба, имеет сравнительный характер, так как не отражает той реальной обстановки, в которой работает соединение.

Большое распространение в последние годы получили испытания образцов, содержащих как естественную концентрацию напряжений, вызванную формой соединения, так и концентрацию напряжений от дефектов, например от непроваров или пор.

В ряде случаев немаловажное значение имеет также наличие в сварных соединениях остаточных напряжений. Результаты испытаний на выносливость, а также при наличии коррозионной среды показывают заметное влияние их на прочность. Поэтому образцы для таких испытаний должны содержать в себе не только концентраторы напряжений, но и остаточные напряжения.

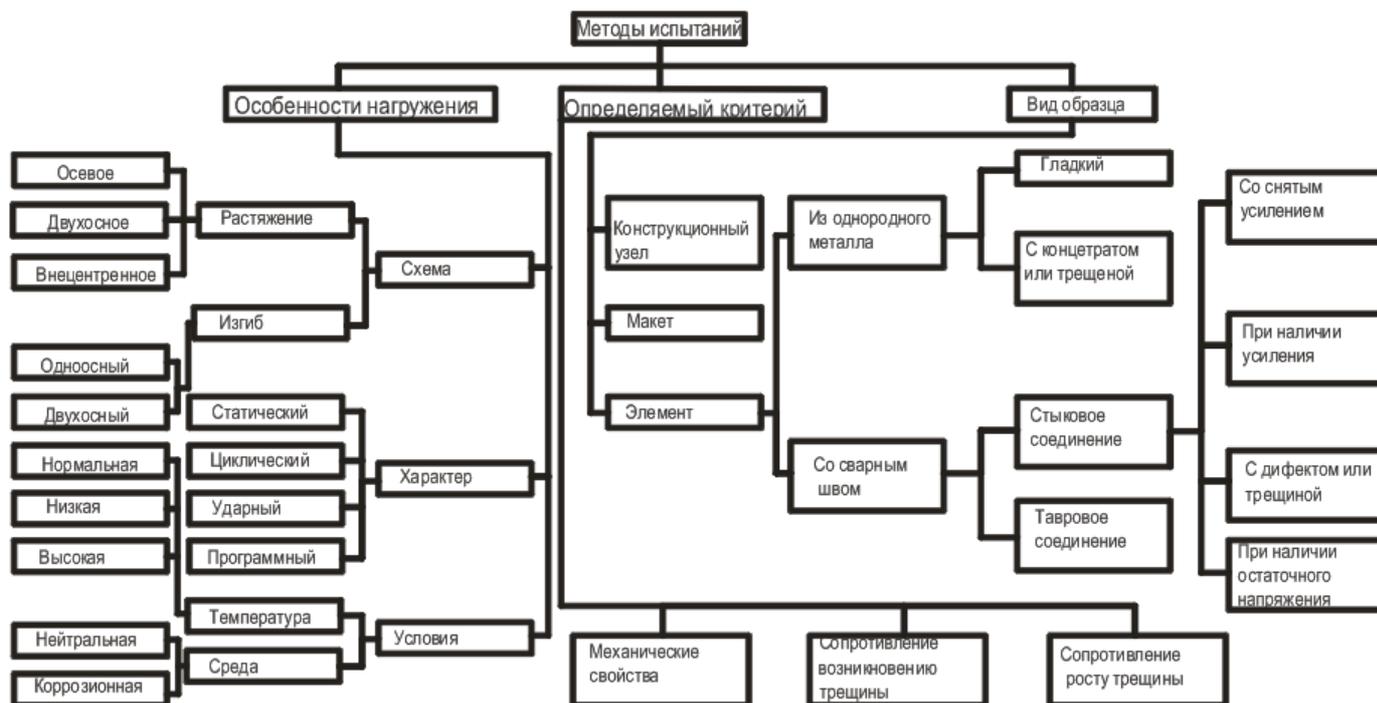


Рис. 8.1. – Методы испытаний сварных конструкций

Наконец, чтобы учесть влияния отклонения формы конструкции от идеальной, а также влияние схемы напряженного состояния на прочность, испытанию подвергают элементы конструкций. Таким образом, в зависимости от вида образца и его представительности в отношении присутствия в нем существенных факторов, свойственных сварному соединению, методы испытаний могут быть расположены в некоторой последовательности.

Чаще всего методы испытаний классифицируют по способу нагружения, виду образца и определяемому критерию. Именно такая смешанная классификация представлена в виде схемы на рис.8.1. В качестве основного признака взят способ и условия нагружения.

8.2. Статические испытания на одноосное растяжение стыковых сварных соединений

Статические испытания на растяжение в соответствии с ГОСТ 1497-73 предназначены для определения характеристик механических свойств однородного металла с использованием цилиндрических и плоских образцов соответственно диаметром 3 мм и более и толщиной 0,5 мм и более.

Применительно к определению механических свойств сварных соединений испытания на растяжение регламентирует ГОСТ 6996-66. Их проводят при оценке качества продукции и сварочных материалов, при определении пригодности способов и режимов сварки, при установлении квалификации сварщиков и

показателей свариваемости металлов и сплавов. Образцы для испытаний изготавливают из пластин, вырезанных из контролируемой конструкции или из специально сваренных контрольных соединений.

Характеристики механических свойств различных участков сварного соединения и наплавленного металла σ_m или $\sigma_{0,2}$, σ_s , δ_s , ψ определяют согласно ГОСТ 1497-73 путем растяжения цилиндрических образцов диаметром $d_0 \geq 3$ мм с начальной расчетной длиной $l_0 = 5,65\sqrt{F_0}$. В соответствии с ГОСТ 6996-66 рабочее сечение должно полностью состоять из металла испытываемого участка, вдоль продольной оси которого производят вырезку образцов. Когда размеры отдельных зон сварного соединения слишком малы и не позволяют вырезать образцы диаметром 3 мм, то диаметр приходится уменьшать.

Результатом испытания гладкого образца обычно является машинная диаграмма, изображающая зависимость условного напряжения от относительного удлинения, записанная в процессе нагружения вплоть до разрыва. Ее обработка позволяет получить зависимость истинных напряжений от истинных деформаций в пределах равномерного распределения удлинений по длине образца, то есть до образования шейки. Построение кривой истинных напряжений при больших деформациях значительно труднее. Развитие шейки сопровождается искривлением продольных образующих и появлением растягивающих напряжений в плоскости, перпендикулярной оси образца. Результатом этого является изменение напряженного состояния от одноосного к трехосному, причем относительные значения поперечных составляющих напряжений растут по мере увеличения кривизны образующих в зоне шейки и нагружение металла с момента образования шейки перестает быть простым. В наименьшем сечении шейки для определения среднего осевого напряжения достаточно измерять размеры, характеризующие площадь этого сечения при конкретных значениях растягивающего усилия. Так, на рис. 8.2 показана зависимость истинных напряжений от пластических деформаций для стали 20Г2. Штриховой линией 1 показан участок диаграммы $\sigma = f(\varepsilon_1)$ после образования шейки, построенный в предположении, что напряженное состояние в шейке одноосное. Однако усложнение напряженного состояния приводит к сдерживанию пластической деформации и увеличению продольной составляющей σ_1 по сравнению с его значением, соответствующим той же деформации ε_1 , но в условиях сохранения простого растяжения. Так как это повышение напряжения вызывается не свойствами материала, а изменением формы образца, то кривая 1 на рис. 8.2 дает искаженное представление о действительной диаграмме металла. Пересчет на основе теории пластичности по формулам, учитывающим не только размеры сечения шейки, но и кривизну продольных образующих образца, даст зависимость (кривая 2), показанная на рис. 8.2 сплошной линией. Существенность вносимых поправок достаточно наглядна.

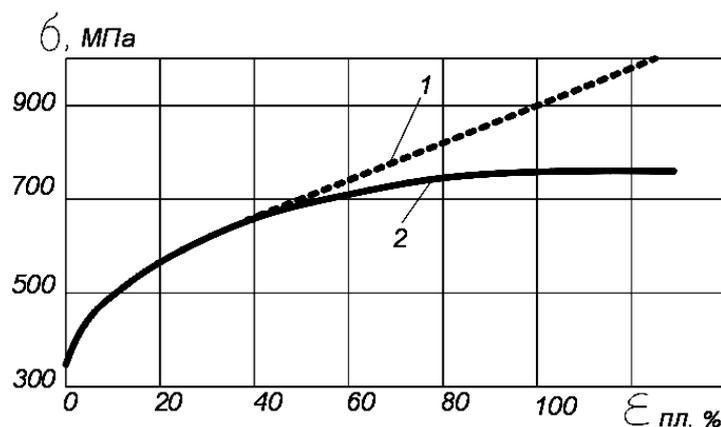


Рис. 8.2. – Условная и действительная диаграммы растяжения стали 20Г2

Испытания стыковых сварных соединений желательно проводить на образцах, толщина и диаметр которых равна толщине или диаметру основного металла, но это пожелание реализуется далеко не всегда. При подготовке испытания сварного соединения из листов разной толщины более толстый лист путем механической обработки должен быть доведен до толщины более тонкого листа.

При определении прочности наиболее слабого участка стыкового соединения используют образцы по ГОСТ 6996-66 (рис. 8.3). Утолщение шва обычно снимают механическим способом до уровня основного металла. В случае испытания образцов без снятия утолщения в формул подсчета временного сопротивления вводят значение площади сечения образца вне шва.

При растяжении гладкого образца со сварным швом пластические деформации возникают локально в зонах с наименьшим пределом текучести. Соседние зоны, обладающие большей прочностью, препятствуют развитию пластических деформаций, и разрушающий уровень напряжений и деформаций может быть различным в зависимости от размеров слабой зоны.

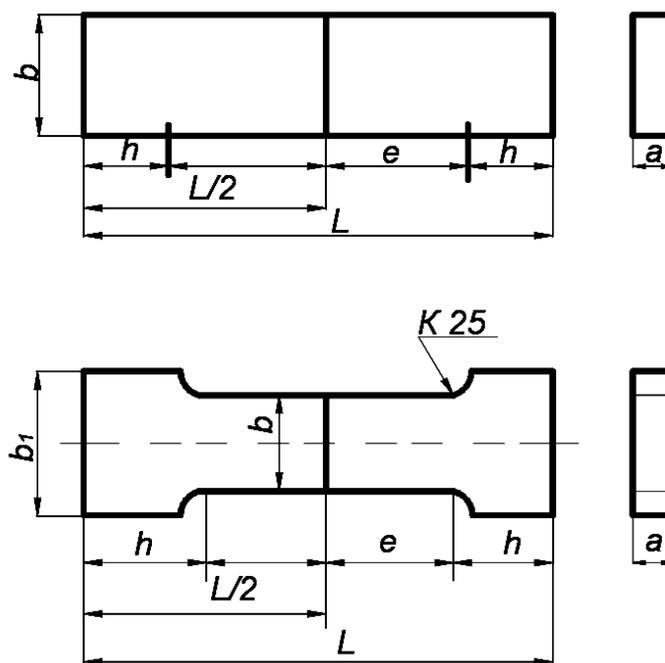


Рис. 8.3. – Плоские образцы для испытаний сварных соединений на статическое растяжение

8.3. Статические испытания на двухосное растяжение стыковых сварных соединений

Двухосное растяжение характерно для элементов оболочковых конструкций (цилиндрические резервуары, сосуды, трубопроводы и т.д.). Испытаниям в этих условиях обычно подвергают листовой металл и стыковые сварные соединения. Стандарта на такой вид испытаний нет.

В пластической области напряженное состояние с двумя растягивающими компонентами $\sigma_2/\sigma_1 = 0,5$ наиболее просто реализуется при изгибе на внешней поверхности образца, у которого ширина b более чем в 10 раз превышает толщину t . При растяжении широкого плоского образца с двусторонней выточкой (рис. 8.4) в пластической области (то есть при $\mu = 0,5$) возникает напряженное состояние двухосного растяжения с соотношением главных напряжений $\sigma_2/\sigma_1 = 0,5$. Такие испытания позволяют сопоставлять прочность и пластичность различных материалов в условиях двухосного растяжения, как при отсутствии, так и при наличии стыкового соединения. Для этой цели сварной шов располагали в середине рабочей части образца перпендикулярно продольной оси. В образцах, предназначенных для двухосного растяжения, плоскую двустороннюю выточку выполняли так, чтобы она проходила либо по сварному шву, либо по переходной зоне.

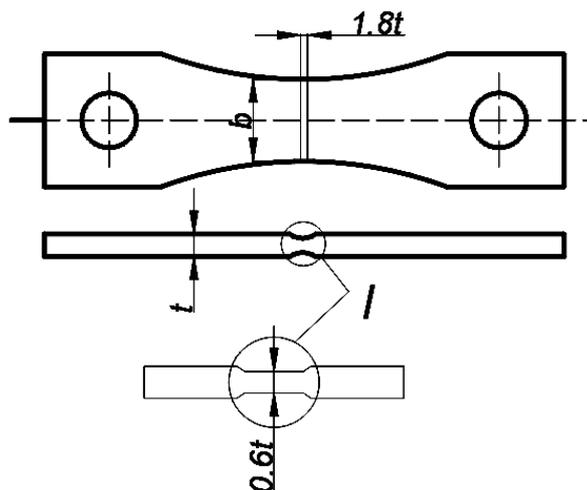


Рис. 8.4. – Плоский образец с выточкой для испытаний на двухосное растяжение

Более универсальным методом, позволяющим проводить испытания при любом соотношении компонентов главных напряжений в пределах $0 \leq \sigma_2 / \sigma_1 \leq 1$, является растяжение плоского образца в двух направлениях. Осуществление такой схемы испытания требует специального оборудования и формы образца, обеспечивающих равномерность поля деформаций и поддержание заданного соотношения σ_2 / σ_1 , в процессе нагружения не только в упругой, но и в пластической области.

Примером такого оборудования может служить установка, предназначенная для испытания плоских образцов, зажимаемых по всему контуру (рис.8.5, а). На таких образцах из сплава АМгбН толщиной 2 мм исследовали влияние различных конструктивно-технологических факторов (местное ослабление, местное увеличение жесткости в виде ребра, наличие элемента, сваренного круговым швом, повторные подварки) в зависимости от соотношения главных напряжений σ_2 / σ_1 . Оценку результатов осуществляли сопоставлением значений условных разрушающих напряжений и соответствующих им относительных деформаций в направлении главных осей.

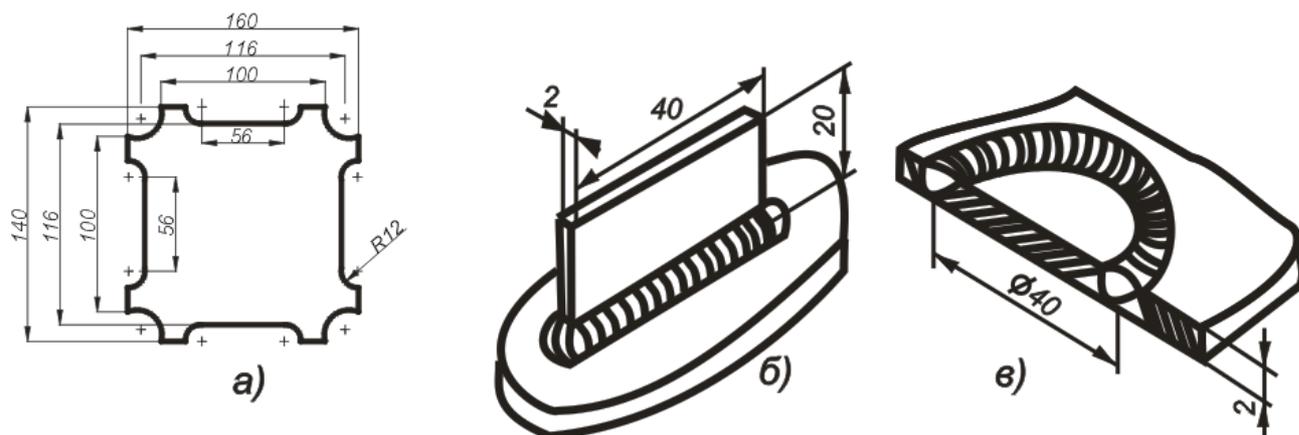


Рис. 8.5. – Плоские образцы для испытаний на двухосное растяжение:
а – из основного металла; *б* – с приваренным ребром; *в* – с круговым швом

Недостатком рассмотренных выше методов испытаний (осевое растяжение плоского образца с выточками и растяжение плоского образца одновременно в двух направлениях) является ограниченный размер зоны, где напряженно – деформированное состояние оказывается близким к заданному.

Примером устранения такого ограничения путем значительного увеличения мощности нагружающего устройства, является установка, используемая в Британском национальном исследовательском центре UKAEA TECHNOLOGY для испытаний в условиях двухосного растяжения крестовых образцов площадью $1,5 \text{ м}^2$, толщиной 70 мм.

Другой путь существенного расширения диапазона размеров зоны двухосного растяжения – это использование метода выпучивания, при котором листовая образец закрепляется по контуру и нагружается гидравлическим давлением. Возникающее при этом напряженное состояние зависит от формы образца и матрицы. Так, для плоского образца (рис. 8.6, *а*), защемленного по контуру кругового отверстия матрицы, возникающее в средней части образца двухосное растяжение с равными компонентами $\sigma_2/\sigma_1 = 1$ сначала имеет заметный градиент в направлении толщины, однако с развитием пластических деформаций напряжения по толщине практически выравниваются.

Замена кругового отверстия в матрице на эллиптическое позволяет изменить отношение растягивающих компонентов напряжений σ_2/σ_1 , в пределах от 1 до 0,75 в зависимости от соотношения размеров осей эллипса. Дальнейшее уменьшение отношения $\sigma_2/\sigma_1 = 0,7 - 0,3$ достигается при использовании схемы, показанной на рис. 8.6, *б*, где нагружению гидравлическим давлением подвергается образец в виде цилиндрической панели, защемленной между матрицей и цилиндрическим пуансоном.

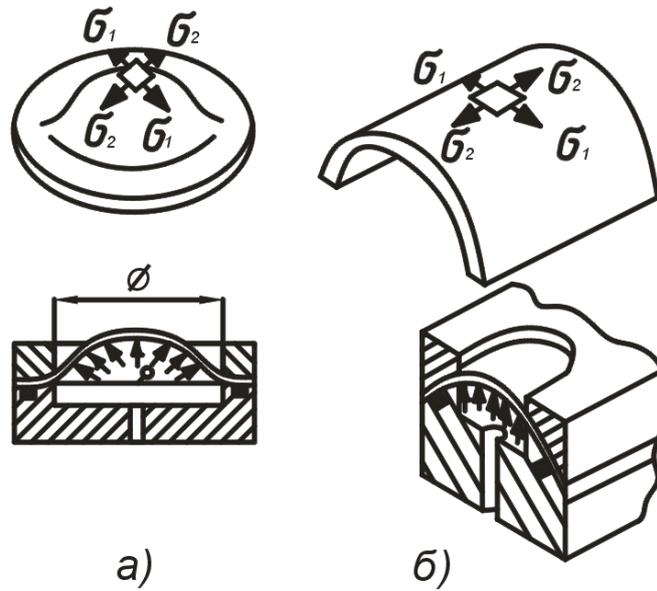


Рис. 8.6. – Схемы испытаний методом выпучивания:
 а – плоского образца через круговое отверстие;
 б – цилиндрической панели через эллиптическое отверстие.

Наибольшее использование получила схема выпучивания из плоскости через круговое отверстие. В этом случае при испытании листового образца без сварного шва его поверхность приобретает форму, близкую к сферическому сегменту. Осевая симметрия такой выпучины облегчает измерения и расчеты, необходимые для установления зависимости $\sigma_1 = f(\varepsilon_{3nl})$, которая в пластической области является деформационной характеристикой материала. Считая в полюсе круговой выпучины $\sigma_2 = \sigma_1$; $\sigma_3 = 0$ и используя соотношения:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2},$$

$$\varepsilon_i = \sqrt{2} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2},$$

для изотропного материала $\sigma_1 = \sigma_i$, и $\varepsilon_{3nl} = \varepsilon_{i-nl}$. Таким образом, в пластической области, когда коэффициент μ поперечной деформации принимается равным 0,5, зависимость $\sigma_1 = f(\varepsilon_{3nl})$ является деформационной характеристикой материала $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$. Ее построение требует подсчета значений σ_1 и ε_{3nl} , соответствующих различному давлению p под образцом, по формулам:

$$\sigma_1 = \frac{pR}{2t} \text{ и } \varepsilon_{3nl} = \ln \frac{t}{t_0},$$

где R – радиус кривизны, а t и t_0 – толщина листа до и после нагружения в полюсе выпучины.

Наиболее просто испытание с целью установления зависимости $\sigma_1 = f(\varepsilon_{3nl})$ осуществляют путем ступенчатого нагружения. Образец нагружают до определенного уровня давления p , фиксируя его по манометру, и измеряют кривизну выпучины в полюсе, как показано на рис.8.7, *а*. Затем давление сбрасывают, образец извлекают из установки и измеряют толщину t в полюсе (рис. 8.7, *б*). Такую последовательность операций повторяют вплоть до разрушения, причем каждый раз нагружающее давление увеличивают.

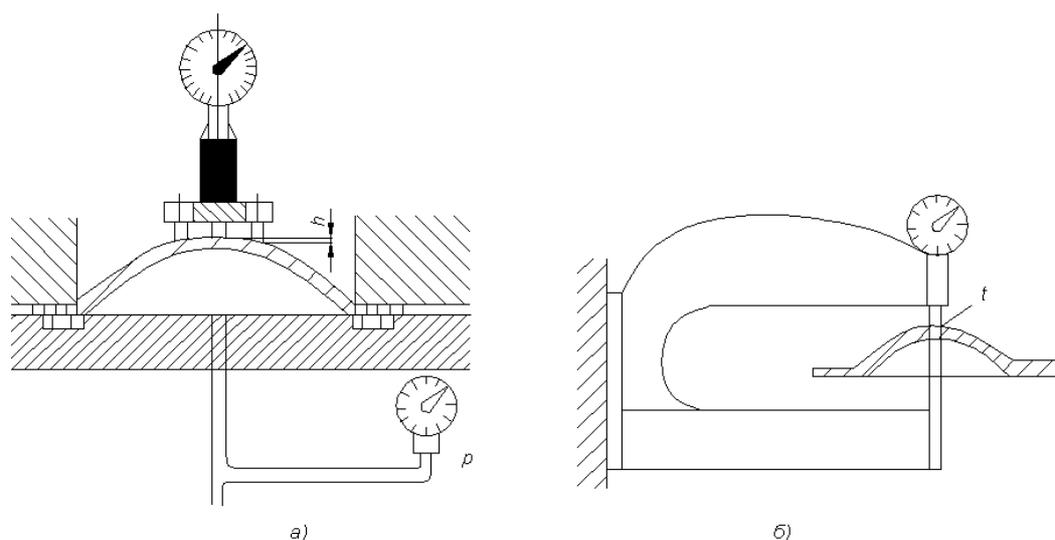


Рис. 8.7. – Схемы измерений при ступенчатом нагружении образца:
а – кривизны выпучины; *б* – толщины образца

Прием ступенчатого нагружения обеспечивает простоту измерения пластических деформаций, однако дает заметную погрешность в области малых пластических деформаций и не учитывает возможность деформационного старения металла в результате разгрузки после каждого нагружения. Этого можно избежать путем постановки испытаний непрерывным нагружением с записью измеряемых параметров на ленту осциллографа с помощью датчиков, показанных на рис.8.8. Датчик деформации (рис. 8.8, *а*) имеет упругий элемент с наклеенными с двух сторон тензодатчиками сопротивления. Датчик давления (рис. 8.8, *б*) имеет цилиндр *1* нагруженный измеряемым давлением. Наклеенные на его поверхности тензодатчики *2* являются рабочими.

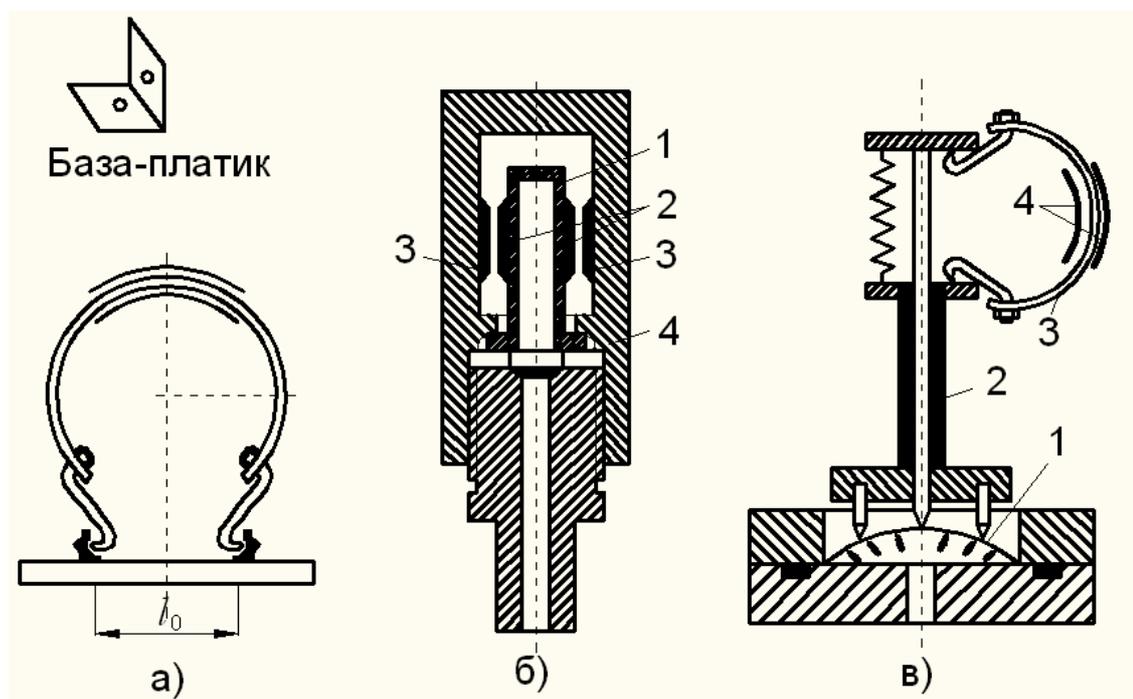


Рис. 8.8. – Датчики для измерений:
а – деформации; *б* – давления; *в* – кривизны выпучины

Температурную компенсацию при использовании мостовой схемы обеспечивают тензодатчики 3, наклеенные на корпус 4, изготовленный из того же материала, что и цилиндр 1. При измерении кривизны выпучины 1 (рис. 8.8, в) перемещение штока 2 относительно опор фиксируется упругим элементом 3 с тензодатчиками 4. Построенные зависимости истинных напряжений от истинных деформаций $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$ показаны на рис. 8.9 для четырех различных марок сталей. Светлые точки – это результаты одноосного растяжения плоских образцов из тех же листов в пределах равномерной деформации до образования шейки. Расположение светлых точек, близкое к соответствующим кривым, построенным по результатам двухосного растяжения, свидетельствует об отсутствии заметной анизотропии свойств испытанных тонколистовых элементов и возможности использования полученных зависимостей $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$ для других схем напряженного состояния с растягивающими компонентами.

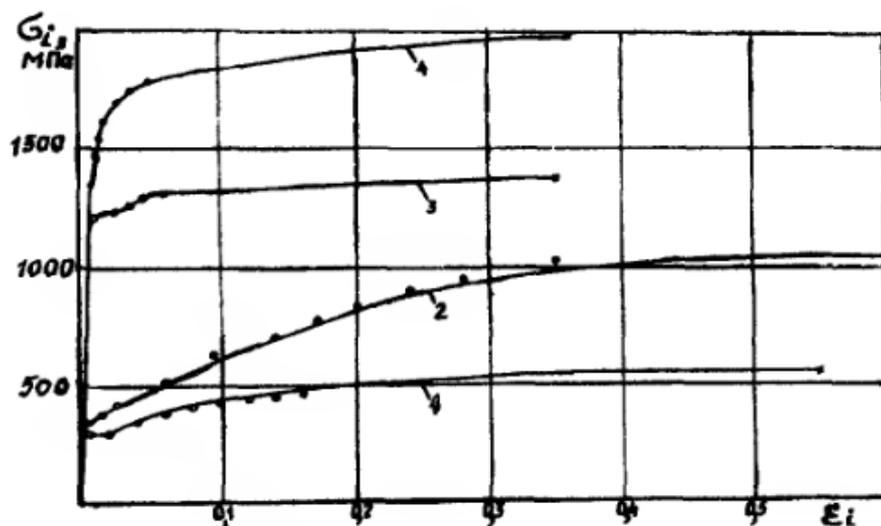


Рис. 8.9. – Зависимости $\sigma_i = f(\varepsilon_i)$, полученные при двухосном растяжении $\sigma_2 = \sigma_1$ методом выпучивания листовых образцов из сталей:
 1 – низкоуглеродистой; 2 – 12X18H10T; 3 – 30ХГСА; 4 – СП28

Все кривые на рис. 8.9 оканчиваются участком прямой, параллельной оси абсцисс, то есть разрушению предшествует исчерпание способности металла к упрочнению от деформации.

В отличие от листового образца без шва, в процессе нагружения которого выпучина приобретает форму, близкую к сфере, выпучина образца со сварным швом такой правильной формы не получает. Отсюда следует, что использование формулы $\sigma_1 = p R/t$ при оценке несущей способности сварного соединения в условиях испытания выпучиванием через круговое отверстие становится неправомочным. В то же время несущая способность стыкового соединения в условиях двухосного растяжения может быть различной в зависимости от механических свойств отдельных зон соединения, размеров этих зон и наличия или отсутствия усиления шва, а также расположения шва относительно осей главных напряжений при испытаниях образцов и при работе соединения в конструкции. Поэтому для оценки несущей способности сварного соединения конкретного материала в условиях двухосного растяжения при $\sigma_2 = \sigma_1$ в первую очередь испытывают образцы без сварного шва, а полученную зависимость $\sigma_1 = f(\varepsilon_3)$ используют при обработке результатов испытаний образцов со сварным швом.

Для этого образец со швом нагружают до разрушения и по данным измерения толщины в зоне зенита выпучины определяют значение достигнутой пластической деформации $\varepsilon_{3пл}$. Истинное напряжение σ_1 находят с помощью полученной при испытании листового металла зависимости $\sigma_1 = f(\varepsilon_3)$, как показано на рис. 8.10, а условное как $\sigma_{усл} = \sigma_1 t/t_0$. При этом после испытания толщину образца со швом следует измерять в такой точке, которая, во-первых, находится в зоне равномерных деформаций зенита выпучины, а во-вторых, располагается на

таким расстоянии от шва, где механические свойства не изменились в результате сварки.

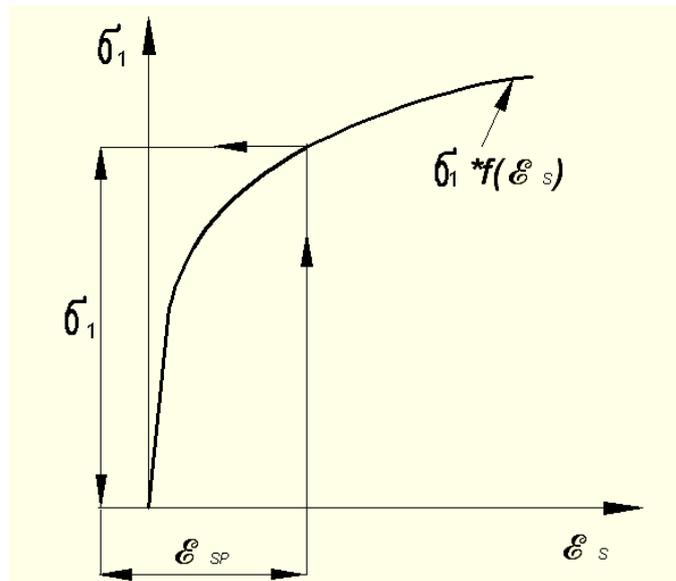


Рис. 8.10. – Схема определения несущей способности сварного соединения при испытании образца со сварным швом в условиях двухосного растяжения

Если ширина C зоны термического влияния невелика (рис. 8.11, а), то при испытании шов следует располагать симметрично относительно кромок отверстия матрицы. Когда C превышает диаметр d области равномерных деформаций в зените выпучины, шов целесообразно смещать от центра образца так, чтобы точка измерения A оказалась в области равномерной деформации (рис. 8.11, б), так же как и шов.

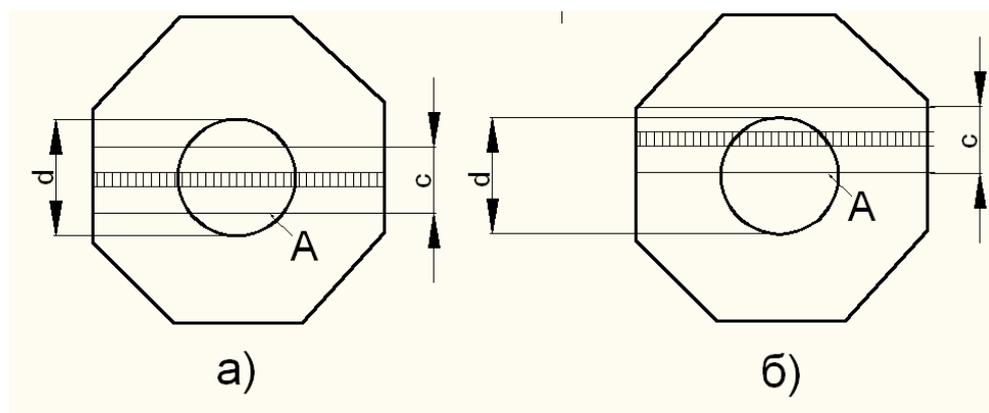


Рис. 8.11. – Выбор места для измерения толщины образца со сварным швом до и после испытания

При сопоставлении результатов испытаний соединений конкретного металла, но выполненных с использованием различных технологических приемов, удобнее пользоваться значениями пластических деформаций $e_{3nл}$ так как в момент

разрушения они различаются между собой в значительно большей степени, чем значения σ_l . При этом в качестве параметра сравнительной оценки можно использовать отношение значения e_{3nl} основного металла в образце со сварным швом к значению e'_{3nl} этого же металла, определенному на образце без сварного шва:

$$Q = \frac{\varepsilon_{3nl}}{\varepsilon'_{3nl}}.$$

Несущая способность соединений готового изделия нередко оказывается ниже, а разброс больше, чем это следует из результатов испытаний плоских образцов выпучиванием через круговое отверстие. Отсюда стремление приблизить технологию изготовления образца и условия его испытания к условиям изготовления и нагружения стенки оболочки. Применительно к стенке цилиндрической оболочки таким приближением является выпучивание сварного элемента, представляющего часть цилиндрической обечайки, из цилиндрической поверхности согласно схеме на рис. 8.6, б.

При таких испытаниях можно использовать типы образцов, показанные на рис. 8.12. Они позволяют определять несущую способность стенки цилиндрической оболочки с продольным 7, кольцевым 2 или круговым 3 швами, а также сочетаний швов. Приемы определения несущей способности таких образцов отличаются от испытаний выпучиванием плоских образцов через круговое отверстие.

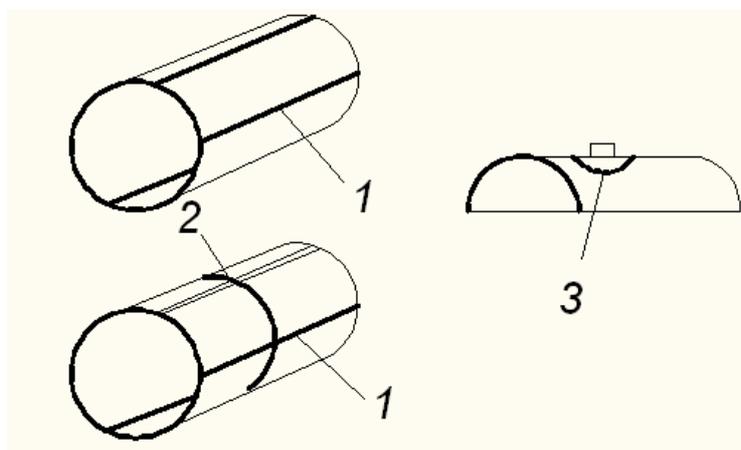


Рис 8.12. – Типы образцов в виде цилиндрической панели

Для закрепления образцов при испытаниях методом выпучивания используют различные устройства, отличающиеся в основном конструктивным исполнением таких узлов.

Установки для испытаний листового металла и сварных соединений методом выпучивания в серийном исполнении не выпускаются. На практике находят применение установки, перестроенные под испытание на выпучивание.

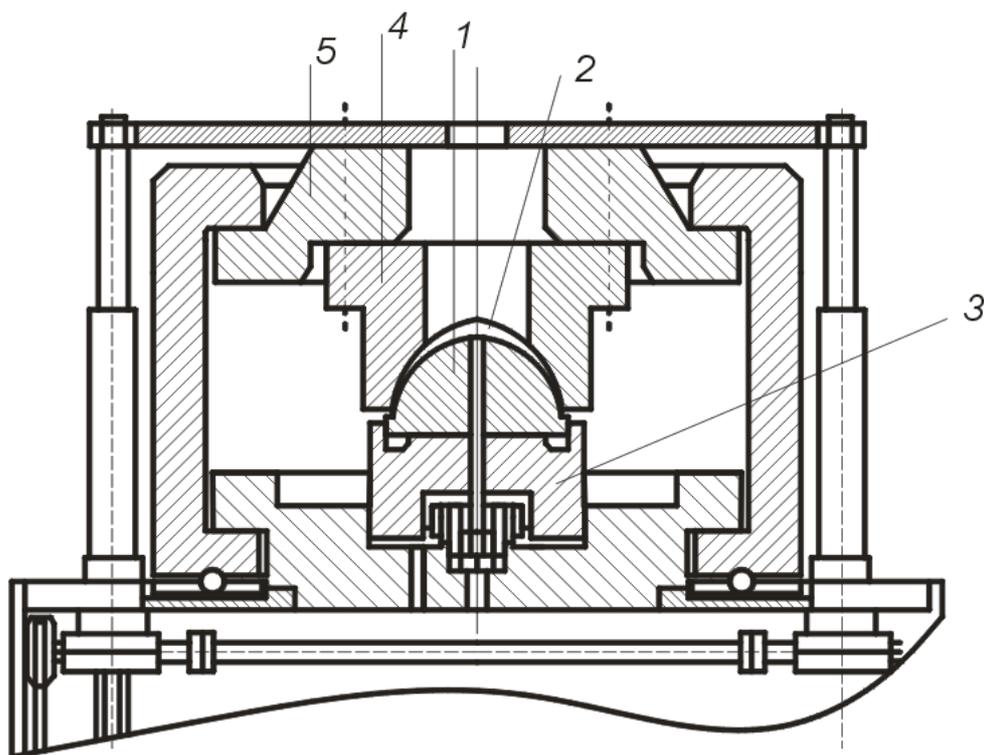


Рис. 8.13. – Схема установки УДР-1 на испытание

Переход от испытаний плоских образцов к испытаниям цилиндрических панелей на установке УДР-1 достигается использованием сменных деталей. Схема такой переналадки показана на рис.8.13. На поршень 3 устанавливают цилиндрический пуансон 2, а к верхней плите 5 крепят матрицу 4, имеющую в цилиндрической поверхности круговое или эллиптическое отверстие. Под давлением под поршень 3 образец 1 зажимают между цилиндрическими поверхностями матрицы 4 и пуансона 2, а затем подачей давления под образец осуществляют выпучивание через отверстие цилиндрической матрицы.

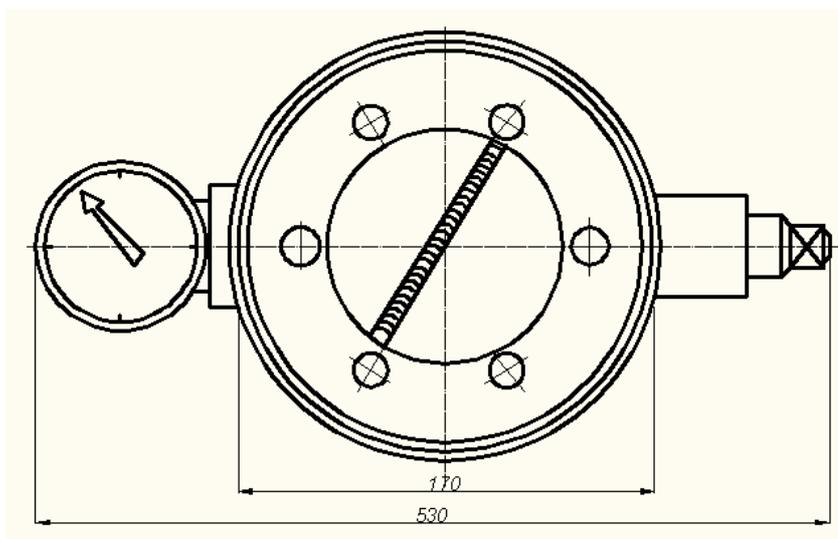
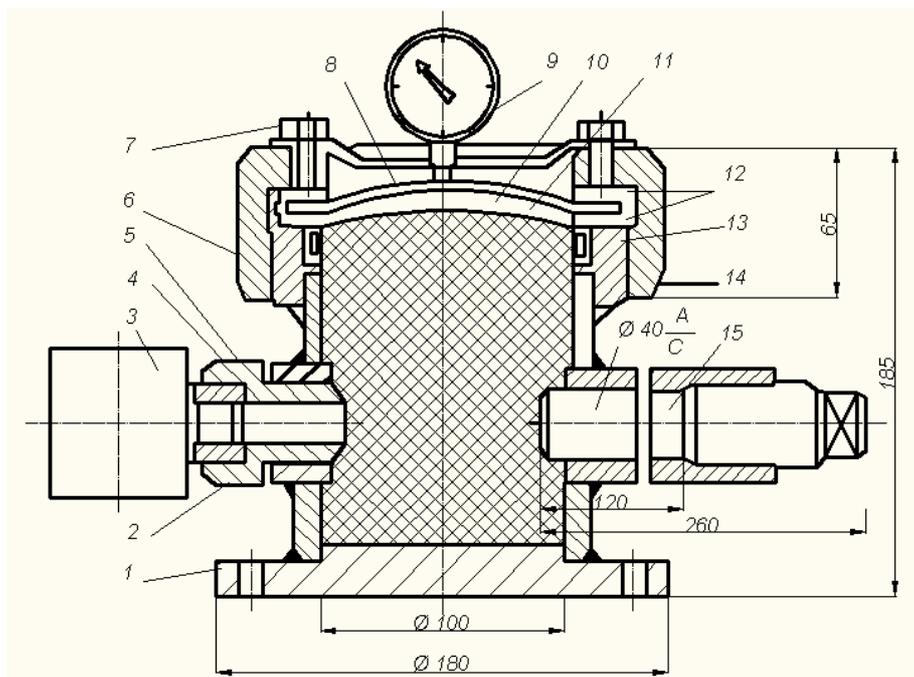


Рис. 8.14. – Нагружающее устройство ЛТП2-5:
 1 – корпус; 2 – резиновая мембрана; 3 – манометр;
 4 – переходная втулка; 5 – глицерин; 6 – запорное кольцо;
 7 – болт; 8 – образец; 9 – индикатор; 10 – резиновая прокладка;
 11 – резиновый обтюратор; 12 – закаленные нарезные кольца;
 13 – кольцо; 14 – гидропластмасса; 15 – плунжерная пара

Другой тип устройства – ЛТП2-5 нашел применение при испытаниях стыковых соединений тонколистового металла на замедленное разрушение в условиях двухосного растяжения (рис. 8.14). Образец 8 жестко закрепляют по фланцу в корпусе 1 с помощью запорного кольца 6 и болтов 7. Напряжение равномерным давлением создают гидропластмассой 14 продвижением плунжера 15. Высокое сопротивление пластмассы истечению через малые зазоры

обеспечивает сохранение заданного давления под образцом почти постоянным в течение долгого времени.

8.4. Статические и ударные испытания на одноосный изгиб

Простейшим является испытание стыкового сварного соединения на статический изгиб в соответствии с ГОСТ 6996-66. Стандартом регламентированы форма и размеры образцов для испытаний.

Образец типа XXVI – продольное расположение шва по осевой линии образца (рис. 8.15, б), типа XXVII и XXVIII имеет поперечное расположение шва, как показано на рис. 7.15, ф. Для образцов XXVII и XXVIII регламентированы радиусы опор r в зависимости от толщины a (рис. 8.15, в).

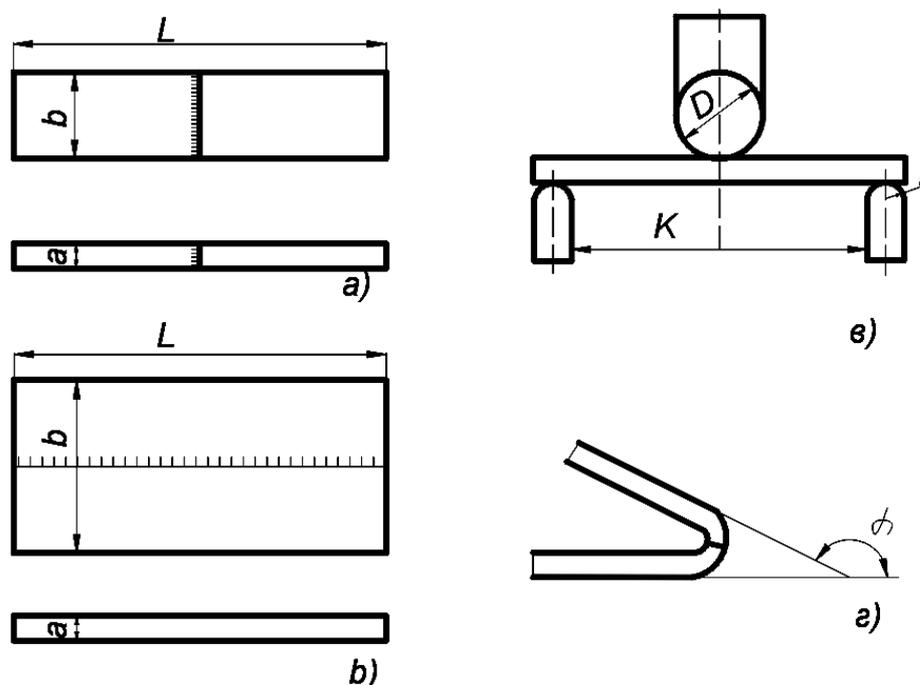


Рис. 8.15. – Образец для испытаний на определение угла загиба:
 а – с поперечным расположением шва; б – шов расположен вдоль образца;
 в – схема испытания; з – схема измерения угла α

Размер пуансона D обычно равен $2a$. Образцы перед испытанием механически обрабатывают, толщина образца должна быть равна толщине листового металла.

Испытание состоит в изгибе образца до появления трещины в растянутой зоне. Путем такого испытания определяют пластичность стыковых сварных соединений. Мерой пластичности является угол α (рис. 8.15, з), по достижении которого появляется трещина. Так как пластичность в виде угла α в расчетах не используют, то данную механическую характеристику следует рассматривать как сравнительную. В отношении испытаний образцов, вырезанных вдоль сварного

соединения, объективность результатов оценки пластичности соединения по углу загиба сомнений не вызывает. Все зоны соединения независимо от уровня прочности и пластичности деформируются при изгибе одинаково и трещина появляется в наименее пластичной зоне. Следует иметь в виду, что полная оценка может быть получена при испытании двух разновидностей образцов с растяжением лицевой и с растяжением корневой частей соединения.

При поперечном шве результат мало зависит от расположения образца под пуансоном только в случае полной механической однородности во всех зонах сварного соединения. Чем больше различия в механических свойствах отдельных зон соединения, тем в большей степени результат испытания будет зависеть от расположения образца под пуансоном. Имеется тенденция к сосредоточению изгиба в зоне с наиболее низким пределом текучести металла. Если эта зона оказывается под пуансоном, то она в основном и воспринимает деформацию изгиба. Более прочные, но, как правило, менее пластичные зоны деформируются при этом меньше. Если под пуансоном расположить более прочную зону, то при значительной разнице в механических свойствах можно даже наблюдать, как деформируются соседние, более мягкие зоны соединения, в то время, как более твердый участок не прилегает по всей поверхности пуансона и испытывает меньшую деформацию, чем следовало бы в случае полной механической однородности.

При высокой пластичности металла трещина может не появляться вплоть до α , равного 180° . Поэтому сравнение вариантов сварных соединений с высокой пластичностью оказывается невозможным при использовании данного метода.

Испытания металлов на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах проводят в соответствии с ГОСТ 9454-78. Имеется 20 типов образцов, первые 19 имеют вид, показанный на рис. 7.16, а. Длина их 55 мм. Отличаются образцы между собой видом надреза, который может быть U – образным (тупым), V – образным (острым) и в виде трещины, а также размером ширины B , которая составляет 10, 7,5, 5, 2 мм соответственно. Высота H равна 10 мм, кроме образцов шириной 2 мм, у которых высота 8 мм и 9 мм. Размеры надрезов показаны на рис. 8.16, б, в, г, размер h для ряда образцов равен 3 мм.

Образцы длиной 55 мм устанавливают на опоры, расстояние между которыми 40 мм. Удар наносится со стороны, противоположной надрезу. Мерой ударной вязкости является работа разрушения образца, отнесенная к начальной площади поперечного сечения образца. Ударная вязкость обозначается KC , а с учетом вида надреза – KCU , KCV , KCT ; последнее обозначение относится к образцам с трещиной.

В применении к сварным соединениям используют те же образцы, что приведены в ГОСТ 9454-78, но процедура вырезки образцов и расположение надреза регламентированы ГОСТ 6996-66. Надрезы могут создаваться в различных зонах сварного соединения: по шву (вдоль и поперек слоев), по линии сплавления, по зоне, нагревавшейся до определенной температуры и т.д.

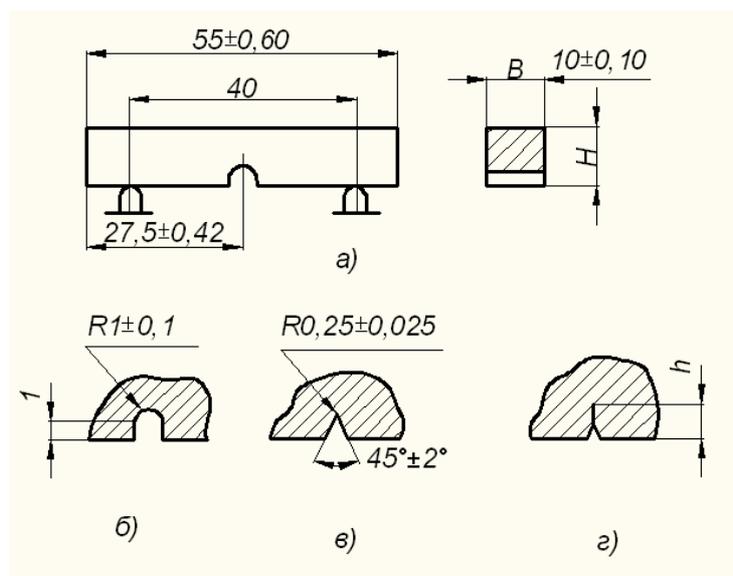


Рис. 8.16. – Типы образцов для испытаний на ударный изгиб

Разработаны нестандартные методы испытаний сварных соединений на статический и ударный изгиб с использованием образцов, содержащих естественную концентрацию напряжений.

Рассмотрим вначале метод испытаний для определения пластичности зоны перехода от наплавленного металла к основному для стыковых соединений и соединений с угловыми швами. В простейшем варианте для сравнительных оценок металлов, режимов сварки и термических обработок, а также форм перехода от швов к основному металлу, может быть использована форма образцов, представленная на рис. 8.17, б. Размеры образцов для толщин δ от 4 мм до 40 мм: $B = 5 \delta$, $b = 2,5 \delta$, $r = \delta/2$ для всех δ . Испытание состоит в консольном изгибе образца до появления трещины. Размер b взят превышающим толщину в 2,5 раза для того, чтобы в средней части по ширине образца обеспечить условия плоской деформации при изгибе, т.е. $\varepsilon_k = 0$. Результаты измерений деформаций ε_k после изгиба образцов показали, что они действительно близки к нулю на большей части ширины образца, а у боковых поверхностей выточек, где $\sigma_k = 0$, они отклоняются от нулевых значений, так как в этой зоне имеет место переход от плоского напряженного состояния (на поверхности выточек) к плоскому деформированному состоянию (средняя часть, где $\varepsilon_k = 0$). Присутствие выточек, которые создают ненужную дополнительную концентрацию пластических деформаций ε_k на боковых поверхностях, является вынужденной мерой, так как без выточек в деформации участвует слишком большой участок образца в направлении размера l (рис. 8.17, в).

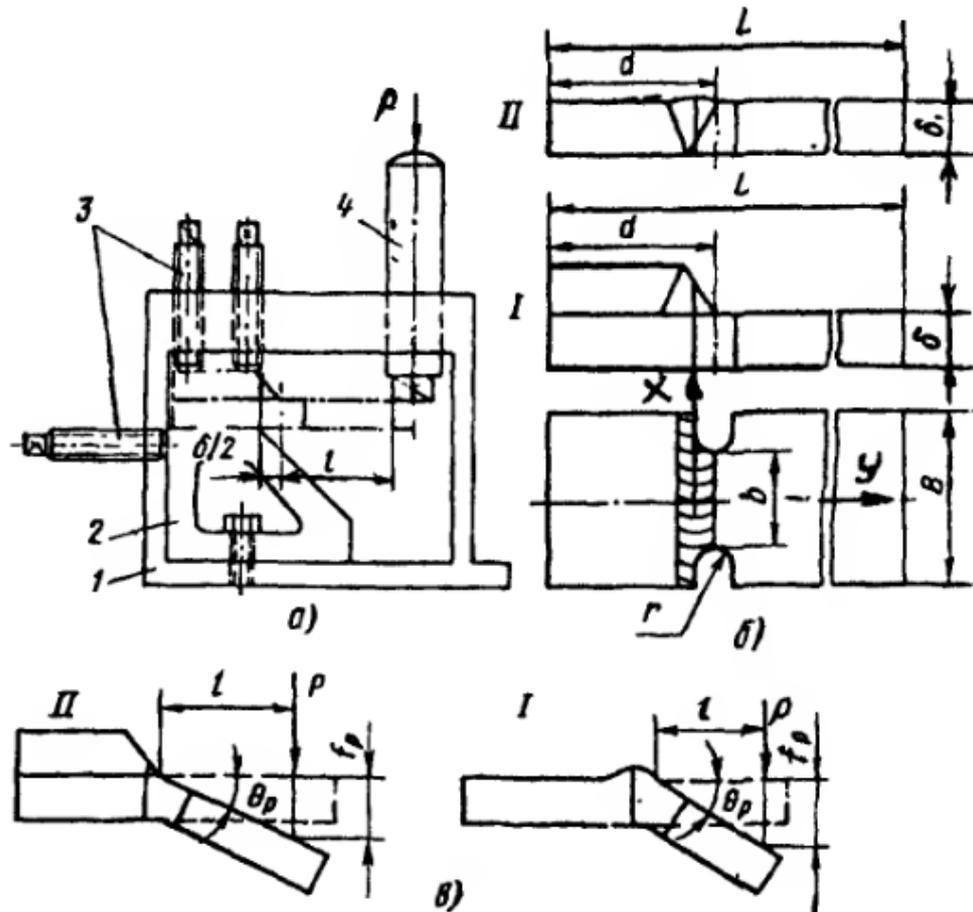


Рис. 8.17. – Схема испытания:

a) сварного соединения для определения угла изгиба:

1 – корпус; *2* – опора; *3* – упорные болты; *4* – шток.

Типы образцов (*б*): *I* – с угловым швом; *II* – со стыковым швом.

Вид образцов после испытания (*в*).

В качестве меры пластичности испытываемой зоны соединения принят угол Θ_p , при котором появляется трещина. Он определяется из геометрического соотношения между прогибом f_p и плечом консоли l , взятым условно до линии сплавления, а не до точки края опоры (рис. 7.17, *в*):

$$\Theta_p = \operatorname{arctg} \frac{f_p}{l}.$$

При наличии усиления у стыкового шва, а тем более в образце с угловым швом, отличие фактического угла Θ_p от рассчитанного по данной формуле невелико. Наличие формулы позволяет определять значения Θ_p и при хрупких разрушениях образцов, когда вследствие полного разделения образца определять Θ_p по положению плоскостей двух частей образца не удастся.

Средняя разрушающая деформация ε_{cp} с невысокой точностью может быть определена по следующей приближенной формуле:

$$\varepsilon_{cp} \approx \frac{\Theta_p}{2}.$$

Данная формула получена в предположении, что деформации ε_y , вызывающие поворот Θ , распределены равномерно в пределах участка выточки $2r$. В действительности фактическое значение k больше, чем найденное по последней формуле, так как деформации распределены на длине $2r$ неравномерно.

По сравнению с основным металлом сварные соединения при использовании описанного метода испытаний могут иметь существенно более низкую пластичность. Ее снижение можно характеризовать коэффициентом снижения пластичности соединения:

$$\eta_{пл} = \frac{\varepsilon'_{cp}}{\varepsilon_{cp}},$$

где ε'_{cp} , ε_{cp} – средняя разрушающая деформация сварного соединения и основного металла соответственно.

Испытания по определению Θ_p могут быть выполнены и без использования специального приспособления (рис. 8.17, а) на стандартных испытательных машинах, способных создавать сжатие. Схема такого испытания представлена на рис. 8.18. В этом случае число образцов оказывается вдвое большим, чем описано выше. Два одинаковых образца 4 (рис. 8.18, а) должны быть либо стянуты накладками 2 и 5, либо сварены по стыку 3. Пуансон 1 испытательной машины должен быть плоским и достаточно широким (размер b), чтобы обеспечить поступательное движение накладки 2 без ее поворота. Тогда углы изгиба Θ у левого и правого образцов окажутся одинаковыми вплоть до появления трещины у одного из них или у обоих сразу. Ширина накладки 2 должна соответствовать положению краев выточек у образцов.

Испытание нахлесточных соединений может быть выполнено также по схеме на рис. 7.18, а или по схеме на рис. 7.18, б. В последнем варианте образцы либо предварительно сварены по стыку 3, либо специально изготовлены как единое целое.

Более информативным, но и более сложным является определение ε_{cp} при статическом изгибе путем регистрации деформации ε_δ на так называемой характерной базе, расположенной на тыльной гладкой стороне образца напротив линии сплавления (рис. 8.18, з). Все остальные элементы испытания, описанные выше и касающиеся схемы нагружения, установки и закрепления образцов, остаются без изменения. Характерная база ε_δ должна иметь размер AB не более $0,25 \delta$ и располагаться в средней по ширине части образца, где имеется плоское деформированное состояние. Увеличение размера AB более чем $0,25 \delta$ приводит к включению в базу измерения участков, которые имеют меньшую деформацию, чем в средней части базы AB .

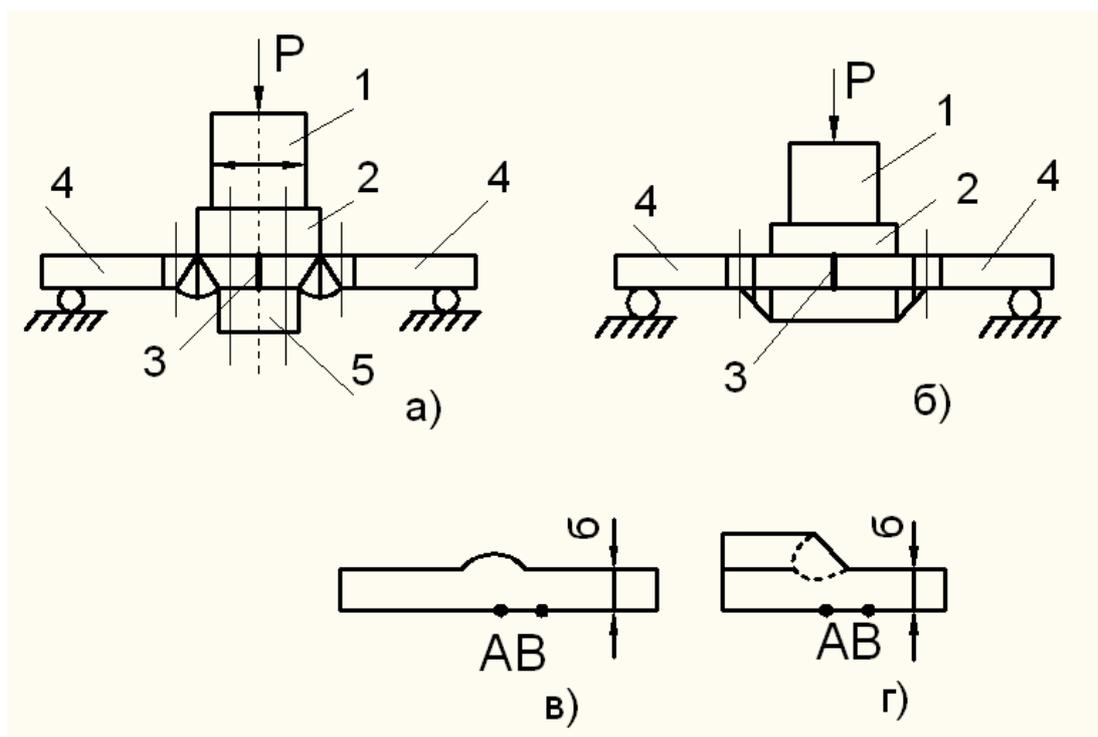


Рис.8.18. – Спаренные образцы для испытаний на изгиб:

а – со стыковым швом; *б* – с угловым швом;
в, *г* – расположение базы на образцах

Между значениями ε_{δ} и ε_{cp} имеется связь, установленная экспериментально и расчетно, путем решения упругопластических задач методом конечных элементов. Для стыковых швов $\varepsilon_{cp} = 1,0 \dots 1,1 \varepsilon_{\delta}$, для соединений с угловыми швами $\varepsilon_{cp} = 1,2 \dots 1,3 \varepsilon_{\delta}$.

Если образец разрушается хрупко, что не позволяет остановить нагружение в момент появления трещины, то испытания должны проводиться с использованием спаренных образцов (рис. 8.18). Неразрушенный образец из пары скрепленных является образцом-свидетелем.

Рассмотренные выше различные приемы определения пластичности сварных соединений по зоне перехода шва к основному металлу могут быть использованы и для определения свойств металла вблизи непровара в стыковых соединениях.

При проведении ударных испытаний практически не удастся прекратить нагружение в момент появления трещины в сварном соединении. Обычно используют запись процесса нагружения с последующим отысканием точки на диаграмме, где появилась трещина. При хрупких разрушениях на диаграммах имеются четкие признаки, свидетельствующие о появлении трещины. При вязких и вязкохрупких формах разрушения начальная стадия появления трещины фиксируется плохо.

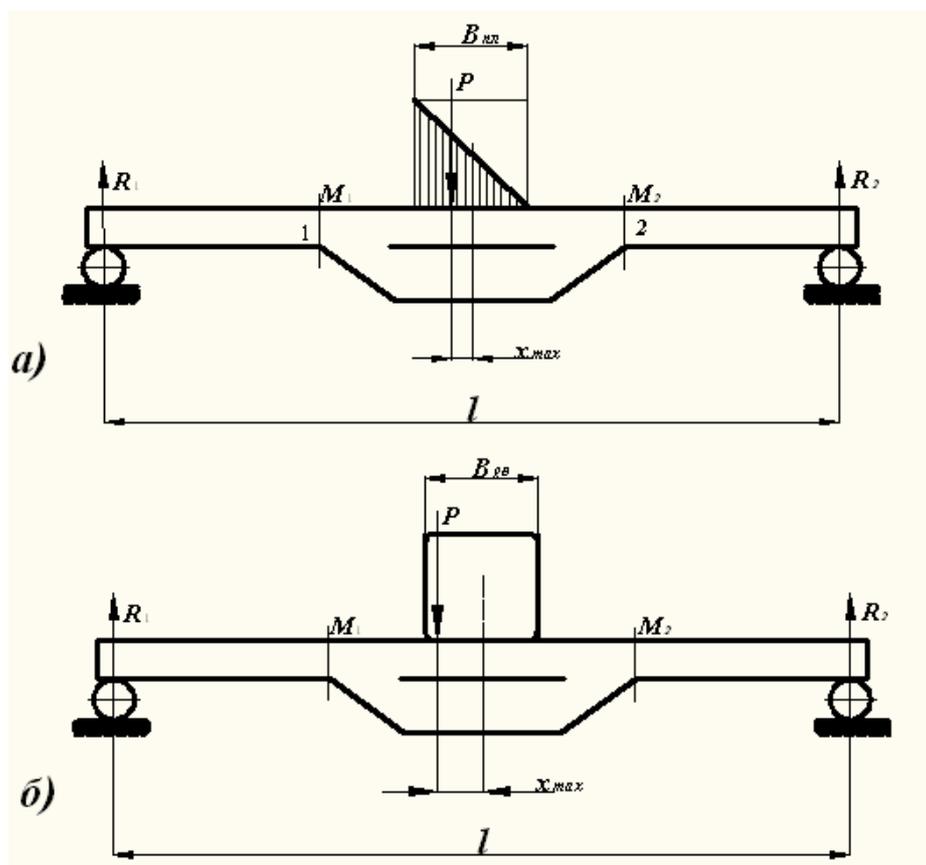


Рис. 8.19. – Величина смещения (X_{max}) равнодействующей силы P в зависимости от конструкции бойка:
 а – плоский боек; б – двухопорный боек

Механический метод прекращения деформации образца при ударном нагружении с использованием спаренных образцов является практически единственным путем получения данных о пластичности соединений при ударе. Прекращение деформации одного из образцов можно обеспечить на основе принципа саморегулирования силовых факторов. Так, если использовать плоский широкий пуансон (рис.8.19, а), то в процессе нагружения обеспечивается в определенных пределах равенство упругопластических деформаций образцов при их совместном нагружении. Объясняется это тем, что при различном сопротивлении деформации у левого и правого образцов прямоугольная эпюра нагрузки q превращается в трапецевидную при совершенно незначительном увеличении деформации одного из образцов (в примере на рис. 8.19, а – правого). Смещение равнодействующей силы P влево увеличит реакцию R_1 , по сравнению с R_2 , что увеличит отношение M_1 / M_2 , т.е. приведет к возрастанию деформации левого образца и практическому выравниванию деформации в обоих образцах. В этом состоит так называемый принцип саморегулирования деформаций образцов, причем двухопорный пуансон (рис. 8.19, б) оказывается более практичным. Если исходить из условий прекращения процесса саморегулирования в момент, когда $q = 0$ в крайней точке, то требуемая ширина пуансона равна:

для плоского пуансона:

$$B_{nl} = 3l \frac{A-1}{A+1},$$

для двухопорного пуансона:

$$B_{д} = l \frac{A-1}{A+1} + a,$$

где $A = \frac{M_B}{M_M}$ – коэффициент, показывающий отношение моментов в ослабленных сечениях у более прочного M_B и менее прочного M_M образцов, до которого должен действовать принцип саморегулирования. Если A взять большим и соответственно B также большим, то все пары образцов будут давать разрушение обоих образцов. Если взять A и B слишком малыми, то во всех случаях будет разрушаться только один образец в паре, что не будет гарантировать близость деформации неразрушенного образца и критической (разрушающей) деформации другого образца. Анализ результатов исследования показал, что испытание пары образцов сосредоточенной силой для получения деформационных критериев по образцу – свидетелю, как это принято в методе Каназава для определения δ_C , является некорректным.

8.5. Испытания на статический и малоцикловый двухосный изгиб

Двухосный изгиб характерен для стенок оболочек с элементами жесткости при нагружении их наружным или внутренним давлением. Несущая способность и долговечность таких конструкций в значительной степени определяется технологией выполнения сварных соединений и состоянием поверхности листовых элементов. Имитация условий, близких к работе реальной конструкции, наиболее просто и полно достигается при испытаниях плоских круглых дисков натурной толщины, шарнирно опираемых по круговому контуру матрицы.

Статическое нагружение центральной силой (рис. 8.20, *a*) иногда используют для оценки сопротивления материала хрупкому разрушению. Более характерны два других типа испытания:

- 1) на замедленное разрушение при статическом нагружении с выдержкой под постоянной нагрузкой в течение заданного времени или до разрушения;
- 2) на малоцикловую усталость, когда нагрузка изменяется по заданной программе.

Стандарты на такие испытания отсутствуют.

При испытаниях на замедленное разрушение нагружение малогабаритного образца 3 можно осуществить механическим путем (рис. 8.20, *a*) при помощи винта 1 через опорный диск 2. Выпуклая поверхность образца 3, ограниченная диаметром опорного диска, находится в условиях двухосного осесимметричного

напряженного состояния с растягивающими компонентами напряжения. Дисковый образец может иметь диаметральный прямой или круговой шов. Заданный уровень напряжения на поверхности обеспечивают либо расчетным определением требуемого изгиба, либо тензометрированием. Результаты таких испытаний позволяют судить о стойкости сварных соединений против замедленных разрушений в зависимости от материала, технологии сварки, уровня остаточных напряжений, присутствия коррозионной среды.

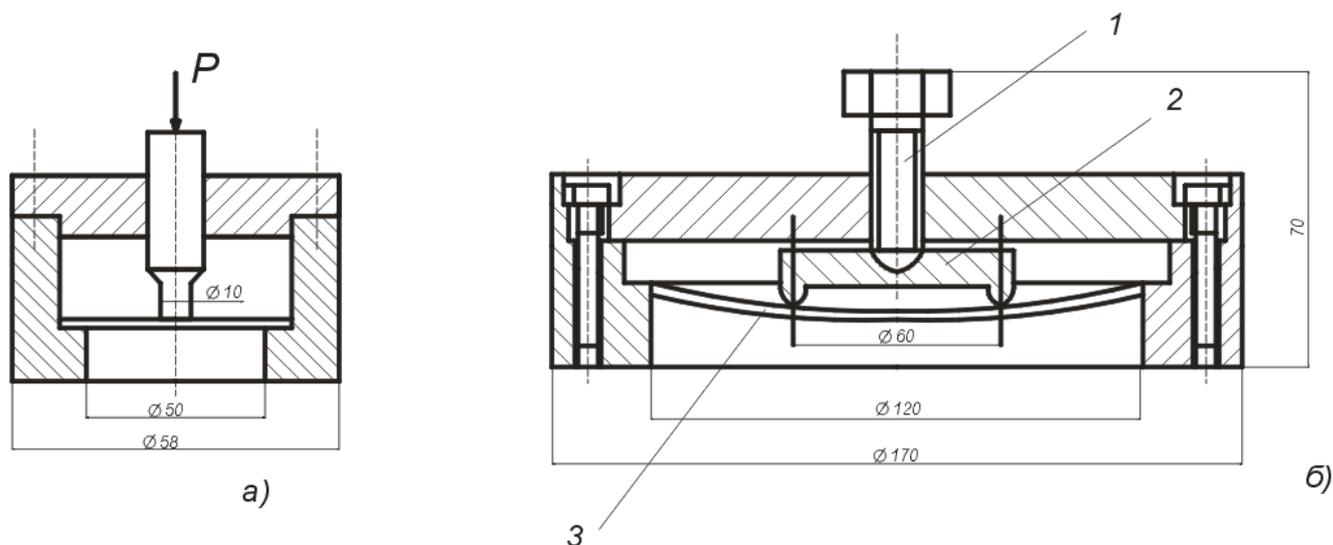


Рис. 8.20. – Приспособления для нагружения малогабаритных дисковых образцов на двухосный изгиб

При испытаниях на малоцикловую усталость применительно к оценке сопротивления возникновению и росту поверхностных трещин в сварных соединениях оболочковых конструкций с толщиной стенки 10...100 мм наиболее подходящей является схема двухосного изгиба. При этом осуществляется подача жидкости для образования давления в полости под дисковым образцом, как показано на рис. 8.21. Эта схема целесообразна при исследовании действия коррозионной среды. Здесь для оценки работоспособности листового металла и сварных соединений должно быть обеспечено требуемое поле растягивающих напряжений именно на поверхности соприкосновения металла со средой. При этом распределение напряжений по толщине металла имеет меньшее значение. Это позволяет существенно упростить испытательное оборудование, используя двухосный изгиб вместо двухосного растяжения при испытаниях элементов значительной толщины.

Для исследования зарождения и развития разрушения в элементах корпусных конструкций разработаны установки, позволяющие производить испытания дисковых образцов диаметром 240...1300 мм. Так, установка УДИ-15 (рис. 8.21) позволяет испытывать образцы диаметром 1300 мм, толщиной до 100 мм. Внутри массивного кольца 1 располагается жесткое днище 2 с уплотнением 9 и штуцером для подачи нагружающей жидкости. Сверху внутрь кольца 1 укладывают образец 3

и обод 4, после чего в пазы кольца 1 заводят сегменты 5, закрепляя их нажимными болтами 6 обода 4. Уплотнения 7 и 8 герметизируют полость под образцом и при подаче давления в эту полость обод 4 с сегментами 5 служат кольцевой опорой, обеспечивающей нагружение образца 3 по схеме двухосного изгиба. Опускание образца 3 внутрь кольца 1 перед испытанием и подъем его после испытания обеспечивает домкратное устройство 11. Перед подачей рабочего давления от гидроаккумулятора поршни 10 приподнимают образец 3 до соприкосновения с уплотнением 7.

Разделение процесса разрушения на стадии зарождения и развития трещины имеет условный характер. Применительно к малоцикловому нагружению элементов с механически необработанной поверхностью наиболее приемлемым становится визуальный метод обнаружения трещины с использованием лупы с 5...10 – кратным увеличением. При наличии исходного надреза нередко используют датчик с упругим элементом, фиксирующий раскрытие берегов этого надреза. При постоянной амплитуде малоциклового нагружения размах раскрытия на стадии зарождения трещины практически не изменяется. Поэтому начало его увеличения свидетельствует, что трещина возникла.

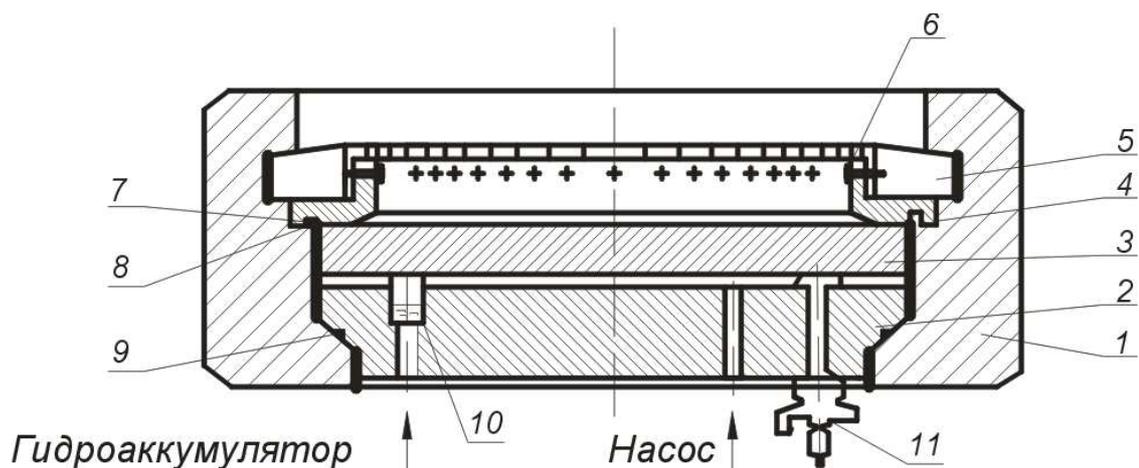


Рис. 8.21. – Схема установки для испытаний крупногабаритных дисковых образцов в условиях двухосного изгиба, в том числе при наличии коррозионной среды

Рассмотренную схему испытаний толстолистовых дисков двухосным изгибом эффективно используют для экспериментального обоснования тех или иных конструктивно-технологических решений.

8.6. Испытания сварных узлов стержневых конструкций из труб

Для многих стержневых конструкций целесообразно применение трубчатых элементов, сварные соединения которых в условиях эксплуатации подвержены

воздействию не только статических, но и периодических нагрузок. К таким сооружениям можно отнести элементы наружной рекламы мачтового типа.

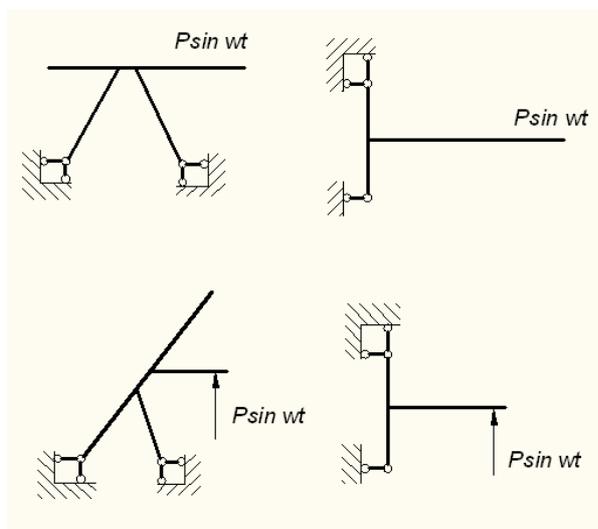


Рис.8.22. – Схемы нагружения К – образных (а, в) и Т – образных узлов из труб

Применительно к таким конструкциям возникает необходимость прогнозирования степени надежности, долговечности и прочности на стадии их проектирования. Для анализа напряженно-деформированного состояния в зоне узловых соединений трубчатых элементов все больше используют численные методы. Однако моделирование напряженно – деформированного состояния затруднено значительными градиентами напряжений, как по толщине стенки трубы, так и вдоль сварных швов. В таких соединениях наблюдается различие в геометрических размерах элементов, а также наличие остаточной напряженности.

Это предопределяет необходимость проведения натуральных испытаний трубчатых узлов с использованием специальных устройств для оценки сопротивления усталости и кинетики разрушений.

Примером такого испытательного оборудования может служить стенд для испытаний Т и К – образных сварных узлов из труб при нагружении их осевым усилием или изгибающим моментом. Конструкция стенда предусматривает сочетание кинематического и резонансного способов нагружения, позволяющее снизить нагрузки $P_в$ на возбудитель колебаний динамической системы при заданных значениях нагрузки P_0 на объект испытаний в 22,5...60 раз. Предусмотренная унификация основных узлов и устройств стенда позволяет осуществлять их комплектацию для воспроизведения требуемых схем нагружения.

Некоторые из таких схем приведены на рис. 8.22. Применительно к нагружению К – образных соединений осевыми усилиями (рис. 8.22, а) принцип работы стенда поясняет рис. 8.23.

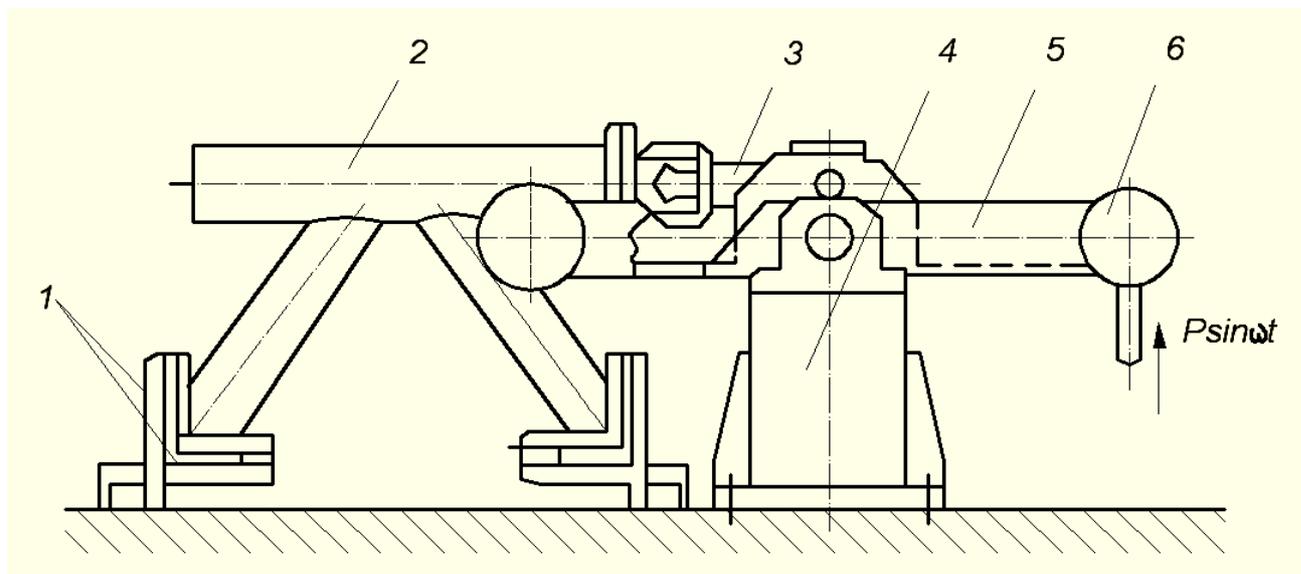


Рис. 8.23. – Схема устройства для испытаний на усталость
К – образных узлов из труб

Возбуждаемые кривошипным механизмом циклические нагрузки $P \sin \omega t$ устройством кинематического усиления в виде двулучевого рычага 5 на опоре 4 передаются через шатун 3 на узел 2, закрепленный в безмоментных динамометрических опорах 1. С помощью динамометрических опор измеряют вертикальные и горизонтальные составляющие опорных реакций. Сменные грузы 6 служат для введения системы в режим резонансных колебаний. При осевом нагружении усилием 200 кН нагрузка на шатун возбудителя не превышает 4 кН.

8.7. Статические испытания угловых швов

Виды образцов и характер нагружения зависят от целей проводимых испытаний. Эти цели могут быть следующие:

1. Контрольная оценка (проверка) уровня прочности и пластичности угловых швов в связи с возможными изменениями качества сварочных материалов, режимов сварки и термической обработки, квалификации сварщиков, а также при выборе сварочных материалов и технологии сварки, обеспечивающих требуемую прочность шва.

2. Определение уровня прочности и пластичности угловых швов для установления допускаемых напряжений или нагрузок в швах в расчетах на прочность.

3. Определение предельно низких температур, до которых можно считать правомерным использование установленных при комнатных температурах значений прочности и пластичности угловых швов.

4. Проведение исследований для установления ранее неизвестных особенностей угловых швов.

При использовании испытаний в практических целях для сравнения технологий и режимов сварки необходимо ориентироваться на простые и экономичные образцы. При этом желательно, чтобы в качестве сварной заготовки можно было использовать элемент, изготавливаемый в производстве детали.

Для определения уровней прочности и пластичности, используемых в расчетах, также целесообразно изготавливать образцы из элементов производственных деталей, чтобы технология получения заготовок практически ничем не отличалась от заводской. Кроме того, необходима унификация этих испытаний с целью возможности сравнения между собой их результатов, полученных в различных лабораториях.

Следует различать испытания сложных сварных соединений с угловыми швами и испытания собственно угловых швов, то есть простейших сварных соединений со швами. Рассмотрим испытания угловых швов.

Рекомендуемые типы образцов (рис. 8.24) предназначены для определения механических свойств угловых швов при простейших схемах их нагружения, соответствующих как минимальным, так и максимальным значениям прочности и пластичности.

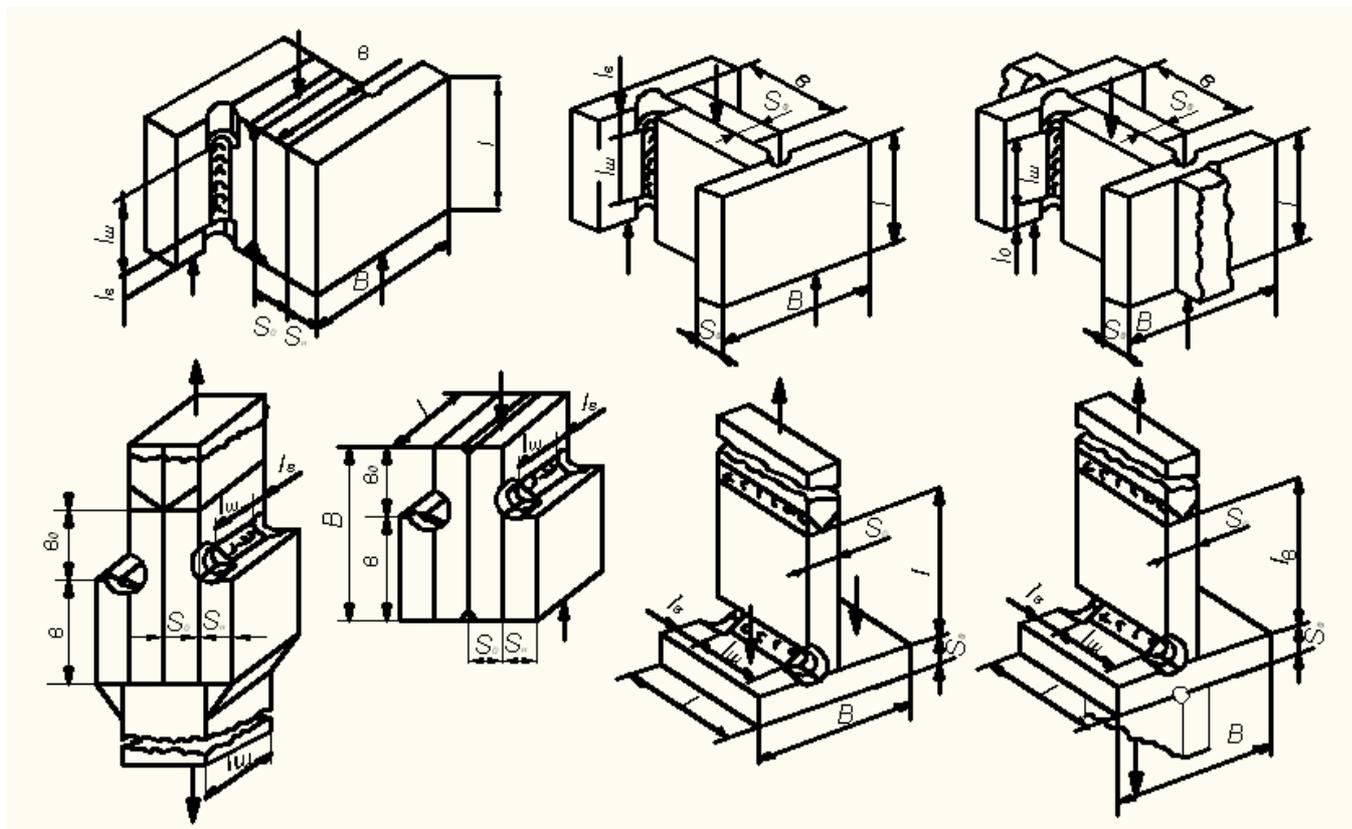


Рис. 8.24. – Типы образцов для определения механических свойств угловых швов при различных схемах нагружения

При испытании определяется прочность и пластичность, как самих швов, так и околошовных зон, то есть прочность и пластичность наименее прочного сечения. При определении механических свойств конкретной зоны соединения желательно,

чтобы остальные участки, кроме определяемого, имели большую прочность. Этого обычно достигают подбором основного и присадочного металла, а также режимов сварки. При этом выбор размеров и формы образцов должен, как правило, обеспечивать достаточно равномерное распределение нагрузки по длине шва, а также отсутствие смятия на опорных поверхностях.

Образцы, предназначенные для отработки технологии сварки, обеспечивающей необходимые свойства швов, следует изготавливать из элементов, сваренных без изменения режима сварки. При этом длина швов, свариваемых на каждом из режимов, должна быть не менее 75 катетов, с тем, чтобы можно было изготовить комплект образцов (не менее трех).

Как было установлено исследованиями, наличие зазора между сваренными угловым швом пластинами увеличивает прочность и пластичность шва. Поэтому для определения минимально возможной прочности и пластичности швов необходимо собирать и сваривать пластины без зазора.

Рассматриваемые образцы и методы испытаний сводят к минимуму влияние длины углового шва на прочность в случае работы его на продольный срез. Это сделано специально. Влияние длины должно учитываться либо расчетным путем, либо определяться специальными испытаниями. При пластичных формах разрушения, обычно используемых сравнительно коротких швов, влияние длины на прочность и пластичность относительно невелико.

С другой стороны, использование очень коротких швов приводит к существенному увеличению влияния концов шва на его прочность. Поэтому целесообразно взять минимальную длину, при которой заметное влияние концов еще не ощущается. В случае использования схемы кручения кольцевые угловые швы в соединениях внахлестку на трубах позволяют полностью исключить как влияние концов швов, так и неравномерность сил по длине. Однако, образцы из труб металлоемки, технология их сварки может отличаться от применяемой на прямолинейных швах и исказить результаты испытаний. Кроме того, основной металл труб может не совпадать с исследуемым листовым металлом, а возможное трение между трубами вносит некоторые неточности в результаты.

Характерной особенностью образцов для испытаний является то, что в них входят по два одинаковых элемента, образующих пару. Эти элементы вырезаются из длинных сварных заготовок. Толщины основных пластин, накладок и ребер (s_0 , s_H , s_p) лучше брать не менее 1,6 k , так как в этом случае в пластическую деформацию не включаются основные элементы. Минимально допустимая толщина пластин, очевидно, равна катету шва.

Все размеры элементов выбираются в зависимости от катета шва. Если катеты не равны, то в качестве "к" принимается меньший из катетов. Рекомендуемые соотношения следующие: $l_{ш} = 5 k$, $l_{об} = 10 k$, $B = 13,5 k$, $b = 9 k$, $l_b = 2,5 k$. Для обеспечения разрушения образца по шву или околошовной зоне в образцах предусмотрено ослабление сечения, выполняемое путем фрезерной обработки. Форма углубления показана на рис. 8.25. Вырез должен захватывать шов и основной металл на ширину $r = (0,1 k + 1)$ мм. Границы шва могут быть выявлены травлением. При выполнении вспомогательных швов, соединяющих

парные элементы, целесообразно проводить охлаждение образца, чтобы избежать влияния непредусмотренного повторного нагрева швов, подлежащих испытанию.

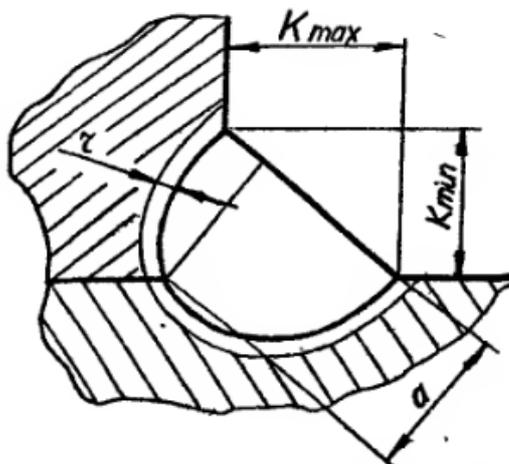


Рис. 8.25. – Форма сечения углового шва после фрезеровки его торца

Скорость перемещения захватов испытательной машины должна обеспечивать статическое нагружение (не более одного катета в минуту).

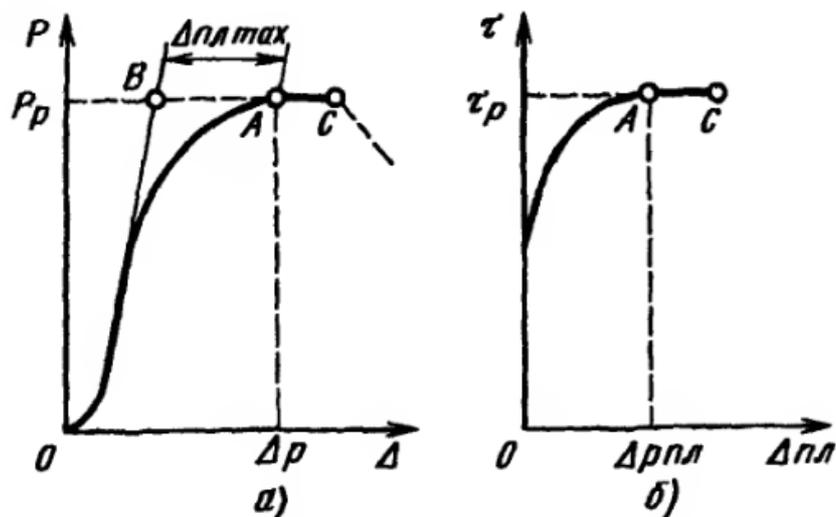
Во время испытаний диаграмму в координатах сила – перемещение следует записывать вплоть до разрушения образца. При испытаниях на сжатие перемещения можно измерять по траверсам испытательной машины. При испытаниях на растяжение, из-за возможности проскальзывания губок захватов относительно образца, измерения перемещений целесообразно выполнять непосредственно с помощью датчика перемещений.

Перед испытаниями необходимо измерить суммарную длину испытываемых швов $l_{ш\Sigma}$, среднее значение катета k по длине швов и минимальный размер a , определяемый на торцах по концам шва после травления (рис. 8.25). Значение β можно получить как отношение a/k .

В результате испытания получается диаграмма в координатах $P - \Delta$ (рис. 8.26, а, б). Значение разрушающей нагрузки P_p находится по точке максимума на диаграмме. Значение Δ_p определяется по началу горизонтального участка, если он имеется, или по точке максимума силы. Для получения пластической составляющей перемещения A_{JVL_p} проводят луч в точку B .

По результатам испытания определяют прочность единицы длины шва:

$$T_p = \frac{P_p}{l_{ш\Sigma}}.$$

Рис. 8.26 – Диаграмма в координатах $P - \Delta$

При разрушении образца по шву можно определить условное разрушающее напряжение в шве:

$$\tau_{рш} \approx \frac{T_p}{\beta \cdot k}.$$

Минимальное значение T_p , которое чаще всего обнаруживается при испытании на продольный срез, используют для получения допустимого напряжения.

Рассмотренные виды образцов позволяют определить прочность швов при углах $\alpha = 0, 90^\circ, 180^\circ$. Для построения диаграммы прочности при других углах действия силы необходимо иметь более сложные образцы.

8.8. Контрольные вопросы

1. Для чего предназначены статические испытания на растяжение?
2. Поясните зависимость истинных напряжений от пластических деформаций для стали 20Г2.
3. Какие образцы используют для проведения испытаний стыковых сварных соединений?
4. Для чего предназначены статические испытания на двухосное растяжение стыковых сварных соединений?
5. В чем преимущества метода выпучивания при проведении статических испытаний на двухосное растяжение?
6. Поясните схему проведения испытаний плоского образца через круговое отверстие методом выпучивания.
7. Как проводят испытания путем ступенчатого нагружения?
8. Как работает датчик для измерения деформации, давления?
- 8.9. Поясните зависимости $\sigma_i = f(\epsilon_i)$, полученные при двухосном растяжении $\sigma_2 = \sigma_1$ методом выпучивания листовых образцов из стали 12Х18Н10Т.
10. Поясните схему определения несущей способности сварного соединения при испытании образца со сварным швом в условиях двухосного растяжения.
11. Как определяют место для измерения толщины образца со сварным швом до и после испытания?
12. Поясните работу установки ЛТП2-5 при испытаниях стыковых соединений тонколистового металла на замедленное разрушение в условиях двухосного растяжения.
13. Как проводят испытание стыкового сварного соединения на статический изгиб?
14. Что применяют в качестве меры пластичности испытываемой зоны сварного соединения? Поясните.
15. Как определяют среднюю разрушающую деформацию?
16. Как проводят испытания по определению Θ_p без использования специального приспособления на стандартных испытательных машинах?
17. Как проводят ударные испытания сварных соединений?
18. Как проводят испытания на замедленное разрушение при статическом нагружении с выдержкой под постоянной нагрузкой в течение заданного времени?
19. Как проводят испытания на малоцикловую усталость, когда нагрузка изменяется по заданной программе?

20. Как проводят испытания сварных узлов стержневых конструкций из труб?
21. Какие цели преследуют при проведении статических испытаний угловых швов?
22. Как проводят статические испытания угловых швов?

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. **Надежность технических систем: Справочник** / Ю. К. Беляев, В. А. Богатырев, В. В. Болотин и др.; Под ред. И. А. Ушакова. — М.: Радио и связь, 1985.— 608 с, ил.
2. Капур К., Ламберсон Л. **Надежность и проектирование систем**: Пер. с англ./Под ред. И. Л. Ушакова. - М.: Мир. 1980.
3. **Несущая способность и расчет деталей машин на прочность**. Руководство и справочное пособие. Изд. 3-е, перераб. и доп. Под ред. С. В. Серенсена. - М, «Машиностроение», 1975.
4. Когаев В. П., Махутов Н. А., Гусенков А. П. **Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность**: Справочник — М.; Машиностроение, 1985. — 224 с, ил. — (Основы проектирования машин).
5. **Надежность технологического оборудования: лабораторные работы** /авт.-сост.: СИ. Пестрецов, В.Я. Борщев. ВЛ. Долгунин. Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2005.36 с.
6. Шнейдерович Р. М. **Прочность при статическом и повторно-статическом нагружениях**. Изд-во «Машиностроение», 1968 г., стр. 343.
7. **Сварные конструкции. Механика разрушения и критерии работоспособности** / В.А. Винокуров, С.А. Куркин, Г.А. Николаев; Под ред. Б.Е. Патона — М.: Машиностроение. 1996. - 576 с.
8. Рудобашта С.П., Долгунин В.Н. **Надежность и долговечность машин и аппаратов химических производств: Текст лекций**. М: МИХМ. 1984. 48 с.
9. Зубова А.Ф. **Надежность машин и аппаратов химических производств** - Л.: Машиностроение. 1978. - 215 с.
10. Базовский И. **Надежность. Теория и практика**. - М.: Мир. 1965, - 373 с..
11. **Сборник задач по теории надежности** / Под редакцией А. М. Половко и И. М. Маликова. М.: Советское радио, 1972.
12. **Механические свойства металлов: Учебник для вузов**. 2-е изд. Золоторевский В. С - М.: Металлургия, 1983. 352 с.

13. В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский. **Сопротивление усталости металлов и сплавов.** – Киев: Наукова думка. 1987. - 348 с.

14* . **Надежность машин.** / Д.Н. Решетов, А.С. Иванов, В.З. Фадеев. — М.: Высшая школа. 1987. - 236 с.