

Кафедра «Металлические и деревянные конструкции»  
курс «Металлические конструкции», 1 ч.

лекция № 4. «Работа стали под нагрузкой»

Лектор ст. преподаватель кафедры «МиДК»  
Крайнов Андрей Викторович

Ра

На работу стали под на  
нагрузки и напряжени

Рассмотрим работу (ис  
работу выполняют сту  
дисциплины «Сопроти  
круглого или прямоуг  
образца рекомендуется  
образца). Далее образе  
разрывную машину, гд  
образца. По результата  
нагрузки и относитель  
Такая диаграмма больш



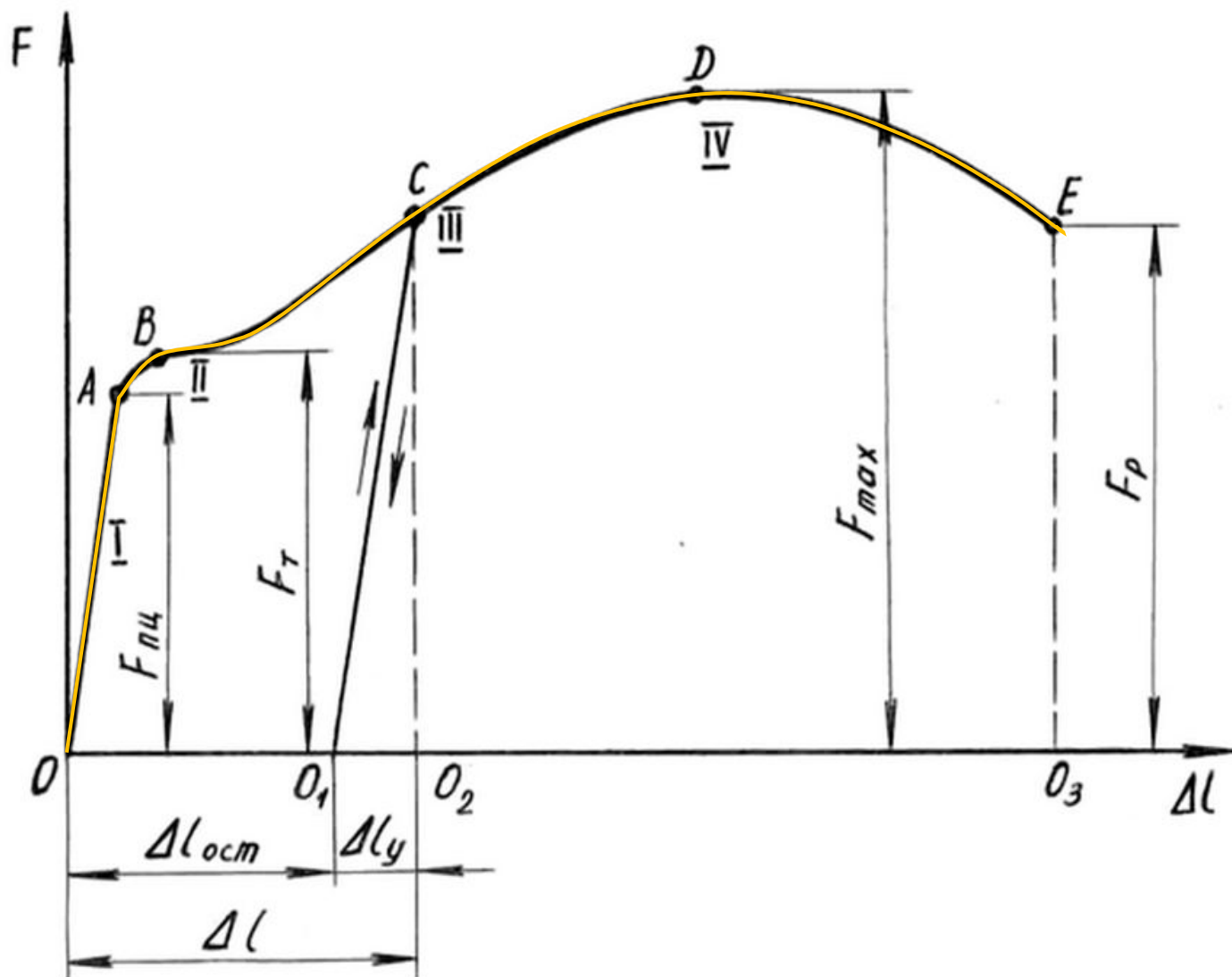
ой

и, распределение

стяжении. Подобную  
куме при изучении  
тания берётся образец  
енее 3 мм. Длина  
площадь сечения  
испытательную  
ния и удлинение  
у зависимости

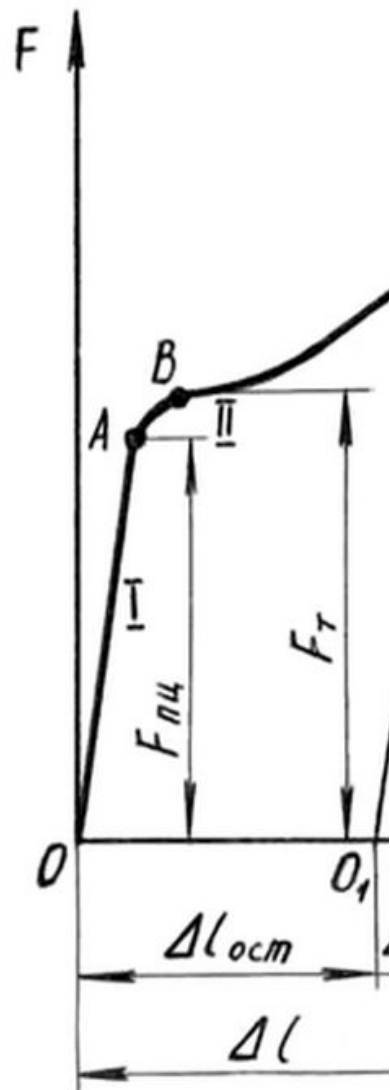
а.

# Работа стали под нагрузкой



Сила притяжения между атомами пытается удержать форму кристаллической решётки, но при приложении нагрузки к образцу форма кристалла искажается и атомы внутри образца получают незначительное смещение. Жёсткий феррит практически остаётся неизменным и деформируется связующий мягкий перлит.

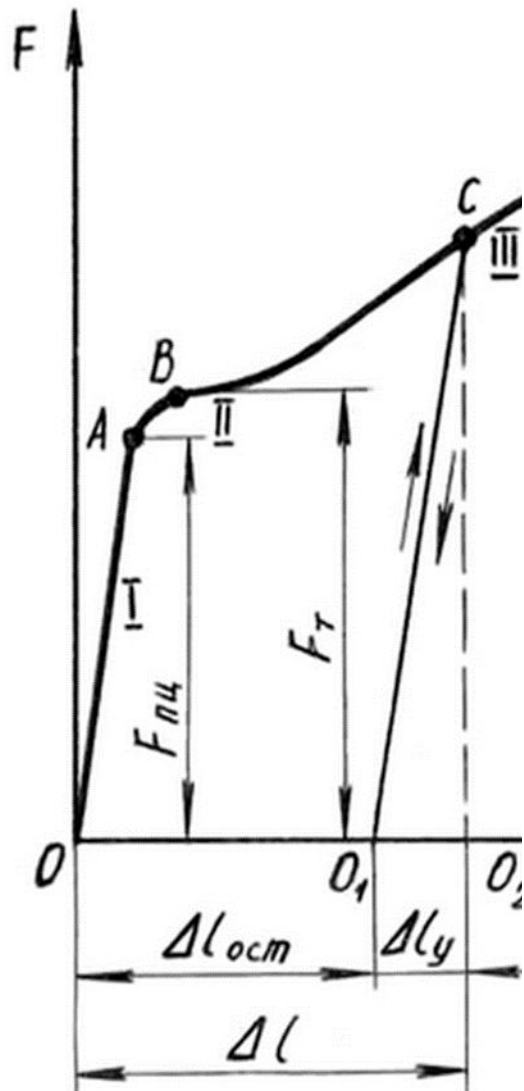
# Работа стали под нагрузкой



При росте растягивающей нагрузки до величины  $F_{\text{пц}}$  образец ведёт себя упруго и при снятии нагрузки образец возвращается к своей исходной длине, т.е. форма кристаллов и атомная решётка восстанавливается полностью.

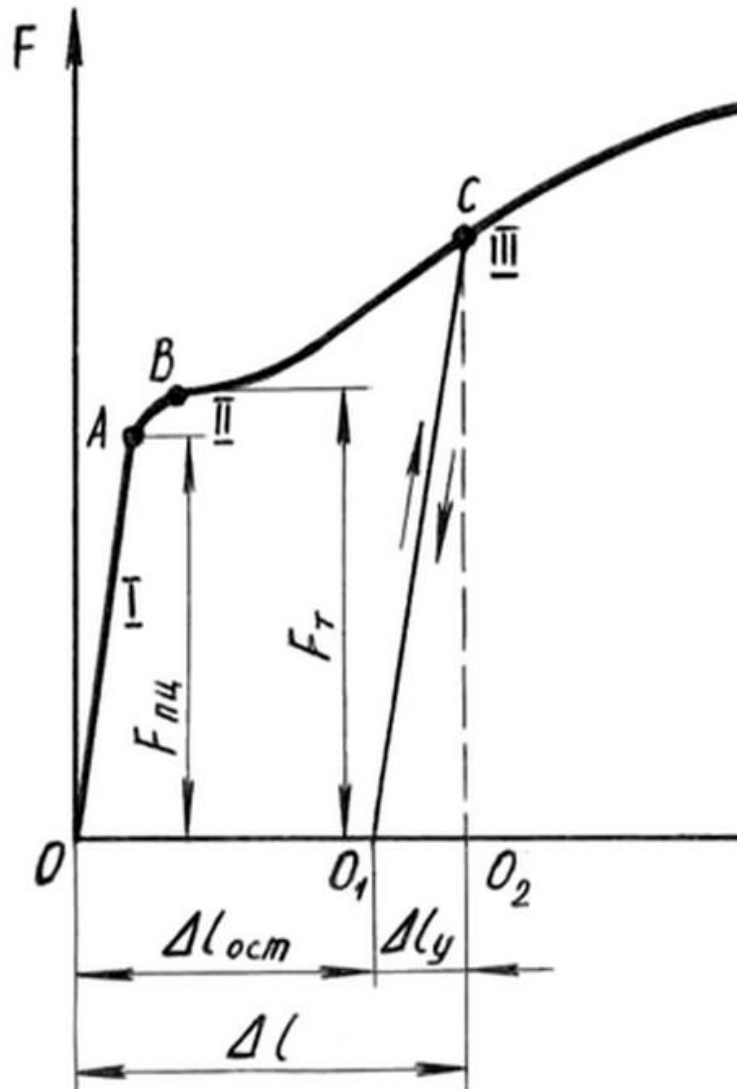
Необходимо отметить, что между нагрузкой от 0 до  $F_{\text{пц}}$  и удлинением образца существует практически линейная зависимость и при полном снятии нагрузки удлинение образца не происходит (на диаграмме этот период обозначен № I). Этот участок называют участком пропорциональности.

# Работа стали под нагрузкой



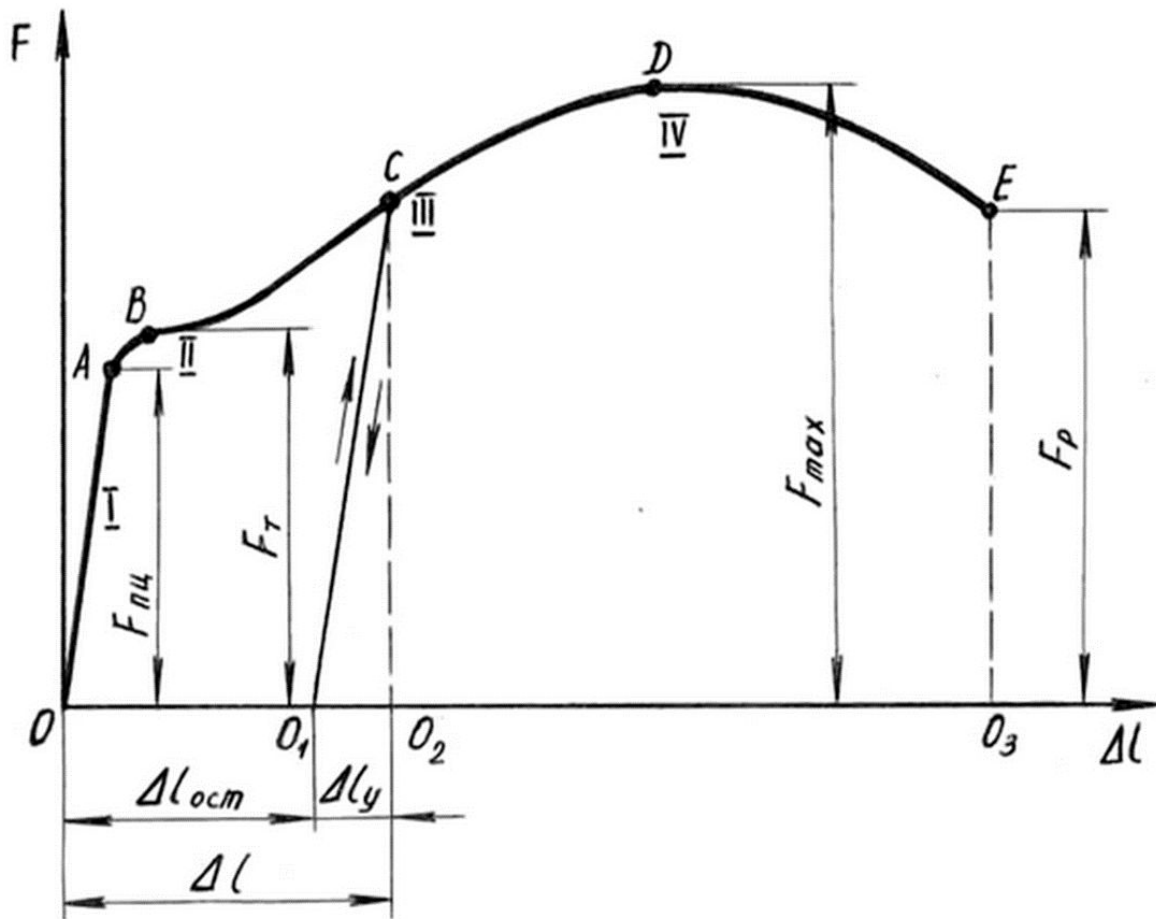
При дальнейшем нагружении образца (нагрузка незначительно стала превышать значение  $F_{пц}$  до значения  $F_T$ ) начинается наблюдаться сильные искажения атомной решётки, зерна и прослойки перлита начинают включать в свою работу и мягкие зерна перлита. «Мягкий» и не прочный перлит начинает деформироваться. В этой стадии образец даже при малом приращении растягивающей нагрузки начинает значительно быстрее деформироваться и пропорциональность между растягивающим усилием и удлинением нарушается (на диаграмме этот участок обозначен цифрой № II).

# Работа стали под нагрузкой



При дальнейшем росте нагрузки происходит необратимые деформации, связанные совместной работой зёрен перлита и феррита. Пропорциональность между нагрузкой и удлинением нарушается. На этом участке если прекратить действие нагрузки, то деформация образца остановится, но из-за произошедших изменений в атомной решётке, образец не сможет вернуться в своё первоначальное состояние (на диаграмме обозначено  $\Delta L_{ост}$ ). Эту стадию работы называют **самоупрочнением**.

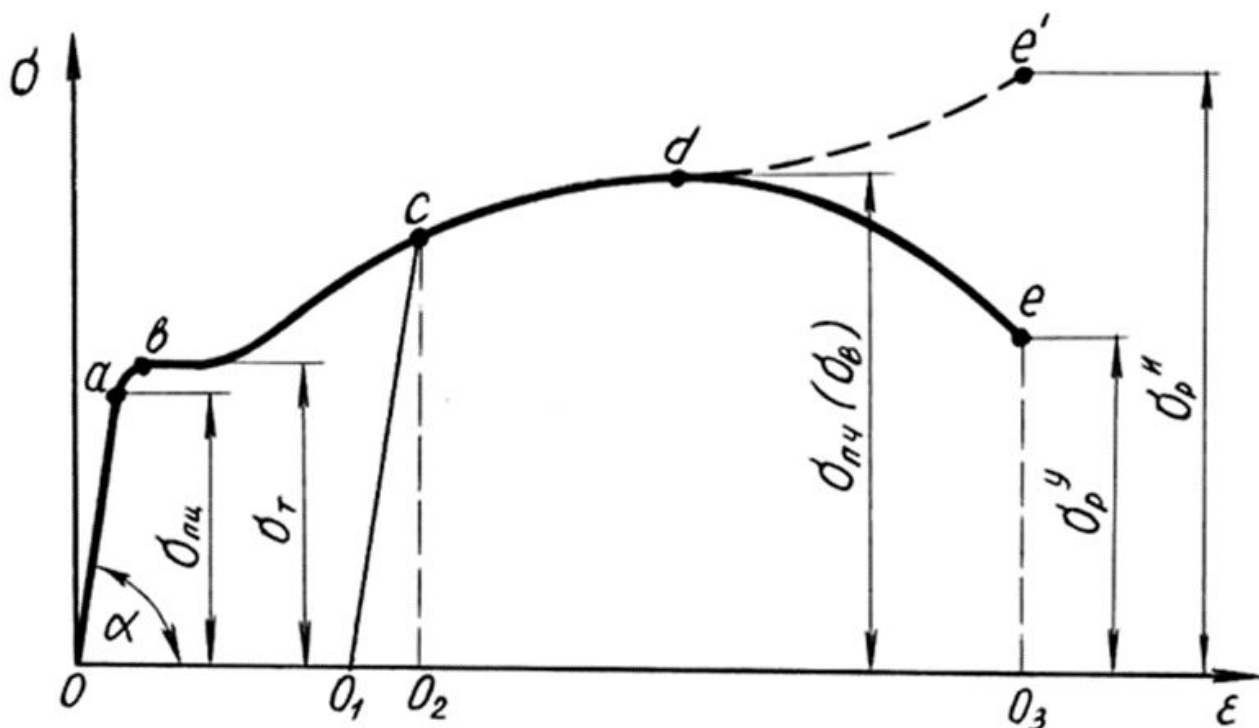
# Работа стали под нагрузкой



При достижении максимальной нагрузки (на диаграмме точка  $D$ ), сдвиги в кристаллах феррита достигают максимума и из-за возможных дефектов стали в этом месте происходит микронарушение структуры и образуется зона больших деформаций. В сечении образуется сужение – «шейка».

Далее в зоне образование «шейки» происходит резкое уменьшение сечения и происходит разрыв образца.

# Работа стали под нагрузкой



При проектировании стальных конструкций в упругой стадии при сжатии или растяжении проектировщик пользуется прямой зависимостью между напряжением  $G$  и относительным удлинением  $\epsilon$ , известного как закон Гука.

$$G = E \cdot \epsilon$$

В упругой стадии между напряжением и относительной деформацией существует линейная зависимость. Связующий коэффициент  $E$  называется **модулем упругости или модулем деформации** и равен **2,06E5 МПа**.



# Работа стали под нагрузкой

Согласно теории упругости, между касательными напряжениями и деформацией сдвига существует зависимость

$$\tau = G \cdot \gamma$$

где

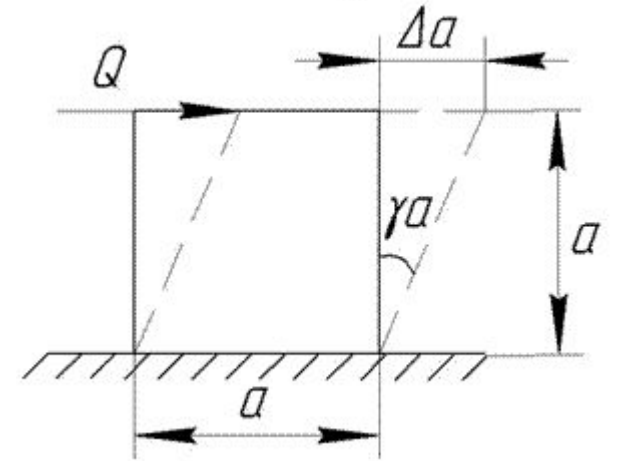
$$G = \frac{0.5 \cdot E}{1 + \nu}$$

$\gamma$  - угол сдвига;

$\nu$  - коэффициент Пуассона (для всех сталей равен  $\nu=0,3$ )

Запишем второй закон Гука в форме.

$$\tau = G \cdot \gamma = \frac{0.5 \cdot 2.06E5}{1 + 0.3} \cdot \gamma = 792301 \cdot \gamma$$



# Работа стали под нагрузкой

Для оценки деформации можно вычислить угол наклона участка на диаграмме.

$$\tan^{-1} E = \tan^{-1} 2,06E5 = 89,9997^\circ$$

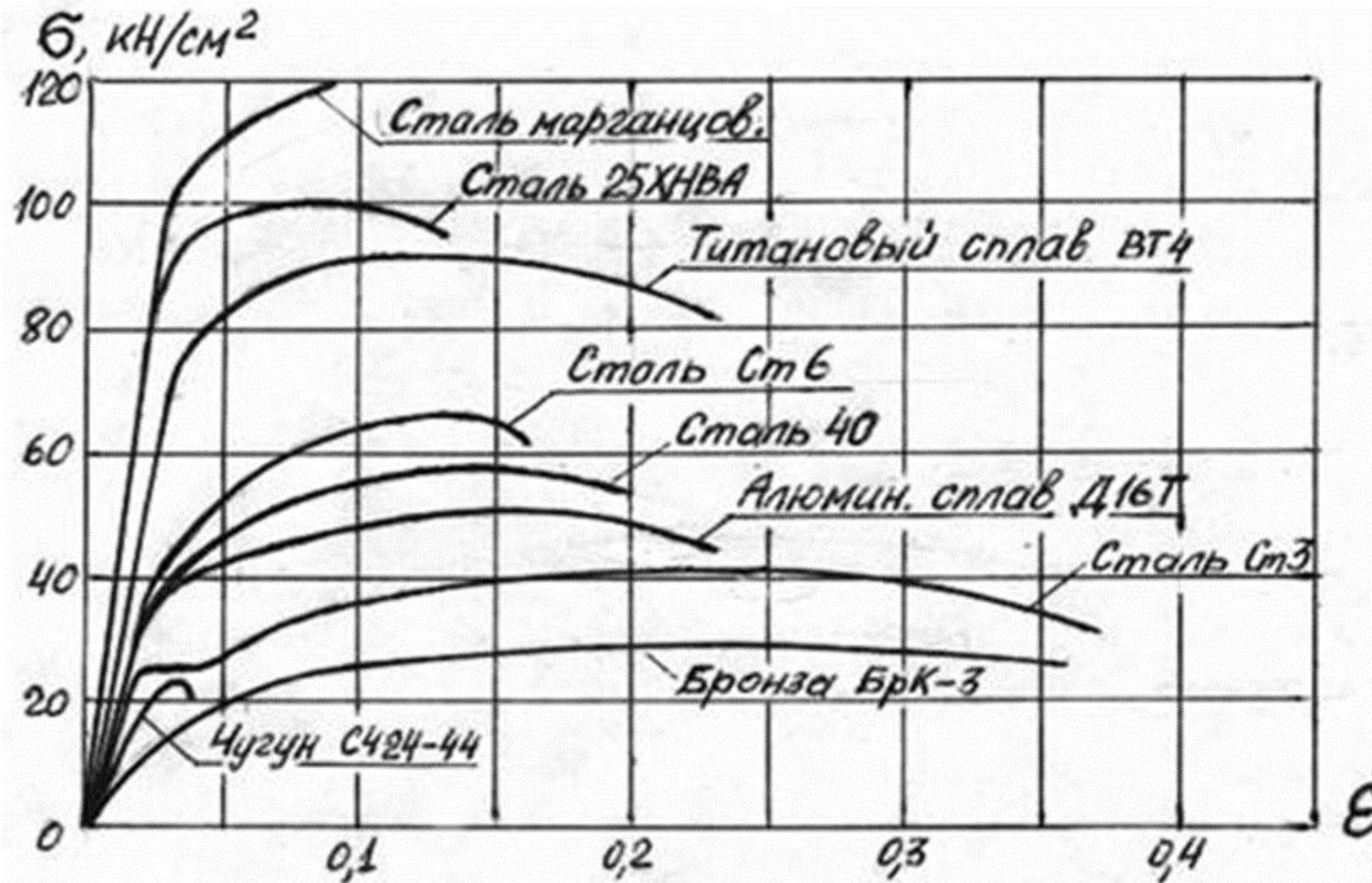
Т.е. угол наклона практически отсутствует. Это означает, что при максимальных напряжениях в упругой стадии деформации чрезвычайно малы. Для обычной стали относительная деформация равна

$$\varepsilon = \frac{G}{E} = \frac{230}{2,06E5} = 1,1e^{-3} \text{ или } 11\%$$

Полное значение относительной деформации у малоуглеродистых сталей составляет порядка 25-30% и более.

**В расчётах проектировщик использует значение предела текучести, которое одинаково при растяжении или сжатии.**

# Работа стали под нагрузкой



Как видно, чугун не удлиняется, обычная сталь имеет выраженную площадку текучести, а высокопрочные сплавы малое удлинение.

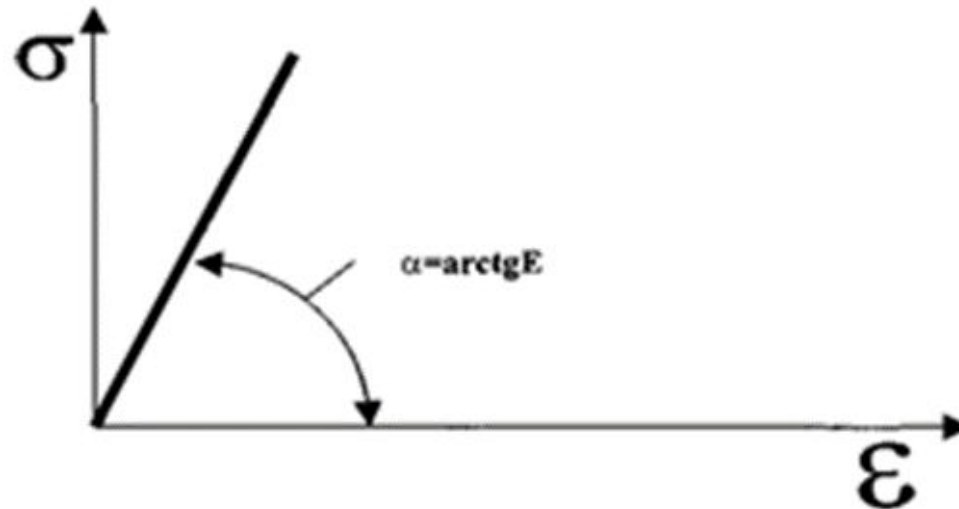
Диаграммы зависимостей между напряжениями и относительными удлинениями для разных сплавов.

# Влияние пластичности на надёжность конструкций

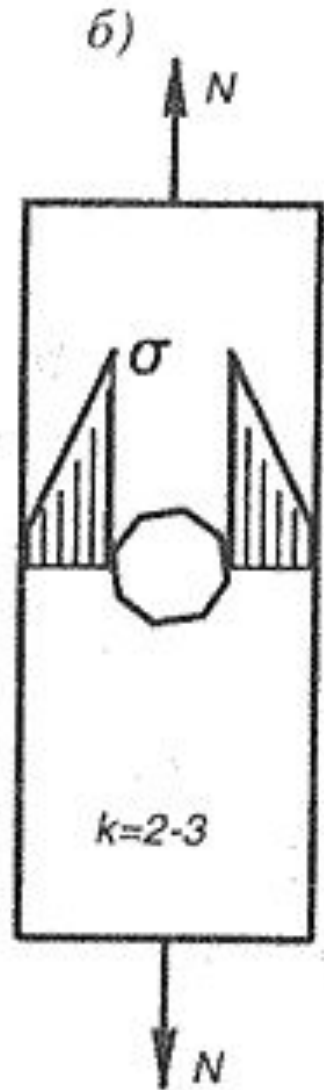
Рассмотрим образец прямоугольного сечения площадью  $A$ , растягивающегося силой  $N$ . В сечении этого образца возникают нормальные напряжения

$$\sigma_0 = \frac{N}{A}$$

Будем считать, что материал образца идеально упругий и его работа отражена идеализированной диаграммой растяжения



# Влияние пластичности на надёжность конструкций

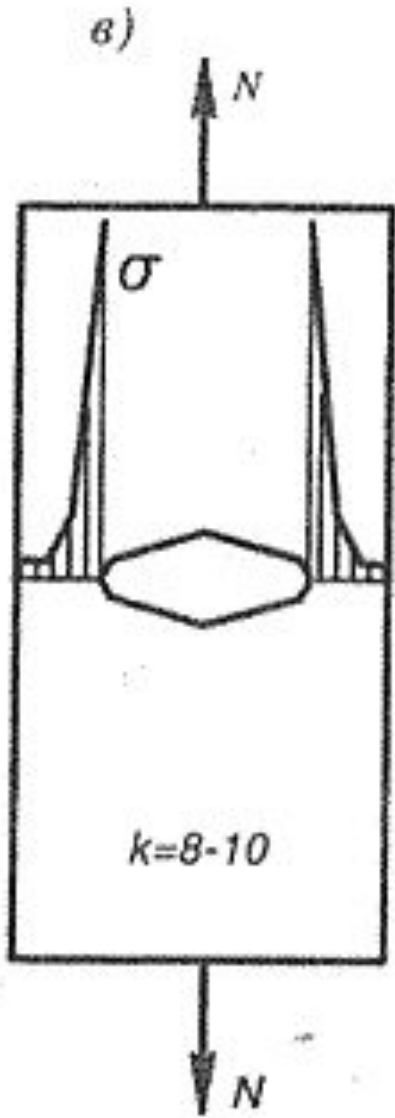


Если в этом сечении появляется отверстие, то логично предположить, что наступает неравномерное распределение нормальных напряжений с возрастанием около края отверстия в сечении.

Введём понятие коэффициента концентрации. Этот коэффициент характеризует отношение действующих напряжений к номинальному напряжению в образце без отверстия.

$$k = \frac{G}{G_0}$$

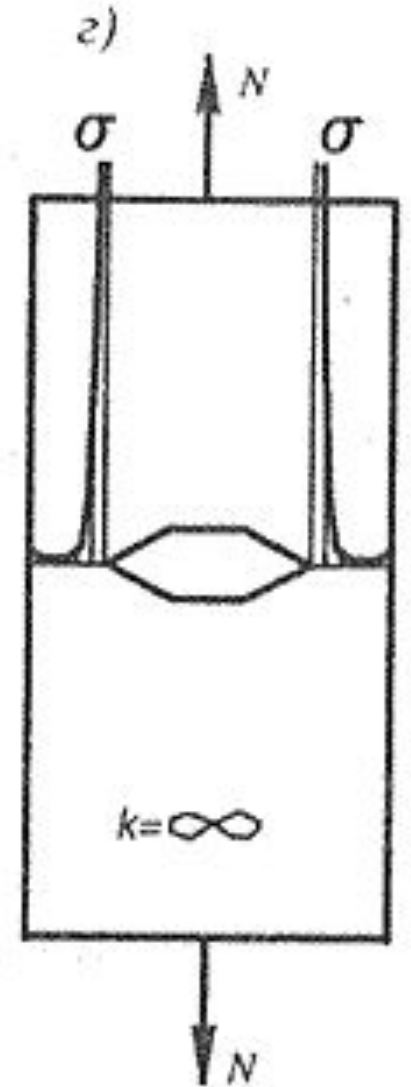
# Влияние пластичности на надёжность конструкций



Если отверстие круглое, то согласно теории упругости, коэффициент концентрации равен  $2 \dots 3$ , а при овальном отверстии коэффициент увеличивается до  $8 \dots 10$ .

При дальнейшем вытягивании отверстия напряжения у кромки значительно возрастают и это приводит отношению  $k=\infty$ .

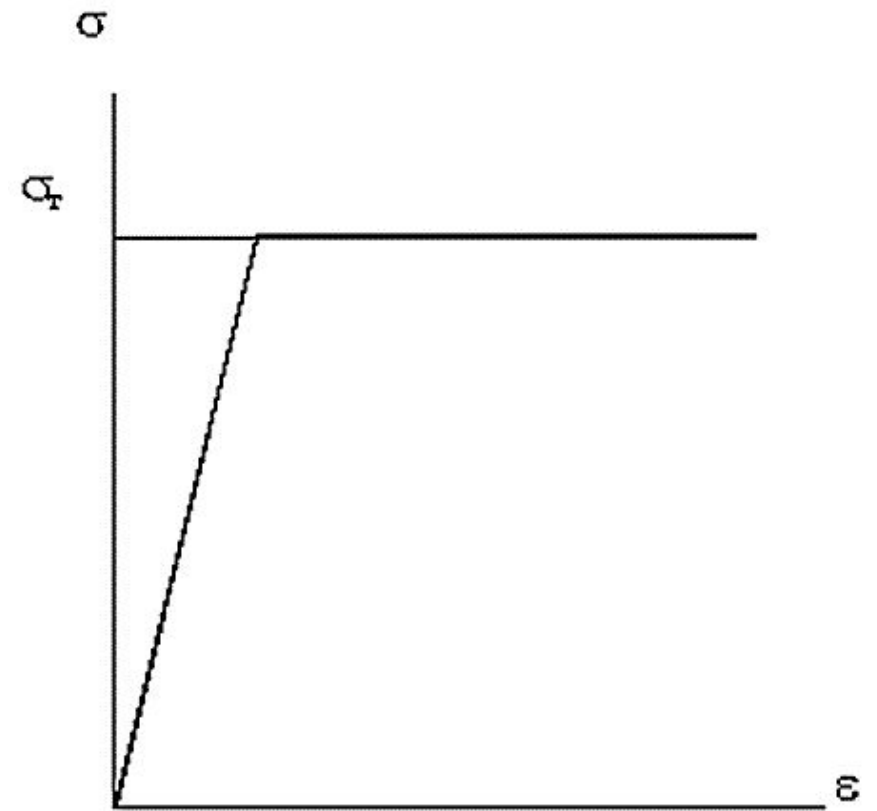
В таком образце при даже незначительных усилиях в упругом образце возможно достичь предела прочности и произойдёт мгновенное разрушение.



# Влияние пластичности на надёжность конструкций

При применении образца из упруго пластичного материала развитие трещин может наступить только после большого развития пластических деформаций.

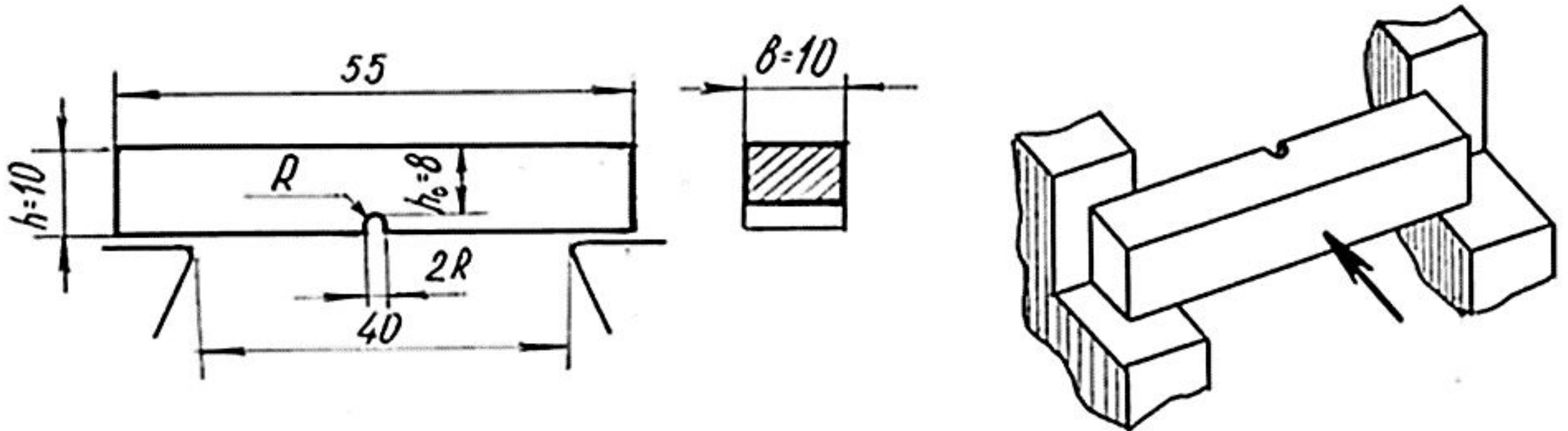
Диаграмма, описывающая зависимость между напряжением и относительным удлинением для идеально упруго пластического материала (диаграмма Прандтля) показывает, что проектировщик должен ограничивать рост напряжений пределом текучести



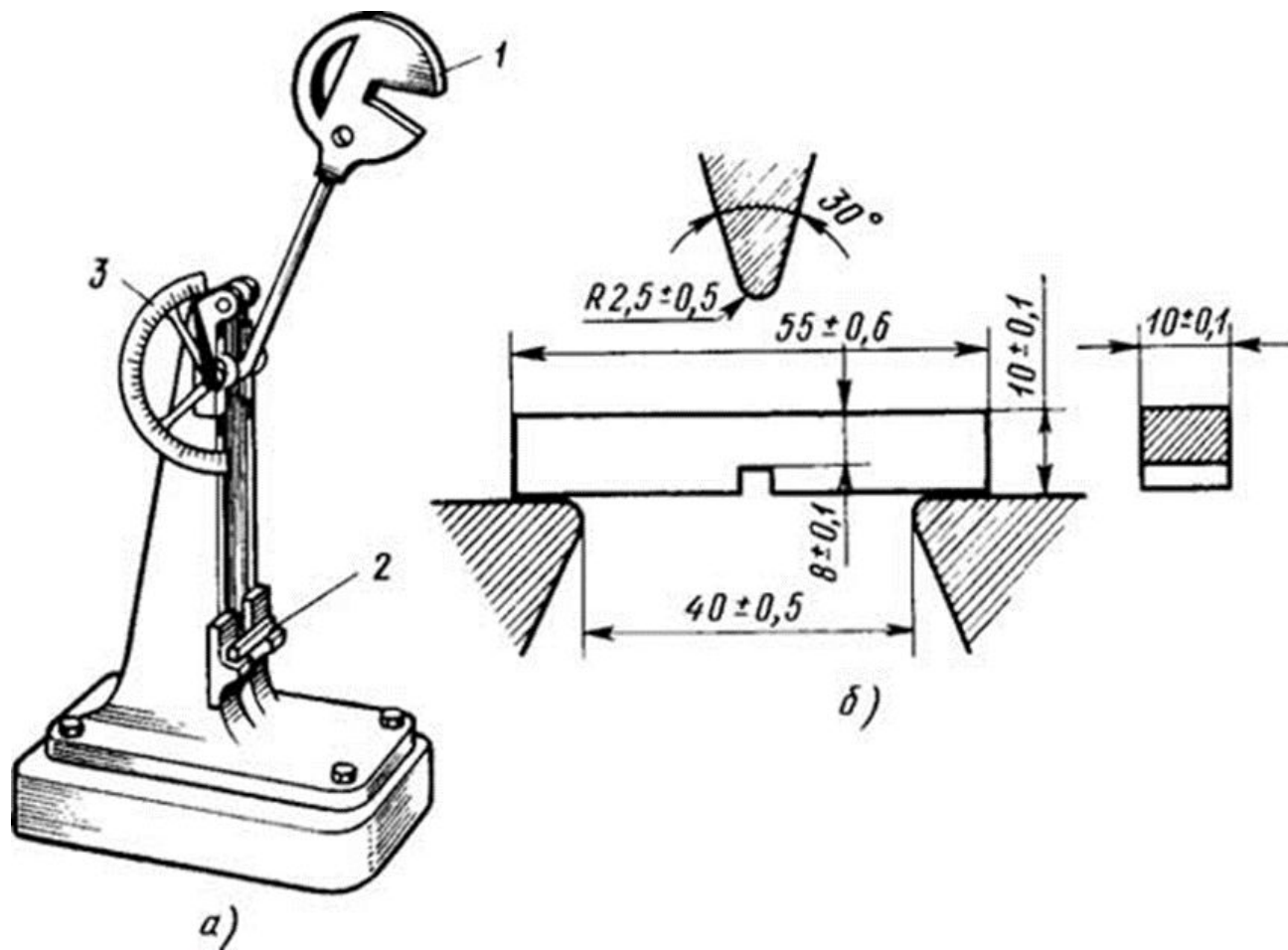
**Вывод:** при применении более пластичных материалов можно добиться большей надёжности работы стального элемента и избежать мгновенного разрушения.

# Ударная вязкость

В практике склонность металла к трещинообразованию проверяют испытанием на ударную вязкость, и оценка происходит по уровню поглощения энергии удара по образцу. Образец представляет собой брусок с небольшой выточкой (концентратором). При ударе по такому образцу массивным маятником с обратной стороны выточки доводят образец до появления трещин или разрушения.







Необходимо отметить, что при применении упруго пластичных материалов позволяет, в случае перегрузки элементов, повысить надёжность конструкции и не разрушатся мгновенно, а проявить предаварийное состояние в виде прогибов, перемещений, которые можно вовремя обнаружить и выполнить усиление.

# Термическая обработка металлов

Для изменения свойств сталей кроме добавление легирующих добавок применяются методы температурного воздействия на сплав. Как было сказано ранее, при температуре около  $727^{\circ}\text{C}$  образуется основной компонент стали – перлит. И было указано, что чем больше перлита в стали, тем прочнее сталь, но сплав становится хрупким. Также было отмечено, что на прочность стали влияет размер зерна и скорость охлаждения.

Рассмотрим основные виды температурного воздействия на сплав.

**Закалка** – это нагрев металла выше температуры  $700^{\circ}\text{C}$ , выдержка при этой температуре и быстрое охлаждение в энергоёмких жидкостях: вода, масло. Закалка повышает твёрдость, износостойкость, но и повышает хрупкость.

**Отпуск** – это нагрев металла до температуры от  $150-260$  до  $370-650^{\circ}\text{C}$  и последующее медленное охлаждение в воде или на воздухе. Отпуск позволяет снизить хрупкость и увеличить пластичность. Применяют для изделий с большими динамическими нагрузками, например, рессор.

# Термическая обработка металлов

**Отжиг** – это нагрев выше 700С, выдержка при этой температуре и медленное охлаждение. Отжиг позволяет снизить твёрдость стали и сделать её мягкой для последующей обработки.

В массовом строительстве как правило термическую обработку металлов не производят и регулируют свойства путём легирующих добавок.

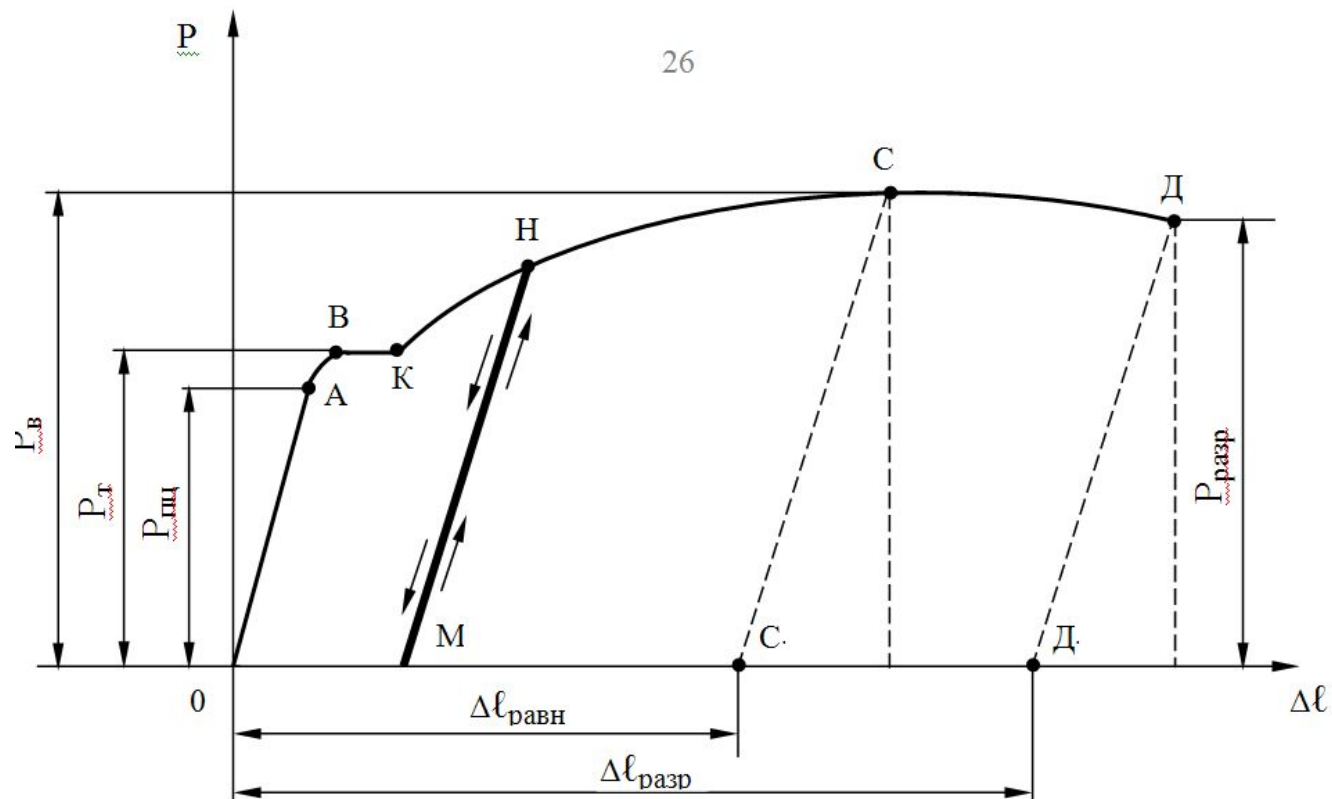
Цвета каления	Температура, °С	Цвета каления	Температура, °С
Темно-коричневый	530-580	Красный	830-900
Коричнево-красный	580-650	Светло-красный	900-1050
Темно-вишневый	650-720	Жёлтый	1050-1150
Вишневый	720-780	Светло- жёлтый	1150-1250
Светло-вишневый	780-830	Белый	1250-1300

# Явление наклёпа, старение, усталость стали и влияние температуры

## Наклёп.

Как было показано ранее, при нагружении-разгрузке в пределах упругих деформаций работа стали происходит по одной линии.

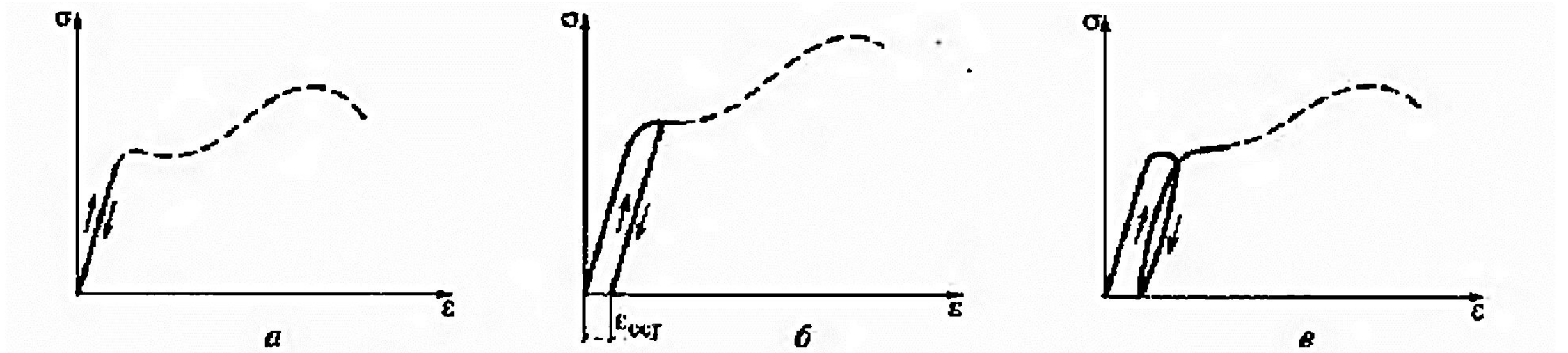
При загрузке до пластической стадии и далее снятии нагрузки, образец не вернётся к первоначальному состоянию и получит остаточную деформацию  $\varepsilon_{\text{ост}}$ .





# Явление наклёпа, старение, усталость стали и влияние температуры

Если загружать образец без перерыва, то на диаграмме будут петлеобразные кривые до предела упругости.



Диаграммы деформирования стали при повторном нагружении а) в пределах упругих деформаций, б) с перерывом (после «отдыха»), в) — без перерыва.

# Явление наклёпа, старение, усталость стали и влияние температуры

Повышение упругой работы материала в результате предшествующей пластической деформации называют наклёпом. При наклёпе атомная решётка искажается, и она закрепляется в новом деформированном состоянии. При этом сталь становится более жёсткой, пластичность снижается и повышается опасность хрупкого разрушения. Наклёп возникает при пробивке отверстий, резке ножницами, холодной гибке.

# Старение стали

Под явлением старение понимают изменение свойств малоуглеродистой стали без заметного изменения её микроструктуры. Старение бывает деформационное и термическое.

**Деформационное старение** происходит при холодной деформации элементов: гнутье, гибка в холодном состоянии, правка.





# Старение стали

Термическое старение вызвано понижением растворимости углерода и азота в малоуглеродистых сталях при резком понижении температуры после нагрева, например, при сварке.

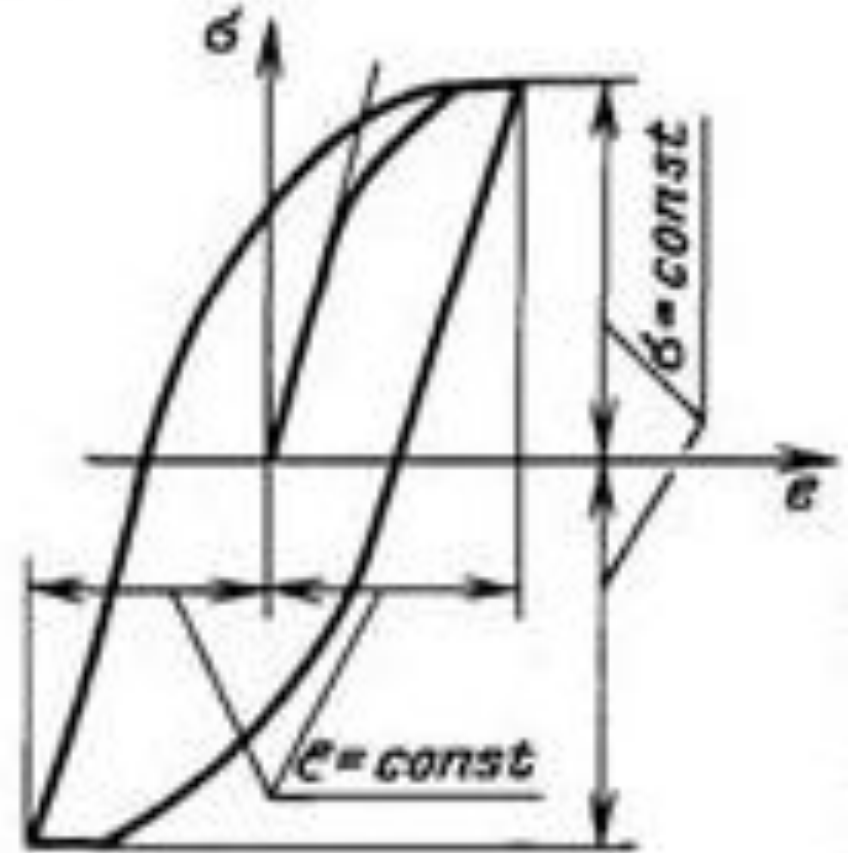
Старение вызывает небольшое повышение прочности, но снижает пластичность, сопротивление хрупкому разрушению и снижает порог **хладноломкости**. Последнее отрицательное свойство может вызвать разрушение конструкций при низких температурах. Для устранения негативных последствий в сталь при выплавке добавляют легированные добавки: титан и ванадий, которые связывают азот и нитриды.

## Усталость металла

При быстром загрузке и разгрузке материал начинает вести себя несколько иначе, чем работы, показанной на идеализированной диаграмме  $\sigma$ - $\epsilon$ . При быстром нагружении, деформации идут не линейно (не по закону Гука), а образуют небольшую дугу. Межатомные связи при резком воздействии несколько инертны и поэтому в диаграмме мы наблюдаем небольшое отклонение от линейной зависимости. Достигнув значения предела упругости в течение малого времени, идеализированная прямая и дуга совпадут в одной точке. Если при этом резко разгрузить образец, то запаздывающие деформации из-за сжимающейся обратно кристаллической решётки также опишут дугу, но по другую сторону от идеализированной линии. Многочисленные несовершенства, присутствующие в кристаллической решётке способствуют неравномерной деформации образца.

# Усталость металла

Площадь фигуры, описанной двумя дугами показывает энергию, поглощаемую образцом, которая расходуется на разрушение межатомных связей. При многократном циклическом воздействии на образец в кристаллической решётке может наступить разрушение. Особенно быстрее это разрушение может наступить при воздействии знакопеременной нагрузки (площадь «петли» больше в два раза – энергии разрушения больше в два раза).



## Усталость металла

Это явление называется усталостью металла. Необходимо заметить, что при пульсирующем цикле усталость проявляется меньше.

На практике, если заранее известно, что элемент будет подвергаться пульсирующей и (или) знакопеременной нагрузке то в расчётах уровень предела текучести занижают.



## Влияние температуры. Низкая температура.

При воздействии на сталь низкой температуры пластические свойства снижаются, сдерживаются их развитие, менее быстро происходит перераспределение напряжений, особенно это может проявиться при изменении сечения.

При динамическом воздействии, т.е. при малом времени нагружения, не успевают происходить пластические деформации.

Все эти факторы при низкой температуре могут проявиться в виде хрупкого разрушения.

Для защиты конструкций от отрицательного воздействия низкой температуры в нормах предусмотрены ограничения по применению марок стали.

## Влияние температуры. Высокая температура.

Высокая температура также ведёт к изменению свойств стали. При достижении температуры до 300 С, интенсивно начинает снижаться предел текучести стали. Модуль упругости начинает также снижаться.

При дальнейшем увеличении температуры до 400-500 С предел текучести начинает стремительно падать и прочность элементов конструкции будет не обеспечена и происходит отказ в работе по прочности.

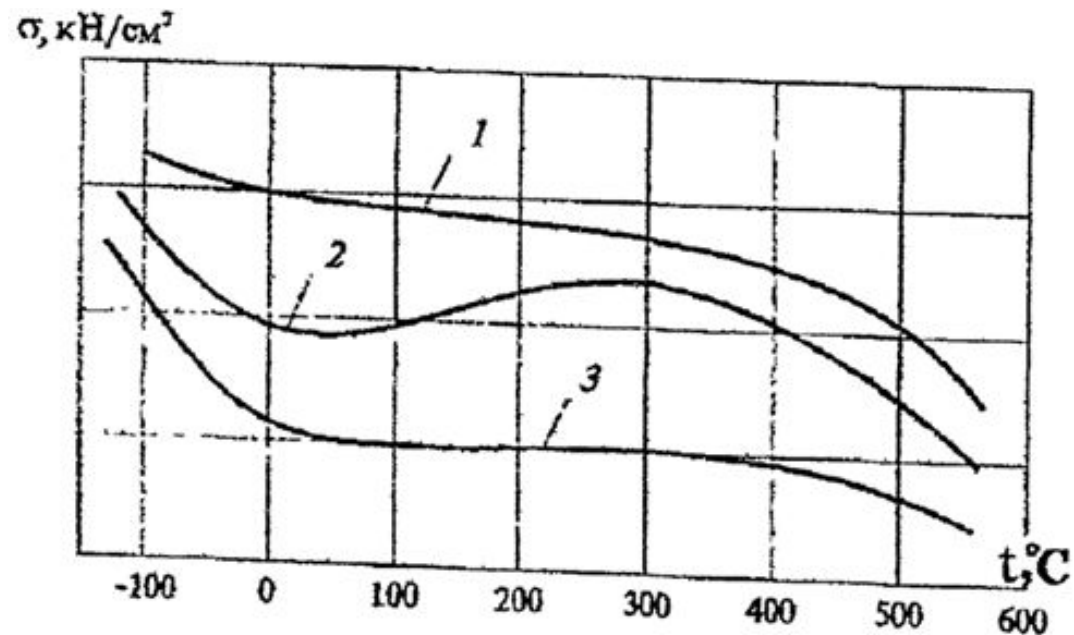


Рис. 2.9. Механические свойства низкоуглеродистой стали при изменении температуры:  
1 - модуль упругости; E, 2 - временное сопротивление;  
3 - предел текучести

## Влияние температуры. Высокая температура.

Дальнейшее снижение модуля упругости ведёт к росту деформации. При достижении температуры 550 С и выше модуль упругости стремится к нулю и деформации увеличиваются стремительно, и наступает отказ по жёсткости.

Для защиты от воздействия высоких температур как правило разрабатываются дополнительные мероприятия для защиты металлоконструкций. Основная задача – это снизить нагрев или скорость нагрева металла. Все мероприятия делятся на категории:

- Конструктивная (пассивная) защита;
- Активная строительная защита.

## Влияние температуры. Высокая температура.

Конструктивная (пассивная) защита. Это комплекс мероприятий включающие в основном покрытие или спец составами, которое при высоких температурах вспучиваются и создают защитный слой, или облицовкой, обетонированием, оштукатуриванием, обрачиванием утеплителем и т.д.

Одним из традиционных вариантов – это обкладка или обмазка металлоконструкций кирпичом, штукатуркой, бетоном или специальным обмазочным покрытием.



# Влияние температуры. Высокая температура.

Метод огнезащиты	Огнезащитный материал	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Толщина огнезащитного материала, в мм, при требуемой огнестойкости в мин.				
			45	60	90	120	150
облицовка	Кирпич	1800	65	65	65	65	120
	Бетон	2500	25	30	40	50	60
	Гипсокартон	850	12	25	50	-	-
оштукатуривание	Цементно-песчаная	1800	25	30	40	50	60
	перлитовая	500	15	20	30	40	50
Нанесение покрытий	Не вспучивающееся покрытие ОФП-МВ	300	15	20	30	40	45
	Вспучивающееся покрытие ОЗС-МФ	1230	8	16	24	32	-

Например, слой бетона, толщиной 2,5 см обеспечивает предел огнестойкости 0,75 ч., а 6 см. – 2,5 часа. Облицовка слоем в ¼ кирпича обеспечивает предел огнестойкости 2 часа, а в ½ кирпича - в 2,5 часа. На сегодня все чаще применяют лёгкие покрытия из листовых материалов (гипсоволокно, вермикулит и т.д.) или обкладывают негорючим утеплителем. Например, два слоя гипсоволокна обеспечивают защиту 45 мин., а четыре – 1,5 часа. Минераловатная плита толщиной 5 см. обеспечивает защиту до 2 часов (но необходима облицовка).

Также широко применяются конструкции экранного типа, например, огнезащитные подвесные потолки

# Влияние температуры. Высокая температура.



## Влияние температуры. Высокая температура.

При проектировании металлических конструкций особое внимание уделяют предупреждению аварийной ситуации. В зависимости от назначения, этажности, площади и т.д. зданию присваивается степень огнестойкости. Далее, на основании степени огнестойкости, при проектировании назначают сечения элементов и принимают систему защиты от воздействия температуры. Основными характеристиками, которыми ограничивают применение элементов и временный являются:

# Влияние температуры. Высокая температура.

Табл. Требуемые пределы огнестойкости строительных конструкций

Степень огнестойкости зданий, сооружений, строений	Пределы огнестойкости строительных конструкций						
	Основные несущие элементы (вкл. обеспечивающие общую устойчивость и геометрическую неизменяемость при пожаре)	Наружные несущие стены	Перекрытия междуэтажные	Бесчердачные покрытия		лестничные клетки	
				настилы	фермы, балки, прогоны	внутренние стены	Марши и площадки и лестниц
I	R 120	E 30	REI 60	RE 30	R 30	REI 120	R 60
II	R 90	E 15	REI 45	RE 15	R 15	REI 90	R 60
III	R 45	E 15	REI 45	RE 15	R 15	REI 60	R 45
IV	R 15	E 15	REI 15	RE 15	R 15	REI 45	R 15
V	Не нормируется						

- E – потеря целостности элемента;
- R – потеря несущей способности;
- I – Потеря теплоизолирующей способности.

## Влияние температуры. Высокая температура.

В нормах проектирования противопожарных мероприятий (противопожарный регламент) металлические элементы рассчитываются (кроме прочностных расчётов) на способность сопротивляться температуре. Чем выше эта способность, тем меньше требуется дополнительной защиты металла.

На ряд зданий, имеющие особый статус (высотные, оригинальные и т.д.) разрабатываются специализированные противопожарные мероприятия. К конструкциям таких зданий предъявляются особые требования, например, для высотных зданий высотой до 100м. предел огнестойкости основных конструкций минимум R180 или REI 180. При высоте более 100 м предел огнестойкости доходит до REI 240.

Необходимо отметить, что иностранные нормы более мягче и компенсируется противопожарная безопасность более развитыми средствами активной защиты.

# BCE

