

КУРС ЛЕКЦИЙ-ПРЕЗЕНТАЦИЙ
по дисциплине
**«Проектирование
сварных конструкций»**

лекция №5

ПРЕПОДАВАТЕЛЬ:

к.т.н., ст. преп. кафедры «ОиТСП»

БЕНДИК Татьяна Ивановна

СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИИ

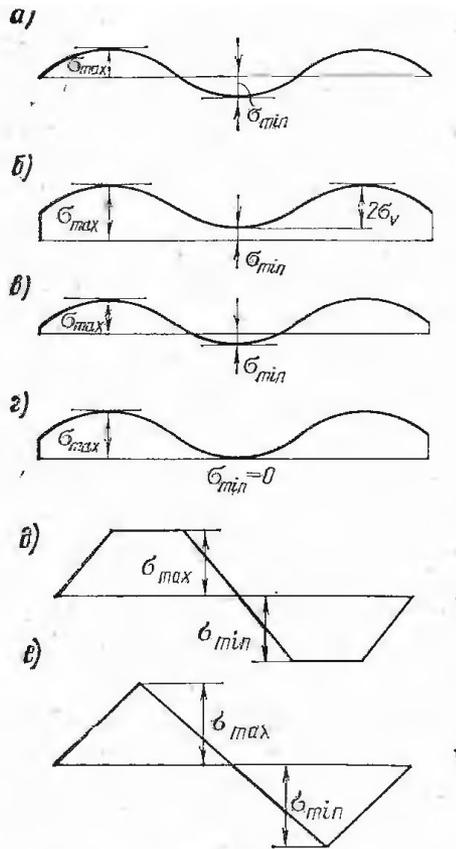
Тема 4 Сопротивление сварных соединений усталости

- Основные понятия и определения
- Основные расчетные формулы при действии переменных (циклических) нагрузок.
- Расчет сварных соединений, работающих на усталость. Силовые, деформационные и энергетические критерии сопротивляемости разрушению в присутствии концентратора напряжений, методы их определения.
- Особенности разрушения при переменных нагрузках
- Теория Гриффитса. Критические значения напряжений и длины трещины.

Прочность сварного соединения при переменных нагрузках зависит от ряда факторов:

- количества циклов нагружения;
- амплитуды изменения напряжения;
- формы , размеров и материала испытываемых образцов и.т.д

ЦИКЛ – совокупность всех значений напряжений за время одного периода нагружения.



- а – симметричный цикл нагружения $|\sigma_{max}| = |\sigma_{min}|$
- б – знакопостоянный цикл нагружения;
- в – асимметричный знакопеременный цикл $|\sigma_{max}| \neq |\sigma_{min}|$
- г - отнулевой цикл.

Характер изменения напряжений по времени бывает различным: как синусоидальным (рис. 4.2, а—г), так и другой формы .(рис. 4.2, д, е)

Коэффициент амплитуды цикла (характеристика цикла):

$$r = \sigma_{min} / \sigma_{max}$$

- для симметричного цикла $r = -1$;
- для отнулевого цикла $r = 0$

Среднее напряжение цикла $\sigma_m = (\sigma_{min} + \sigma_{max}) / 2$

Амплитудное напряжение цикла $\sigma_a = (\sigma_{min} - \sigma_{max}) / 2$

Рис. 4.2. Осциллограммы нагружений с различными характеристиками циклов

Максимальное напряжение, при котором материал не разрушается при достаточно большом числе циклов нагружения, называется пределом выносливости. При испытаниях стальных образцов предел выносливости определяют при $N = 10^7$

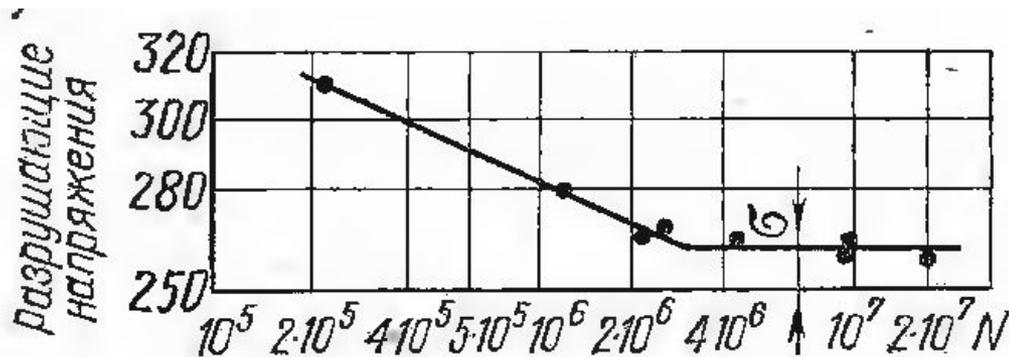


Рис. 4.1. Диаграмма прочности стали в зависимости от числа нагружений N :

На рис. изображена диаграмма прочности металла в зависимости от числа циклов нагружения, построенная в полулогарифмических координатах. Число циклов в логарифмическом масштабе отложено по оси абсцисс, а значения разрушающих напряжений — по оси ординат. Опытами подтверждено, что зависимость $\sigma = f(N)$ при построении в этих координатах может быть изображена двумя отрезками прямой: наклонным и горизонтальным.

Горизонтальная прямая соответствует **пределу выносливости (усталости) σ_r** .

Предел выносливости - это напряжение, при котором материал не разрушается при достаточно большом числе циклов.

Число циклов, при котором определяется предел усталости называется **БАЗОЙ ИСПЫТАНИЙ**

$N_B = 2e6 - 1e7$ – для стальных образцов.

Прочность деталей конструкций при переменных нагрузках зависит от концентрации напряжений. Эффективным коэффициентом концентрации напряжений K_ε , называется **отношение предела выносливости гладкого образца к пределу выносливости образца при наличии концентратора**; $K_\varepsilon \geq 1$, причем чем ближе K_ε 1, тем лучше работает изделие.

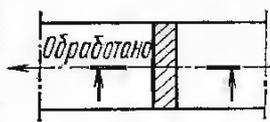
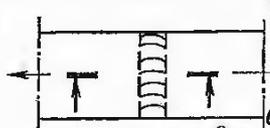
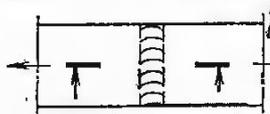
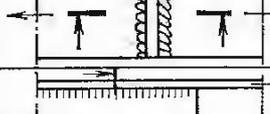
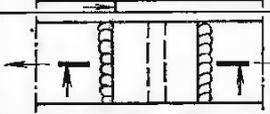
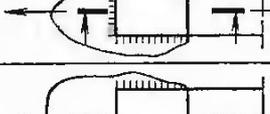
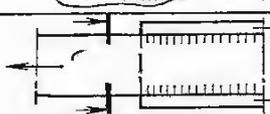
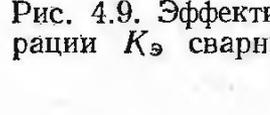
Схемы видов сварных соединений		K_ε	
Вид в плане	Разрезы	Ст3	15ХСНД
	Стыковое соединение с обработкой стыкового шва	1,0	1,0
	Технологическим путем осуществленный плавный переход от шва к основному металлу	1,2	1,33
	Без механической обработки обычного качества	1,4	1,8
	Ручная сварка	1,6	2,2
	Обрыв стенки	2,0	2,8
	$b = 2a$	2,3	3,2
		2,5	3,5
		3,4	4,4
	Обрыв поясов	4,0	4,9

Рис. 4.9. Эффективные коэффициенты концентрации K_ε сварных соединений сталей Ст3 и 15ХСНД

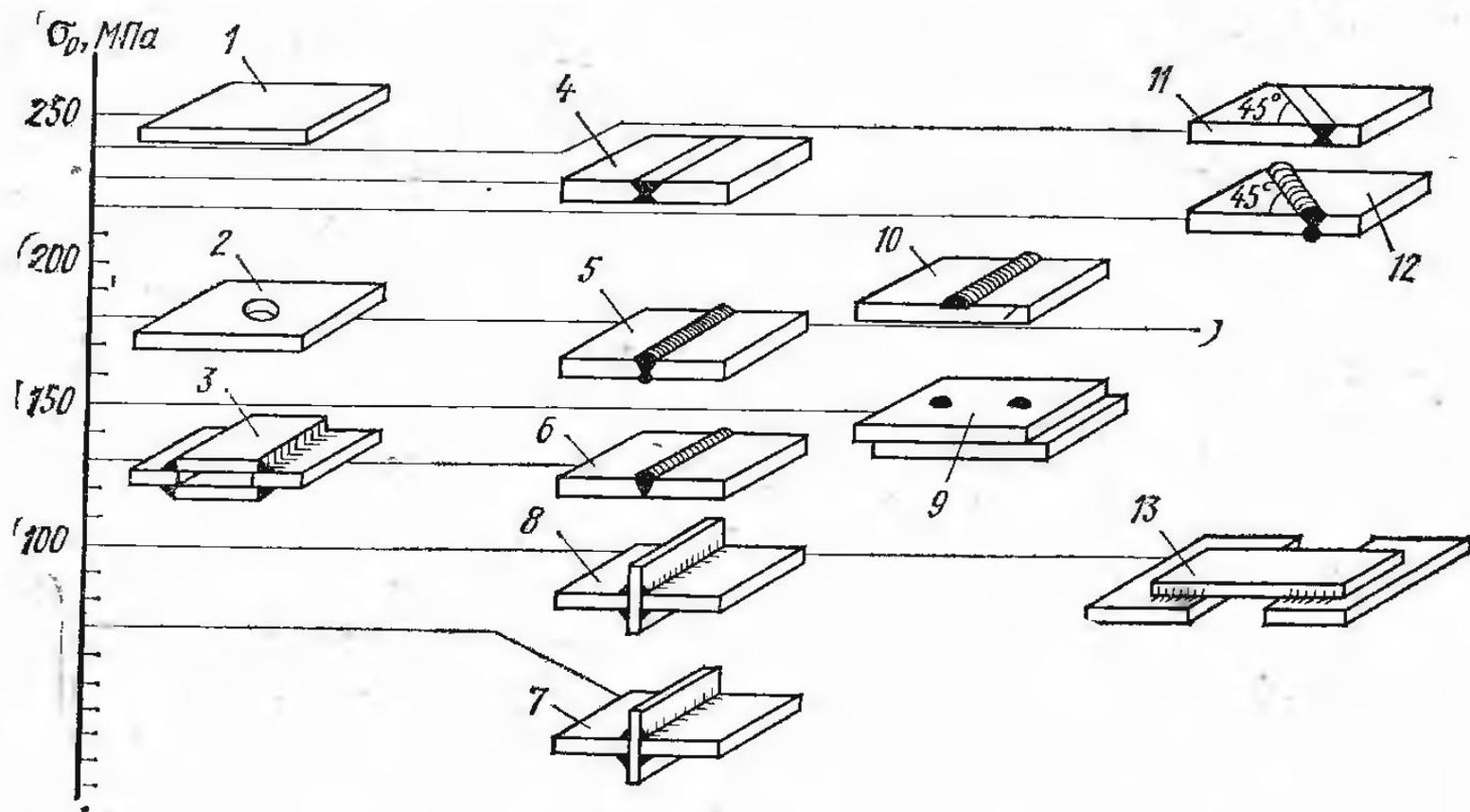


Рис. 4.10. Пределы выносливости сварных соединений из стали 37 при $r = 0$:

1 — целая полоса; 2 — полоса с отверстием; 3 — модель соединения с лобовыми швами; 4 — шов обработан, подварен; 5 — шов не обработан, подварен; 6 — шов без подвара; 7 — крестовое соединение, швы не обработаны; 8 — то же, швы обработаны; 9 — соединение с заклепками; 10 — поперечный валик без обработки; 11 — косой стыковой шов обработан; 12 — то же, не обработан, подварен; 13 — фланговые швы обработанные

Расчет сварных соединений, работающих на усталость

Расчет прочности сварных конструкций, работающих под переменными нагрузками, производится по марке металла, характеристике цикла r , эффективным коэффициентам концентрации напряжений K_σ и продолжительности эксплуатации, определяемой числом нагружении N . При расчете по СНиПу каждый тип соединения причисляется к одной из 8 условных групп (см. таблицу).

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq [\sigma'] - \text{при } \underline{\text{статических}} \underline{\text{нагрузках}}$$

$$\sigma = \frac{N}{A} \leq [\sigma'] \cdot \gamma - \text{при } \underline{\text{переменных}} \underline{\text{нагрузках}}$$

В строительных конструкциях расчет прочности производят с учетом расчетных сопротивлений (см. гл. 2). Значения расчетных сопротивлений при переменных нагрузках умножают на коэффициент

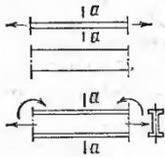
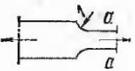
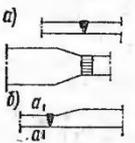
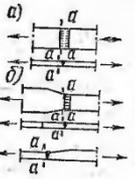
$$\gamma = c / (a - br) \quad (4.4)$$

в случае, если наибольшее напряжение растягивающее, и

$$\gamma = c / (b - ar), \quad (4.5)$$

если наибольшее напряжение сжимающее, где r — характеристика цикла; коэффициенты a , b и c находят из табл. 4.7.

Группы элементов и соединений при расчете на усталость по СНиПу. Эффективные коэффициенты концентрации напряжений K_σ по нормам Минтяжмаша для краностроения

Схема соединения и расположение расчетного сечения $a-a$	Характеристика сечения	Группа элементов для соединения	K_σ
	Основной металл с необработанной прокатной поверхностью и с прокатными, обрезанными или обработанными механическим путем кромками в сечениях вне сварных швов, заклепок и болтов То же, но с кромками, обрезанными газовой резкой: машинной ручной	1 2 4	1,0/1,0 1,2/1,2 1,8/1,4
	Основной металл с необработанной прокатной поверхностью и обработанными механическим путем кромками при разной ширине в радиусе перехода: $r = 200$ мм $r = 10$ мм	1 4	1,0/1,0 2,0/1,6
	Основной металл в месте перехода к необработанному стыковому шву с усилением, имеющим достаточно плавный переход: а) при стыковании листов одинаковой толщины и ширины б) при стыковании листов разной ширины или листов разной толщины с плавным переходом	4 5	1,8/1,4 2,5/2,0
	Основной металл в месте перехода к стыковому шву, обработанному в этом месте абразивным кругом или специальной фрезой: а) при стыковании листов одинаковой толщины и ширины б) при стыковании листов разной толщины или ширины	2 3	— —

Продолжение табл. 4.6

Схема соединения и расположение расчетного сечения $a-a$	Характеристика сечения	Группа элемента или соединения	K_9
	<p>Основной металл в месте перехода к поперечному (лобовому) угловому шву:</p> <p>а) при передаче усилия через швы без механической обработки при отношении катетов 1:1,5 (при направлении большего катета вдоль усилия)</p> <p>то же, при механической обработке перехода от шва к основному металлу</p> <p>б) без механической обработки при передаче усилия через основной металл</p> <p>то же, при зачистке зоны перехода от шва к основному металлу</p>	7 4 6 4	3,2/2,5 — 1,6/1,2 —
	<p>Основной металл в соединениях с фланцами при плавном переходе шва к основному металлу:</p> <p>с глубоким проваром присоединения</p> <p>то же, с механической обработкой перехода от сварного шва к основному металлу</p>	7 4	— —
	<p>Основной металл в соединениях с фланговыми швами, работающими на срез от осевой силы, в местах перехода от элемента к концам фланговых швов независимо от обработки:</p> <p>а) с двумя фланговыми швами</p> <p>б) с фланговыми и лобовыми швами</p> <p>в) при передаче усилия через основной металл</p> <p>г) щеки анкеров для крепления стальных канатов</p>	8 8 8 8	4,0/3,2 — 2,0/1,6 —
	<p>Основной металл вблизи диафрагм и ребер, приваренных угловыми швами к растянутым поясам балок и элементам ферм:</p> <p>без механической обработки швов, но при наличии плавного перехода от швов к металлу при ручной и полуавтоматической сварке</p> <p>то же, при механической обработке швов</p>	4 2	1,6/1,2 —

Продолжение табл. 4.6

Схема соединения и расположение расчетного сечения $a-a$	Характеристика сечения	Группа элемента или соединения	K_9
	<p>Сварные сечения двуглавового, таврового и других типов, сваренные непрерывными продольными швами: автоматической сваркой при действии усилия вдоль оси шва по основному металлу</p>	2	—
	<p>Обрыв поясного листа сварной балки при уменьшении толщины (ширины) листа к месту обрыва с уклоном 1:5, без механической обработки поперечного (лобового) шва с соотношением катетов 1:2</p>	7	3,2/2,5
	<p>Фасонки прямоугольной формы, привариваемые встык или втавр к элементам конструкций, без механической обработки перехода от фасонки к элементу</p>	8	2,8/2,0
	<p>Фасонки, привариваемые встык или втавр к стенкам и поясам балок, а также к элементам ферм, при плавной криволинейной форме и механической обработке перехода от фасонки к элементу конструкции, при полном проваре на всю толщину фасонки</p>	4	1,4/1,2

Схема соединения и расположение расчетного сечения $a-a$	Характеристика сечения	Группа элемента или соединения	K_3
	Фасонки прямоугольной и трапециевидной формы, привариваемые к поясам балок внахлестку с обваркой по контуру нахлестки, без механической обработки зон концентрации напряжений	7	—
	Фасонки трапециевидной формы, привариваемые двумя фланговыми и двумя косыми швами (с соотношением катетов 1:1 для фланговых и 1:1,5 для косых швов), при механической обработке швов на концах фасонки	5	—
	Основной металл трубы у сварного шва, выполненного на подкладном кольце	4	—
	Основной металл трубы растянутого раскоса при $s = \delta_n / D_n = 1/14$, где δ_n и D_n — толщина и наружный диаметр трубы пояса	8	—
	Основной металл трубы растянутого раскоса, когда $\gamma_r = d_p / D_n = 0,4 \div 0,7$, $\alpha = 45 \div 60^\circ$, то при: $s \geq 1/14$ $1/14 > s \geq 1/20$ $1/20 > s \geq 1/35$ где $s = \delta_n / D_n = 1/14$, d_p и D_n — наружные диаметры труб раскосов и пояса	6 7 8	— — —

Коэффициенты a , b и c

Таблица 4.7

Класс стали	Группа соединения	a	b	c при числе циклов N						
				$5 \cdot 10^6$	10^6	$2 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^6$		
С 38/23	1	1,20	0,60	1,2	1,1	1,0	0,95	0,9		
	2	1,30	0,70							
	3	1,55	0,95	1,3						
	4	1,85	1,25							
	5	2,10	1,50							
	6	2,75	2,15	1,4					1,2	0,85
	7	3,50	2,90							
	8	4,80	4,20							
С 44/29 С 46/33	1	1,25	0,65	1,2	1,1	1,0	0,95	0,9		
	2	1,45	0,85							
	3	1,80	1,20	1,4	1,2					
	4	2,40	1,80							
	5	2,75	2,15							
	6	3,80	3,20	1,6	1,3				0,85	
	7	4,80	4,20							
	8	6,00	5,40							

Примечание. В числителе даны значения K_3 для сталей С 44/29, С 46/33, С 52/40, в знаменателе — для стали С 38/23.

Пример 1. Определить несущую способность прикрепления полосы шириной 200 мм и толщиной $s = 10$ мм к косынке лобовым швом длиной $l_1 = 20$ см и двумя фланговыми $l_2 = 15$ см; $r = 0,2$; сталь С 38/23; расчетное сопротивление $R = 210$ МПа для основного металла при растяжении и $R_y = 150$ МПа при срезе для угловых швов. Допускаемое напряжение находим при условии, что коэффициент условия работы $m = 0,9$; коэффициент безопасности $k = 1,1$; число нагружений $N > 5 \cdot 10^6$.

Допускаемые напряжения при статическом нагружении

$$[\sigma]_p = Rm/k = 210 \cdot 0,9/1,1 = 172 \text{ МПа};$$

в угловых сварных швах

$$[\tau'] = R_y m/k = 150 \cdot 0,9/1,1 = 122 \text{ МПа}.$$

Согласно табл. 4.6, соединение относится к группе 8. По табл. 4.7 находим коэффициенты $c = 0,85$; $a = 4,8$; $b = 4,2$;

$$\gamma = 0,85/(4,8 - 0,2 \cdot 4,2) = 0,215,$$

$$[\sigma]_p \gamma = 36,9 \text{ МПа}.$$

Несущая способность сварного соединения по основному металлу в зоне сварных швов

$$P = bs [\sigma]_p \gamma = 0,2 \cdot 0,01 \cdot 36,9 = 0,0738 \text{ МН}.$$

Проверяем равнопрочность сварных швов основному металлу при статическом нагружении.

Для основного металла

$$P_1 = bs [\sigma]_p = 0,2 \cdot 0,01 \cdot 172 = 0,344 \text{ МН}.$$

Для угловых швов при $\beta = 0,7$ и катете $K = 1$ см

$$P_2 = \beta K (l_1 + 2l_2) [\tau'] = 0,7 \cdot 0,01 (0,2 + 2 \cdot 0,15) \cdot 122 = 0,426 \text{ МН}.$$

Так как $P_2 > P_1$, то равнопрочность обеспечена и несущая способность сварного соединения при переменных нагрузках определяется найденным значением $P = 0,0738$ МН.

Особенности разрушения при переменных нагрузках

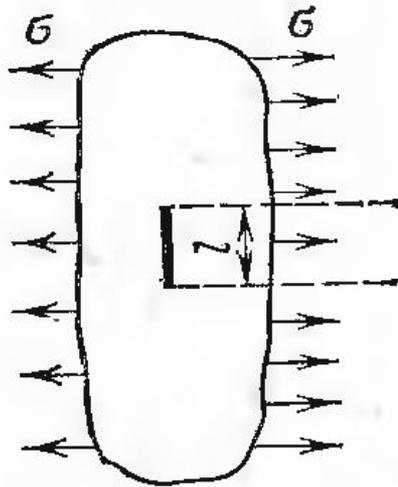
Усталостный излом образца состоит из 2 зон:

- Зоны распространения трещины, имеющей гладкую поверхность;
- зоны долома, имеющей резко кристаллическую поверхность.

В настоящее время установлено, что в процессе циклического нагружения такие несовершенства кристаллической структуры, как дислокации, приобретают энергию, достаточную для того, чтобы они начали двигаться.

С этой позиции процесс усталостного разрушения можно представить состоящим из следующих стадий:

- 1 – движение дислокаций и их объединение в субмикротрещины;
- 2 – рост субмикротрещин до размеров микротрещин;
- 3 - рост микротрещин до размеров макротрещины;
- 4 – рост макротрещины до критического размера
- 5 - долом



Начало движения имеющейся трещины. При растяжении бесконечной пластины с трещиной длиной l трещина начинает распространяться после того, как напряжение σ достигло определенного (критического) уровня, при котором соблюдается равенство приращений работы, поглощаемой на разрушение металла, и энергии упругих деформаций пластины, освобождающейся при подрастании трещины. Впервые указанное энергетическое условие для идеализированной схемы разрушения рассмотрел Гриффитс. Тело предполагается идеально хрупким, т. е. энергия расходуется только на образование новой поверхности (поверхностного натяжения). Если в сплошной растянутой пластине толщиной, равной 1 , образовать трещину длиной l , то потенциальная энергия в пластине уменьшится на

$$U = \pi l^2 \sigma^2 / (4E). \quad (3.42)$$

Появление новых поверхностей сопровождается затратами энергии

$$U_{\text{пов}} = -Gl, \quad (3.43)$$

где G — энергия поверхностного натяжения.

Суммарное изменение энергии составит

$$U_{\Sigma} = \pi l^2 \sigma^2 / (4E) - Gl. \quad (3.44)$$

Если энергии будет освобождаться больше, чем поглощаться, трещина начнет самопроизвольно двигаться без увеличения напряжения. Это соответствует моменту равенства приращений энергии, т. е.

$$\frac{\partial U_{\Sigma}}{\partial l} = 0. \quad (3.45)$$

Дифференцируя (3.44), получаем

$$\pi l \sigma^2 / (2E) - G = 0. \quad (3.46)$$

Отсюда получим формулы для критического напряжения и критической длины трещины:

$$\sigma_{\text{кр}} = \sqrt{2GE / (\pi l)}; \quad (3.47)$$

$$l_{\text{кр}} = 2GE / (\pi \sigma^2). \quad (3.48)$$

Из (3.46) также получим критическое значение энергии

$$G_c = \pi l \sigma^2 / (2E). \quad (3.49)$$

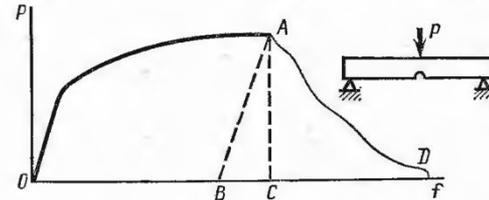


Рис. 3.37. Определение работы зарождения A_z и работы распространения A_p трещины при изгибе надрезанного сбрзца

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

КАКИЕ БУДУТ ВОПРОСЫ?