



# ПРОЧНОСТЬ

Авторы: Е. З. Король

---

**ПРОЧНОСТЬ** твёрдого тела, свойство сохранять на протяжении определённого времени сплошность, целостность, конфигурацию, размеры, способность к упругой деформации под действием внешних нагрузок разл. природы (механич., термич., электрич., магнитных и др.). В узком смысле П. – механич. свойство реальных твёрдых тел сопротивляться разрушению. Понятие П. играет существенную роль в фундаментальных (физика твёрдого тела, механика сплошных сред и деформируемого твёрдого тела) и прикладных (сопротивление материалов, механика грунтов, материаловедение и др.) науках.

По характеру временного изменения, создаваемого внешними нагрузками, различают нагрузки: стационарные, квазистационарные, малоцикловые (действующие периодически с числом циклов  $<10^4$ ), циклические (число циклов от  $10^4$  до  $10^5$ ), многоцикловые (число циклов  $>10^5$ ), динамические и ударные. Соответствующие названия носят и разл. типы П.: статич., динамич., ударная (скорость деформации  $10^{-4}$ – $10^{-7}$  с), мало- и многоцикловая усталость и т. п. В характеристику П. добавляют также тип внешней нагрузки (напр., термопрочность).

## Физическая природа прочности

П. твёрдых тел обусловлена силами взаимодействия между атомами и ионами, составляющими тело. Эти силы зависят гл. обр. от взаимного расположения атомов. Напр., сила взаимодействия двух соседних атомов (если пренебречь влиянием окружающих атомов) зависит лишь от расстояния между ними. При равновесном расстоянии (ок. 10 нм) эта сила равна нулю. При меньших расстояниях сила положительна и атомы отталкиваются, при больших – притягиваются. На некотором критич. расстоянии

$r_{кр}$  сила притяжения по абсолютной величине максимальна и равна

$F_T$ . Напр., если при растяжении цилиндрич. стержня с поперечным сечением

$S$  действующая сила (нагрузка)

$P$ , направленная вдоль его оси, такова, что приходящаяся на данную пару атомов

внешняя сила превосходит макс. силу притяжения

$F_T$ , то атомы беспрепятственно удаляются друг от друга. Однако чтобы тело

разрушилось вдоль некоторой поверхности, необходимо, чтобы все пары атомов,

расположенные по обе стороны от рассматриваемой поверхности, испытывали силу,

превосходящую

$F_T$ . Напряжение, отвечающее силе

$F_T$ , называется теоретич. прочностью на разрыв

$\sigma_T$  (

$\sigma_T \approx 0,1E$ , где

$E$  – модуль Юнга). Однако на практике наблюдается разрушение при нагрузке

$P^*$ , которой соответствует напряжение

$\sigma = P^*/S$ , в 100–1000 раз меньшее

$\sigma_T$ . Расхождение теоретич. П. с действительной объясняется неоднородностями

структуры тела (границы зёрен в поликристаллич. материале, посторонние

включения, дефекты структуры и др.), из-за которых нагрузка распределяется

неравномерно по сечению тела.

Если на участке поверхности малых размеров (но значительно превышающем сечение

одного атома) локальное напряжение окажется больше

$\sigma_T$ , вдоль этой площадки произойдёт разрыв. Края разрыва разойдутся на

расстояние, большее

$r_{кр}$ , на котором межатомные силы уже малы, и образуется микротрещина.

Зарождению микротрещин при напряжении ниже

$\sigma_T$  способствуют термич. флуктуации. Локальные напряжения особенно велики у края

образовавшейся трещины, где происходит концентрация напряжений, причём они тем

больше, чем больше её размер. Если этот размер больше некоторого критического, на

атомы у края трещины действует напряжение, превосходящее  $\sigma_T$ , и трещина растёт

дальше по всему сечению тела, наступает разрушение.

# Теории прочности

В конструкциях при нагружении возникает, как правило, сложное напряжённое состояние, характеризующееся в каждой точке тремя гл. напряжениями

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  (нумерация определяется условиями

$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ ). Для расчётов на П. используют теории (критерии) П. –

формализованные соотношения, связывающие определённую комбинацию гл. напряжений

$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$  с опасным напряжением

$\sigma_{оп}$ , при котором начинается разрушение (пределом прочности), определённым из опытов на одноосное нагружение.

В первой теории П. (теории макс. нормальных напряжений) предполагается, что разрушение при сложном напряжённом состоянии наступает тогда, когда макс. гл. напряжение

$\sigma_1$  равно опасному напряжению:

$\sigma_1 = \sigma_{оп}$ . Эта теория не учитывает влияние второго (а при трёхосном напряжённом состоянии и третьего) гл. напряжения, однако она хорошо согласуется с эксперим. данными для хрупких материалов, когда первое гл. напряжение намного больше двух остальных.

В основе второй теории П. (теории макс. линейных деформаций) лежит предположение о том, что разрушение происходит при достижении макс. линейной деформацией опасного значения:

$\varepsilon_1 = \varepsilon_{оп}$ . Деформацию  $\varepsilon_{оп}$  можно найти из закона Гука:  $\varepsilon_{оп} = \sigma_{оп} / E$ , где

$E$  – модуль упругости (модуль Юнга). С учётом обобщённого закона Гука условие разрушения, соответствующее второй теории П., имеет вид:

$\sigma_1 - \nu(\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_{оп}$ , где

$\nu$  – коэф. Пуассона. Данная теория хорошо подтверждается для хрупких материалов в опытах на трёхосное сжатие.

Третья теория П. (теория макс. касательных напряжений) основана на гипотезе, что причиной разрушения являются макс. касательные напряжения

$\tau_{max}$ . Условие разрушения в этой теории П.:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_{оп}$$

Согласно энергетич. теории П., условие П. имеет вид

$$\sqrt{\frac{1}{2} \left[ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]} = \sigma_{оп}$$

Третья теория и энергетич. теория П. хорошо подтверждаются в опытах с пластичными материалами.

Для материалов, по разному сопротивляющихся растяжению и сжатию, часто используется теория прочности Мора, в которой условие П. определяется равенством

$$\sigma_1 - k\sigma_3 = \sigma_{оп}^{(p)}, \text{ где}$$

$$k = \sigma_{оп}^{(p)} / \sigma_{оп}^{(c)},$$

$\sigma_{оп}^{(p)}$  – опасное напряжение при растяжении,

$\sigma_{оп}^{(c)}$  – при сжатии.

С развитием пром. и транспортного машиностроения, строительством сложных инж. сооружений возникла потребность в др. критериях П. Были разработаны теории П., связывающие между собой напряжения, деформации, время и темп-ру. Это теория Губерта – Генки – Мизеса, учитывающая энергию формоизменения нелинейно-упругих деформаций, обобщённая теория октаэдрич. напряжений и др. В 1933 С. Н. [Журков](#) и А. П. [Александров](#) создали молекулярно-кинетич. теорию П., базирующуюся на термофлуктуационной физич. природе элементарных актов межатомных и межмолекулярных перегруппировок и на активирующем влиянии механич. напряжений. В 20 в. при строительстве ЛА, трубопроводов и др. оказалась необходимой разработка критериев П., учитывающих процессы накопления повреждённости. На основе решений задач о концентрации напряжений в теле с вырезами и разрезами в 1960-х гг. разработана теория трещин и введены параметры повреждённости разл. масштаба, которые были использованы А. А. Ильиным при создании теоретич. основ кинетич. теории П. и Ю. Н. [Работновым](#) в её практич. применении.

## Современные проблемы

Решение актуальных задач П. связано с развитием феноменологич. глобальных критериев П. при двух- и трёхосном напряжённо-деформированном состоянии в областях с разными знаками гл. напряжений и деформаций, при наложении переменной нагрузки на статическую, особенно в зонах высокой концентрации напряжений. Рассматриваются: задачи расчёта П. при нерегулярных и сложных режимах повторных нагружений, в т. ч. контактном переменном напряжённом состоянии; усталость при высоких и низких темп-рах, а также при импульсных нагрузках (импульсная обработка металлов); установление условий П. при неоднородном распределении механич. свойств конструктивных элементов из армированных волокнистых материалов, условий термопрочности тугоплавких материалов (вольфрама, молибдена, ниобия, тантала, разл. сплавов на их основе). Разрабатываются теории и методы расчёта структурно-чувствит. свойств материалов (хрупкая П., накопление повреждений, связанных с расшатыванием, разрушением структуры, длительная П., усталость при средних и малых амплитудах колебаний). Решение задач П. горных выработок, расчёт сейсмостойкости конструкций и сооружений связаны с развитием теории тектонич. процессов и явлений с учётом реологич. свойств и особенностей распространения возмущений в грунтах и реальных схем залегания пластов в земной коре.

## Литература

Лит.: Ильющин А. А., Ленский В. С. Соппротивление материалов. М., 1959; Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. М., 1974; Ионов В. И., Огибалов П. М. Прочность пространственных элементов конструкций. М., 1979. Ч. 1: Основы механики сплошных сред; Ильющин А. А. Труды. М., 2009. Т. 4: Моделирование динамических процессов в твердых телах и инженерные приложения.