



# ПРОЧНОСТЬ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ

Курс лекций.

Доцент, кандидат технических наук

**Юрий Владимирович Кожухов**

Научно-инжиниринговая группа «Компрессорная, вакуумная,  
холодильная техника и системы транспорта и переработки газа»

[www.kviht.ru](http://www.kviht.ru)



Доц. Ю.В. Кожухов

ПРОЧНОСТЬ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ. Лекция 3.

## СОДЕРЖАНИЕ



Больше материалов по компрессорной технике на сайте научно-инжиниринговой группы «Компрессорная, вакуумная, холодильная техника и системы транспорта и переработки газа» [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru), +7 (812) 715-41-64

Доц. Ю.В. Кожухов

## ПРОЧНОСТЬ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ. РАЗДЕЛ 3. ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Рóберт Гук (18 июля 1635 — 3 марта 1703)

Английский естествоиспытатель, учёный-энциклопедист. Гука смело можно назвать одним из отцов физики, в особенности экспериментальной, но и во многих других науках ему принадлежат зачастую одни из первых основополагающих работ и множество открытий.

К числу открытий Р.Гука принадлежит открытие пропорциональности между упругими растяжениями, сжатиями и изгибами, и производящими их напряжениями (закон Гука), открытие цветов тонких пленок (то есть, в конечном итоге, явления интерференции света), открытия в акустике, например, демонстрация того, что высота звука определяется частотой колебаний и многое другое.



Больше материалов по компрессорной технике на сайте научно-инжиниринговой группы «Компрессорная, вакуумная, холодильная техника и системы транспорта и переработки газа» [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru), +7 (812) 715-41-64



Доц. Ю.В. Кожухов

## ПРОЧНОСТЬ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ. РАЗДЕЛ 3. СВЯЗЬ МЕЖДУ НАПРЯЖЕНИЯМИ И ДЕФОРМАЦИЯМИ В УПРУГОЙ ОБЛАСТИ

- Диаграмма растяжения образца пластичного материала.

Для понимая упругой области материала рассмотрим диаграмму растяжения пластичного материала. Образцы материалов, предназначенные для испытаний на растяжение, - это призматические стержни круглого или прямоугольного сечения. По международному стандарту длина  $l_0$  должна превосходить диаметр  $d_0$  в 10 раз.

При растяжении образца испытательная машина обеспечивает взаимное удаление его концов с заданным темпом (скоростью) деформирования. Вторым важным узлом машины является силоизмерительное устройство механического или электромеханического типа со стрелочным или цифровым индикатором. Третий обязательный узел машины – устройство, измеряющее деформацию образца в ходе испытания.



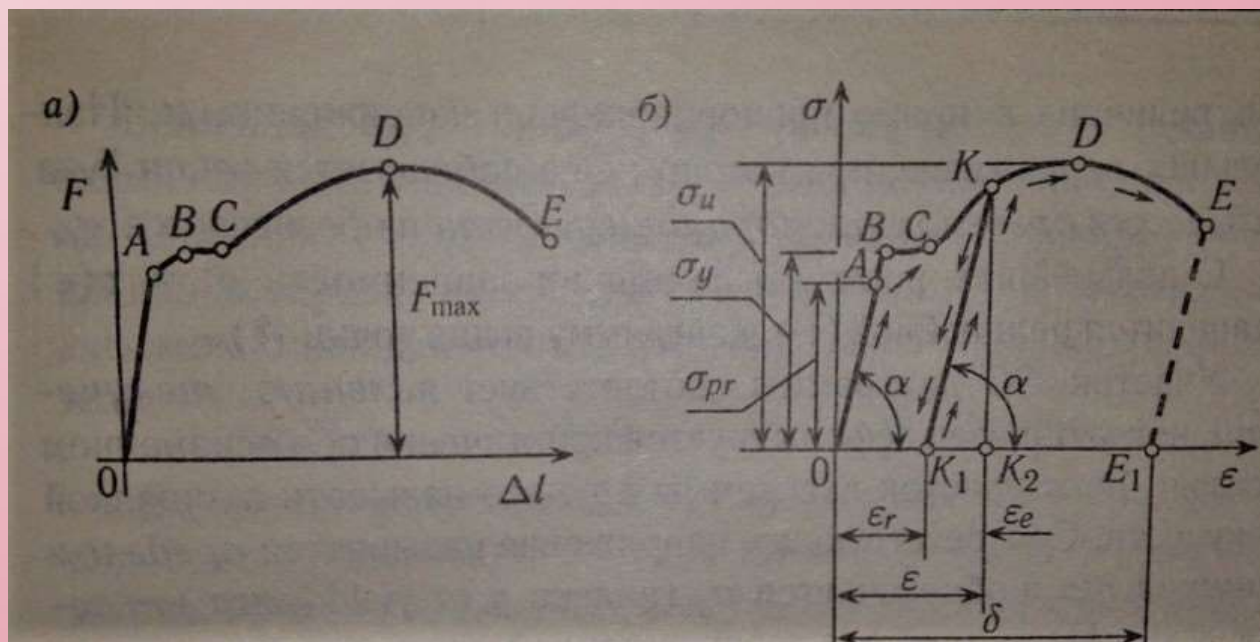
Больше материалов по компрессорной технике на сайте научно-инжиниринговой группы «Компрессорная, вакуумная, холодильная техника и системы транспорта и переработки газа» [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru), +7 (812) 715-41-64

Доц. Ю.В. Кожухов

## ПРОЧНОСТЬ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ. РАЗДЕЛ 3. СВЯЗЬ МЕЖДУ НАПРЯЖЕНИЯМИ И ДЕФОРМАЦИЯМИ В УПРУГОЙ ОБЛАСТИ

По оси ординат откладывают значения нормального напряжения  $\sigma$  в поперечном сечении образца, а по оси абсцисс относительное удлинение  $\epsilon$ . Эту диаграмму называют диаграммой растяжения или условной диаграммой растяжения.

С ростом деформации от нуля происходит увеличение напряжения в согласии с законом Гука. Соответствующий участок диаграммы ОА представляет собой отрезок прямой, т.е. величина  $\epsilon$  прямо пропорциональна напряжению  $\sigma$ . Наибольшее напряжение, при котором ещё соблюдается закон Гука называется пределом пропорциональности и обозначается  $\sigma_{пр}$ . При дальнейшем нагружении образца зависимость перестает быть линейной (участок ВС). Он называется участком (площадкой) текучести.



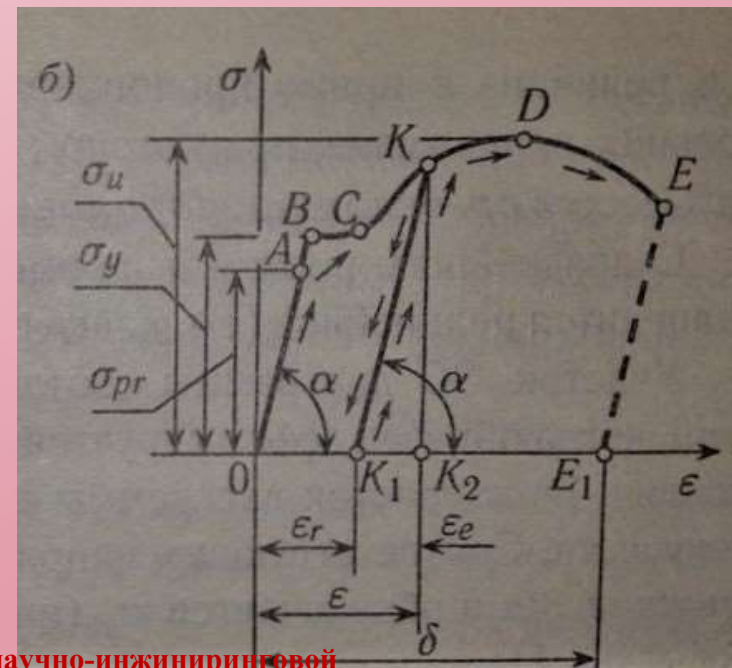
Больше материалов по компрессорной технике на сайте научно-инжиниринговой группы «Компрессорная, вакуумная, холодильная техника и системы транспорта и переработки газа» [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru), +7 (812) 715-41-64

ДОЦ. Ю.В. КОЖУХОВ

## ПРОЧНОСТЬ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ. РАЗДЕЛ 3. СВЯЗЬ МЕЖДУ НАПРЯЖЕНИЯМИ И ДЕФОРМАЦИЯМИ В УПРУГОЙ ОБЛАСТИ

Напряжение, соответствующее площадке текучести называется пределом текучести  $\sigma_y$ . Если испытуемый образец нагрузить до напряжения, превосходящего предела текучести, а затем разгрузить, то в процессе разгрузки график зависимости между напряжением и деформацией отобразится в виде прямой  $KK_1$ . При разгрузке относительная деформация не исчезает полностью. Наибольшее напряжение, разгрузка с которого все ещё не сопровождается появлением остаточных деформаций, называется пределом упругости и обозначается через  $\sigma_e$ .

Таким образом упругой деформацией является та, что после разгрузки детали и снятия нагрузки в детали нет остаточных напряжений и он восстанавливает свою форму.



Больше материалов по компрессорной технике на сайте научно-инжиниринговой группы «Компрессорная, вакуумная, холодильная техника и системы транспорта и переработки газа» [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru), +7 (812) 715-41-64

ДОЦ. Ю.В. КОЖУХОВ

## ПРОЧНОСТЬ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ. РАЗДЕЛ 3. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ДЕФОРМАЦИИ



Больше материалов по компрессорной технике на сайте научно-инжиниринговой группы «Компрессорная, вакуумная, холодильная техника и системы транспорта и переработки газа» [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru), +7 (812) 715-41-64

### ■ Потенциальная энергия деформации

При деформировании тела приложенные к нему внешние силы совершают работу. При статическом нагружении тела, то есть когда нагружение проводится медленно и в любой момент времени тело находится в состоянии равновесия, работа внешних сил, затраченная на деформирование тела, полностью преобразуется в накапливаемую в теле энергию, которая называется потенциальной. При этом считаем, что тело остается упругим а его кинетическая энергия не изменяется.

При разгрузке тела за счет накопленной потенциальной энергии производится работы. При нагружении тела системой сил суммарная работа этих сил и, следовательно, накапливаемая в теле потенциальная энергия деформации согласно закону сохранения энергии не зависят от порядка приложения сил.

ДОЦ. Ю.В. КОЖУХОВ

## ПРОЧНОСТЬ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ. РАЗДЕЛ 3. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ ДЕФОРМАЦИИ

Для одноосного напряженного состояния потенциальная энергия деформации единицы объема линейно-упругого тела  $U$  определяется выражением  $U = \frac{A}{V} = \frac{\frac{1}{2}P\Delta l}{Fl} = \frac{1}{2}\sigma\varepsilon$ , где  $A$  – работа внешних сил;  $V$  – объем элемента упругого тела;  $P$  – внешняя сила;  $F$ ,  $l$ ,  $\Delta l$  – площадь сечения, длина и измерение длины элемента.

Для нелинейно-упругого материала, если нормальная сила изменяется вдоль оси элемента, потенциальная энергия деформации находится суммированием по участкам  $U = \frac{\int P dl}{V} = \int \frac{P dl}{F l} = \int \sigma d\varepsilon$ . Отсюда для приращения потенциальной энергии деформации получим  $\delta U = \sigma d\varepsilon$ .

Для различных случаев одноосного напряженного состояния будем иметь:

$$\delta U = \sigma_x \delta \varepsilon_x, \quad \delta U = \tau_{xy} \delta \gamma_{xy}$$

$$\delta U = \sigma_y \delta \varepsilon_y, \quad \delta U = \tau_{yz} \delta \gamma_{yz}$$

$$\delta U = \sigma_z \delta \varepsilon_z, \quad \delta U = \tau_{zx} \delta \gamma_{zx}$$

Больше материалов по компрессорной технике на сайте научно-инжиниринговой группы «Компрессорная, вакуумная, холодильная техника и системы транспорта и переработки газа» [www.kviint.ru](http://www.kviint.ru), +7 (812) 715-41-64



@KVIINT



ДОЦ. Ю.В. КОЖУХОВ  
ПРОЧНОСТЬ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ. РАЗДЕЛ 3. ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ЭНЕРГИЯ  
ДЕФОРМАЦИИ

В случае трехосного напряженного состояния, если все силы или напряжения возрастают одновременно в одном и то же отношении, можно записать следующее равенство:

$$\delta U = \sigma_x \delta \epsilon_x + \sigma_y \delta \epsilon_y + \sigma_z \delta \epsilon_z + \tau_{xy} \delta \gamma_{xy} + \tau_{zx} \delta \gamma_{zx} (*)$$



Больше материалов по компрессорной технике на сайте научно-инжиниринговой группы «Компрессорная, вакуумная, холодильная техника и системы транспорта и переработки газа» [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru), +7 (812) 715-41-64

ДОЦ. Ю.В. КОЖУХОВ

## ПРОЧНОСТЬ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ. РАЗДЕЛ 3. ОБОБЩЕННЫЙ ЗАКОН ГУКА

- Обобщенный закон Гука

Для одноосного напряженного состояния закон Гука формулируется следующий образом: при увеличении нагрузки деформация возрастает пропорционально увеличению нагрузки:  $\frac{\Delta l}{l} = \frac{1}{E} \frac{P}{F}$  или  $\sigma = E\varepsilon$ .

Здесь  $E$  – модуль упругости, который является коэффициентом пропорциональности. Для большинства реальных упругих тел при напряжениях, меньших предела упругости, с достаточной точностью справедливо следующее положение, которое называется **обобщенным законом Гука**: составляющие тензора деформаций являются линейными однородными функциями от составляющих тензора напряжений.

Для объемного напряженного состояния имеем:  $U = \frac{1}{2} (\sigma_x \varepsilon_x + \sigma_y \varepsilon_y + \sigma_z \varepsilon_z + \tau_{xy} \gamma_{xy} + \tau_{yz} \gamma_{yz} + \tau_{zx} \gamma_{zx})$

Тогда в это случае приращение энергии будет записано в виде:  $2\delta U = \sigma_x \delta \varepsilon_x + \sigma_y \delta \varepsilon_y + \sigma_z \delta \varepsilon_z + \tau_{xy} \delta \gamma_{xy} + \tau_{yz} \delta \gamma_{yz} + \tau_{zx} \delta \gamma_{zx} + \varepsilon_x \delta \sigma_x + \varepsilon_y \delta \sigma_y + \varepsilon_z \delta \sigma_z + \gamma_{xy} \delta \tau_{xy} + \gamma_{yz} \delta \tau_{yz} + \gamma_{zx} \delta \tau_{zx}$ .

Вычитая из последнего выражения  $\delta U$  получим  $\delta U = \varepsilon_x \delta \sigma_x + \varepsilon_y \delta \sigma_y + \varepsilon_z \delta \sigma_z + \gamma_{xy} \delta \tau_{xy} + \gamma_{yz} \delta \tau_{yz} + \gamma_{zx} \delta \tau_{zx}$



Венне (материалов из компрессорной техники) на сайте научно-технической группы «Компрессорная, вакуумная, холодильная техника и системы транспорта и переработки газа» [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru), +7 (812) 715-41-64

ДОЦ. Ю.В. КОЖУХОВ

## ПРОЧНОСТЬ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ. РАЗДЕЛ 3. ОБОБЩЕННЫЙ ЗАКОН ГУКА

Отсюда следует, что изменение потенциальной энергии деформации полностью определяется изменением напряженного состояния рассматриваемого элементарного объема. Следовательно можно составить выражение для приращения потенциальной энергии деформации, пользуясь определением полного дифференциала

$$\delta U = \frac{\partial U}{\partial \sigma_x} \delta \sigma_x + \frac{\partial U}{\partial \sigma_y} \delta \sigma_y + \frac{\partial U}{\partial \sigma_z} \delta \sigma_z + \frac{\partial U}{\partial \tau_{xy}} \delta \tau_{xy} + \frac{\partial U}{\partial \tau_{yz}} \delta \tau_{yz} + \frac{\partial U}{\partial \tau_{zx}} \delta \tau_{zx}.$$

Сравнивая предыдущее выражение и выражение (\*) можем написать

$$\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial \sigma_x}, \varepsilon_y = \frac{\partial U}{\partial \sigma_y}, \varepsilon_z = \frac{\partial U}{\partial \sigma_z},$$
$$\gamma_{xy} = \frac{\partial U}{\partial \tau_{xy}}, \gamma_{yz} = \frac{\partial U}{\partial \tau_{yz}}, \gamma_{zx} = \frac{\partial U}{\partial \tau_{zx}}.$$



Больше материалов по компрессорной технике на сайте научно-инжиниринговой группы «Компрессорная, вакуумная, холодильная техника и системы транспорта и переработки газа» [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru), +7 (812) 715-41-64

ДОЦ. Ю.В. КОЖУХОВ

## ПРОЧНОСТЬ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ. РАЗДЕЛ 3. ОБОБЩЕННЫЙ ЗАКОН ГУКА

Таким образом, производные представляют собой частные производные от потенциальной энергии деформации по соответствующим напряжениям.

В случае трехосного напряженного состояния общий вид такой квадратичной функции можно представить следующим образом:

$$\begin{aligned} U = & \frac{1}{2} (c_{11}\sigma_x^2 + c_{22}\sigma_y^2 + c_{33}\sigma_z^2 + c_{44}\tau_{xy}^2 + c_{55}\tau_{yz}^2 + c_{66}\tau_{zx}^2 + 2c_{12}\sigma_x\sigma_y + 2c_{13}\sigma_x\sigma_z + 2c_{14}\sigma_x\tau_{xy} + \\ & 2c_{15}\sigma_x\tau_{yz} + 2c_{16}\sigma_x\tau_{zx} + 2c_{23}\sigma_y\sigma_z + 2c_{24}\sigma_y\tau_{xy} + 2c_{25}\sigma_y\tau_{yz} + 2c_{26}\sigma_y\tau_{zx} + 2c_{34}\sigma_z\tau_{xy} + 2c_{35}\sigma_z\tau_{yz} + \\ & 2c_{36}\sigma_z\tau_{zx} + 2c_{45}\tau_{xy}\tau_{yz} + 2c_{56}\tau_{yz}\tau_{zx}). \end{aligned}$$



Больше материалов по компрессорной технике на сайте научно-инжиниринговой группы «Компрессорная, вакуумная, холодильная техника и системы транспорта и переработки газа» [www.kviht.ru](http://www.kviht.ru), +7 (812) 715-41-64