

ЛЕКЦИЯ . «ЭЛЕМЕНТЫ
БИОМЕХАНИКИ»

1. Сокращение мышцы

1. Мембрана мышечных клеток – сарколемма – электровозбудима и способна проводить потенциал действия. Ответом на возбуждение мышечного волокна является сокращение с помощью сократительного аппарата клетки – миофибриллы.

Миофибриллы нити двух типов: толстые – миозиновые, тонкие – актиновые.

Опр. **Сократимость** – способность мышцы укорачиваться при возбуждении, в результате чего возникает сила тяги.

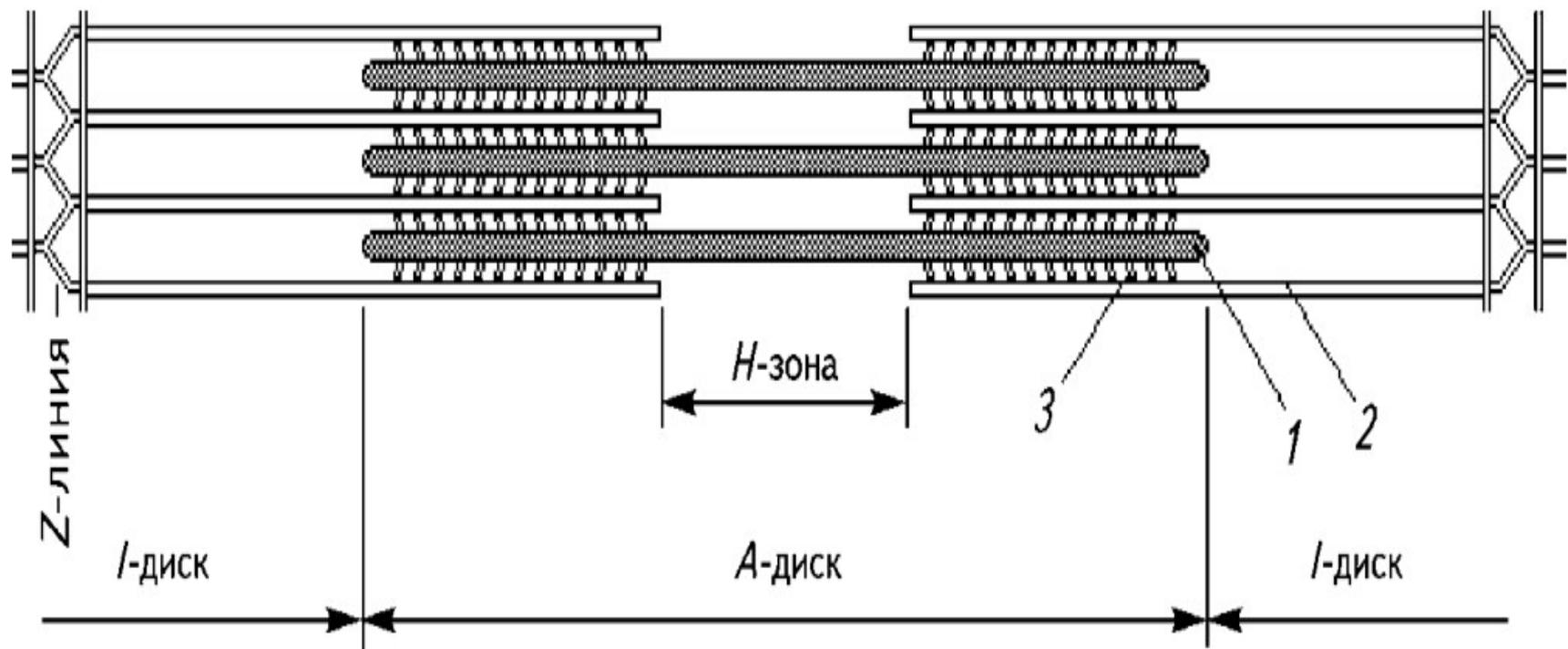


Рис. 3.2.1. Строение поперечнополосатой мышцы (продольный срез):

1 — толстая (миозиновая) нить; 2 — тонкая (актиновая) нить; 3 — поперечные мостики, обеспечивающие связь между актиновыми и миозиновыми нитями

2. При сокращении мышцы длина актиновых и миозиновых филаментов не изменяется. Длина диска A не изменяется, диск I укорачивается, полоса H исчезает

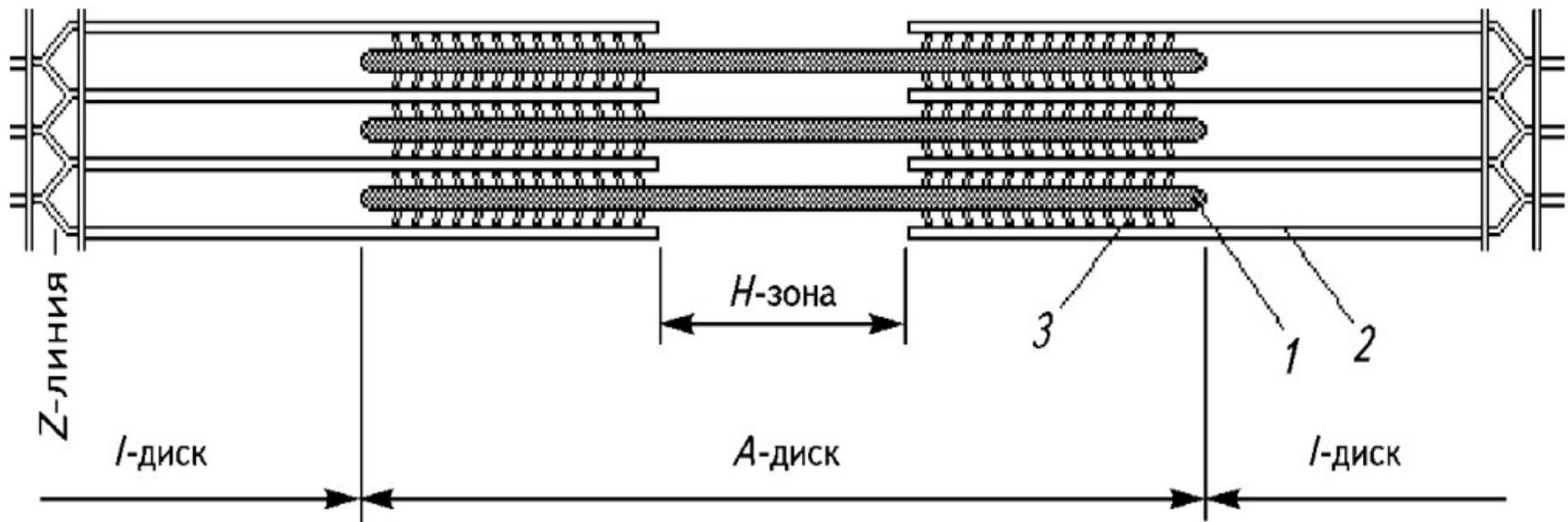


Рис. 3.2.1. Строение поперечнополосатой мышцы (продольный срез):

1 — толстая (миозиновая) нить; 2 — тонкая (актиновая) нить; 3 — поперечные мостики, обеспечивающие связь между актиновыми и миозиновыми нитями

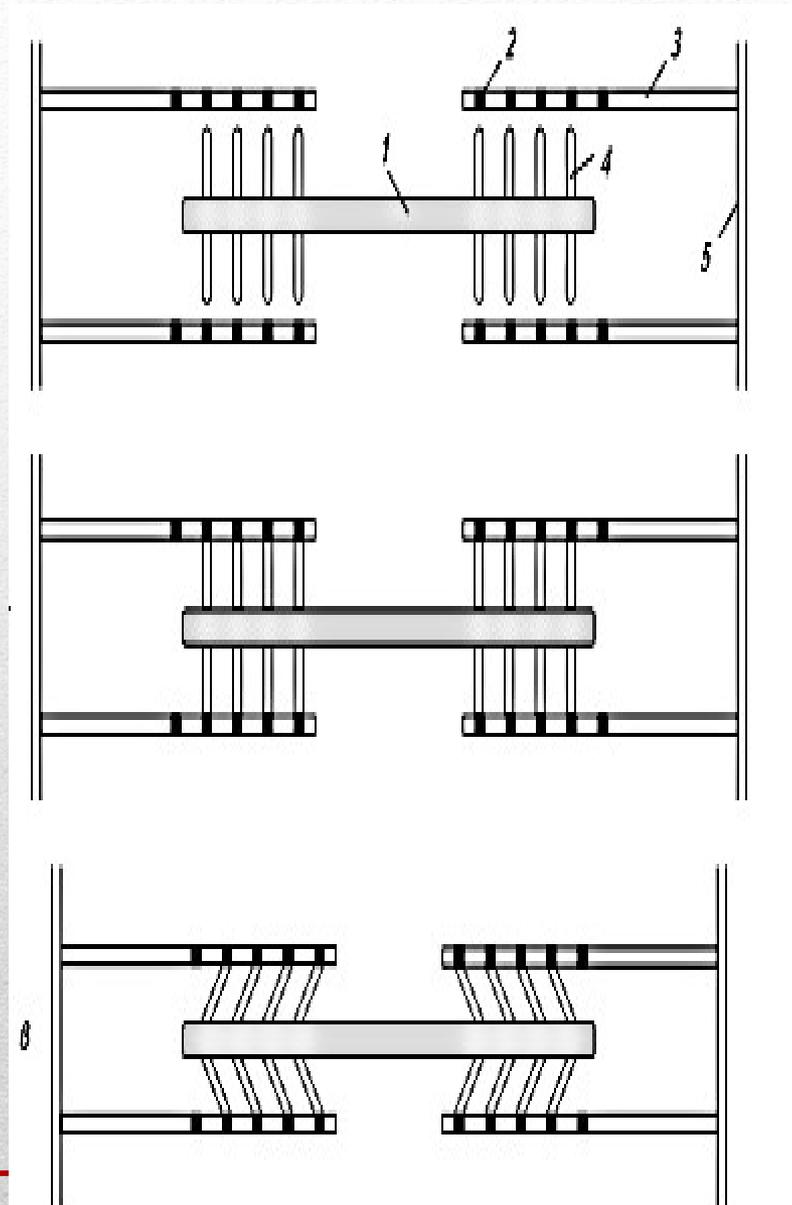
I этап: в состоянии покоя актин и миозин не взаимодействуют

II этап: при распространении потенциала действия

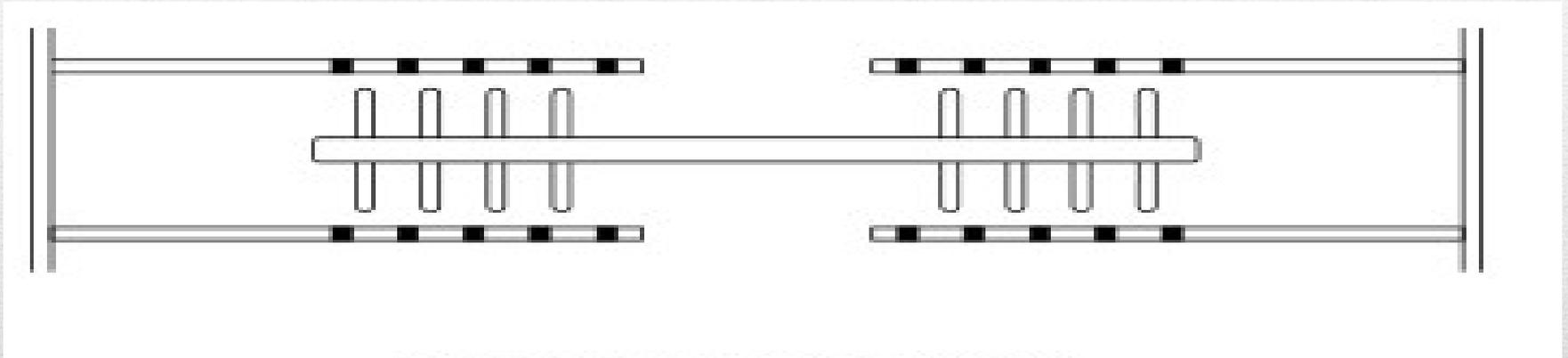
активизирует выход

Ca²⁺ в цитоплазму, необходимых для взаимодействия миозина и актина.

III этап: миозиновая головка наклоняется и протаскивает актиновую нить относительно миозиновой (10нм)



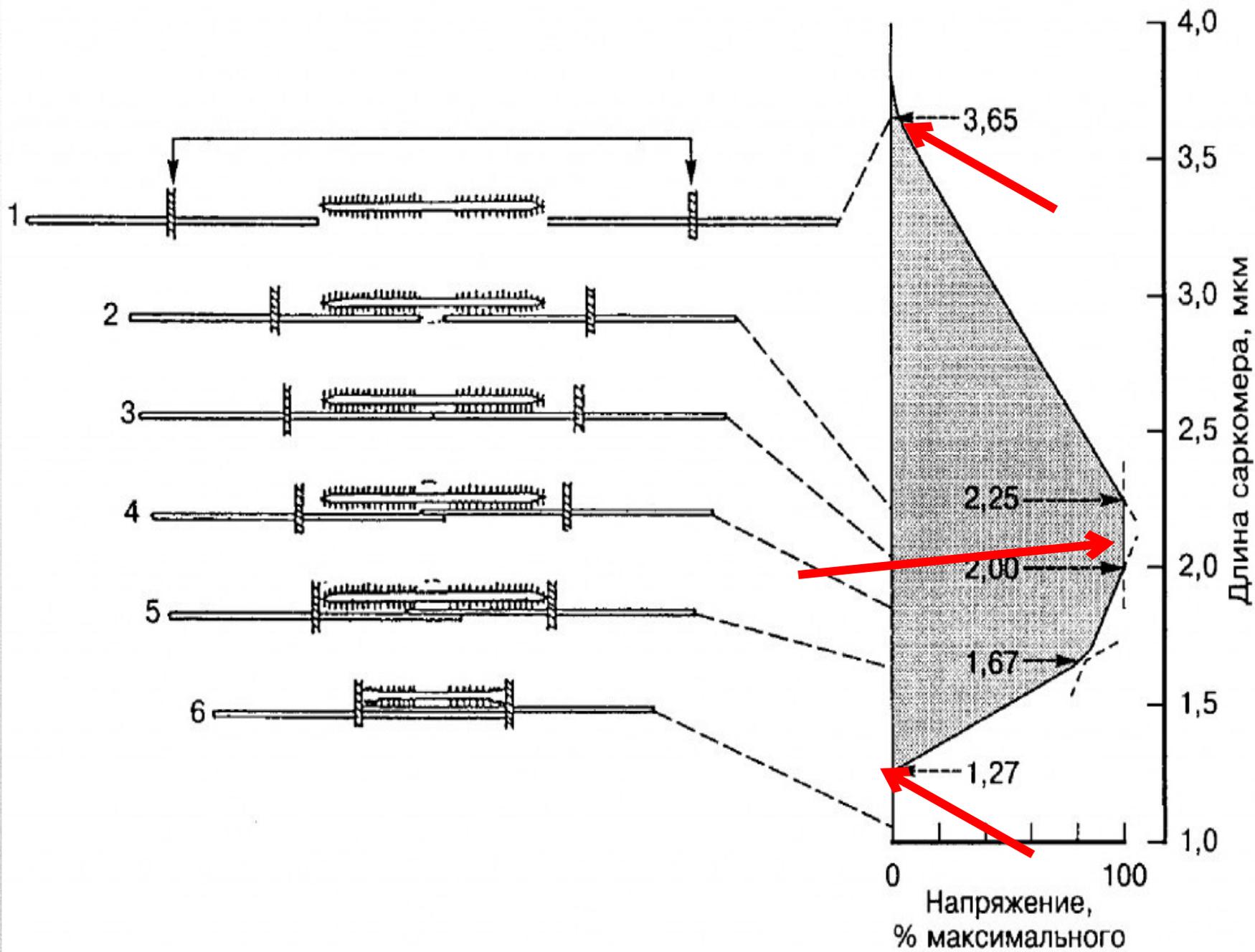
IV этап: образовавшийся актин-миозиновый комплекс препятствует дальнейшему скольжению нитей относительно друг друга. Для их разъединения необходима энергия АТФ.



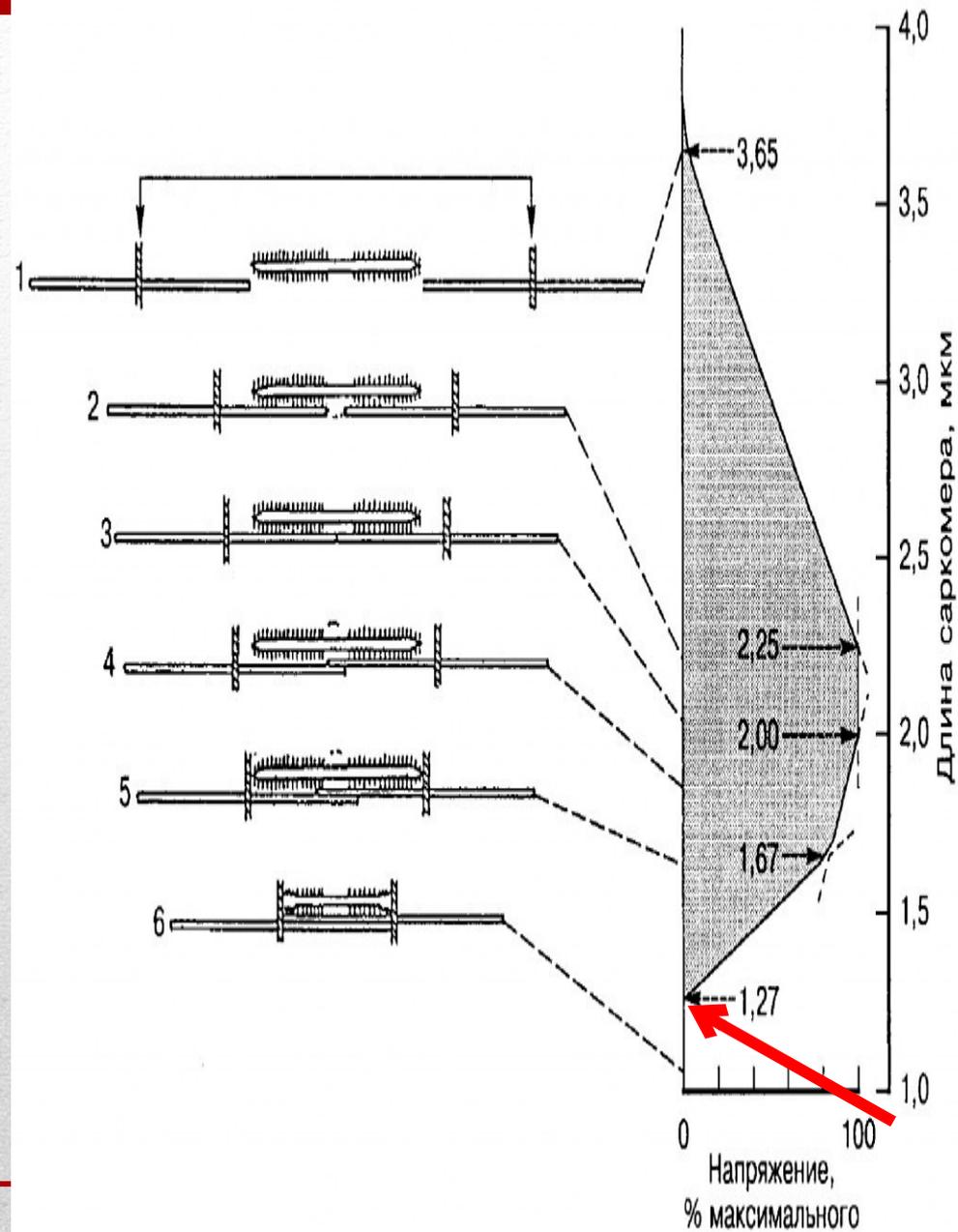
При расслаблении мышцы активизируется кальциевый насос, понижая концентрацию кальция в цитоплазме, т.е. связь между актином и миозином не может уже образовываться

Как зависит сила, развиваемая саркомером, от его длины при деформации?

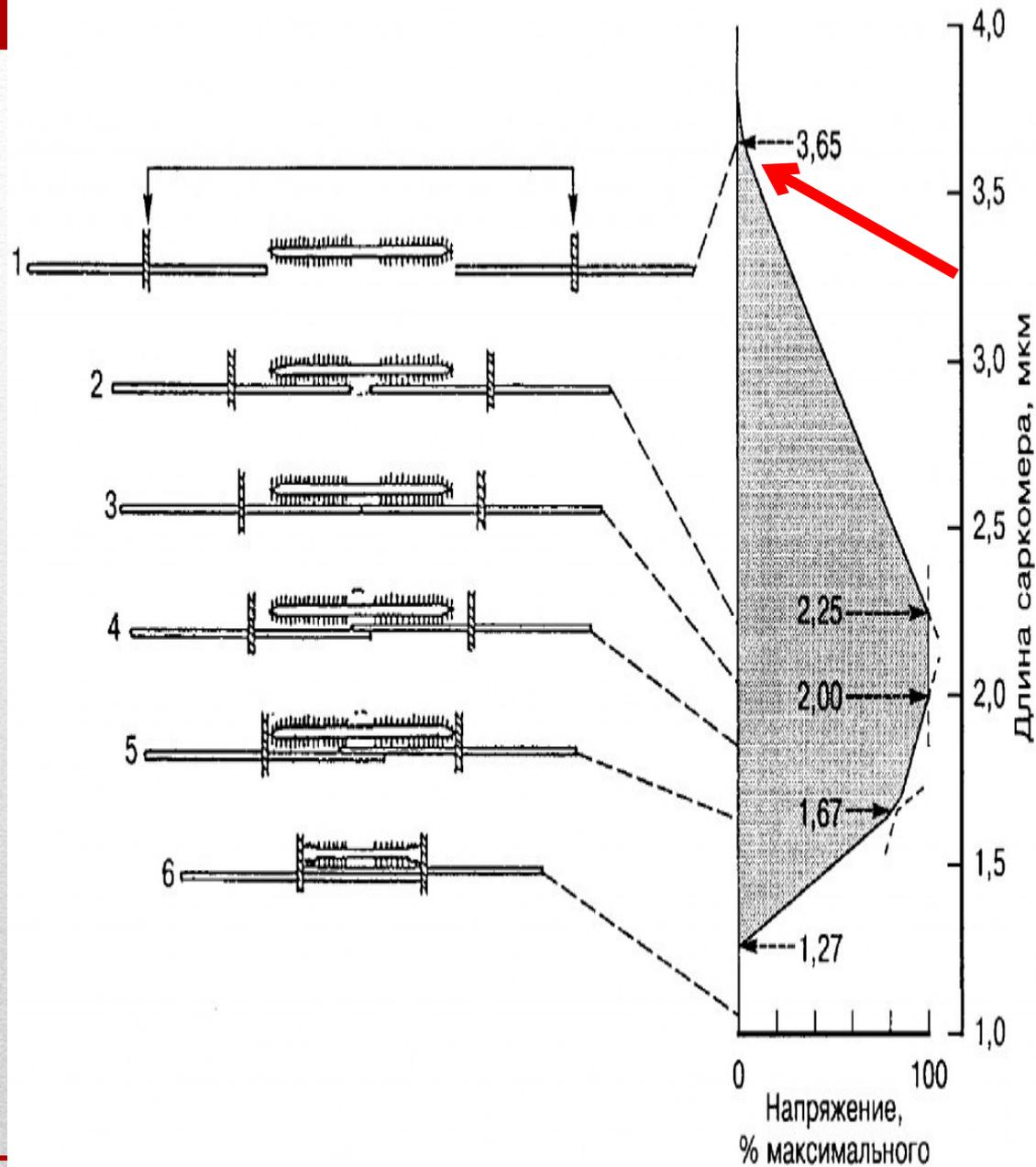
Каждый поперечный мостик действует подобно независимому генератору силы. Поэтому уровень силы, развиваемой во время сокращения, должен зависеть от количества одновременных взаимодействий между толстыми и тонкими филаментами. Действительно, существуют критические значения длины саркомера, при которых развиваемая им сила падает до нуля



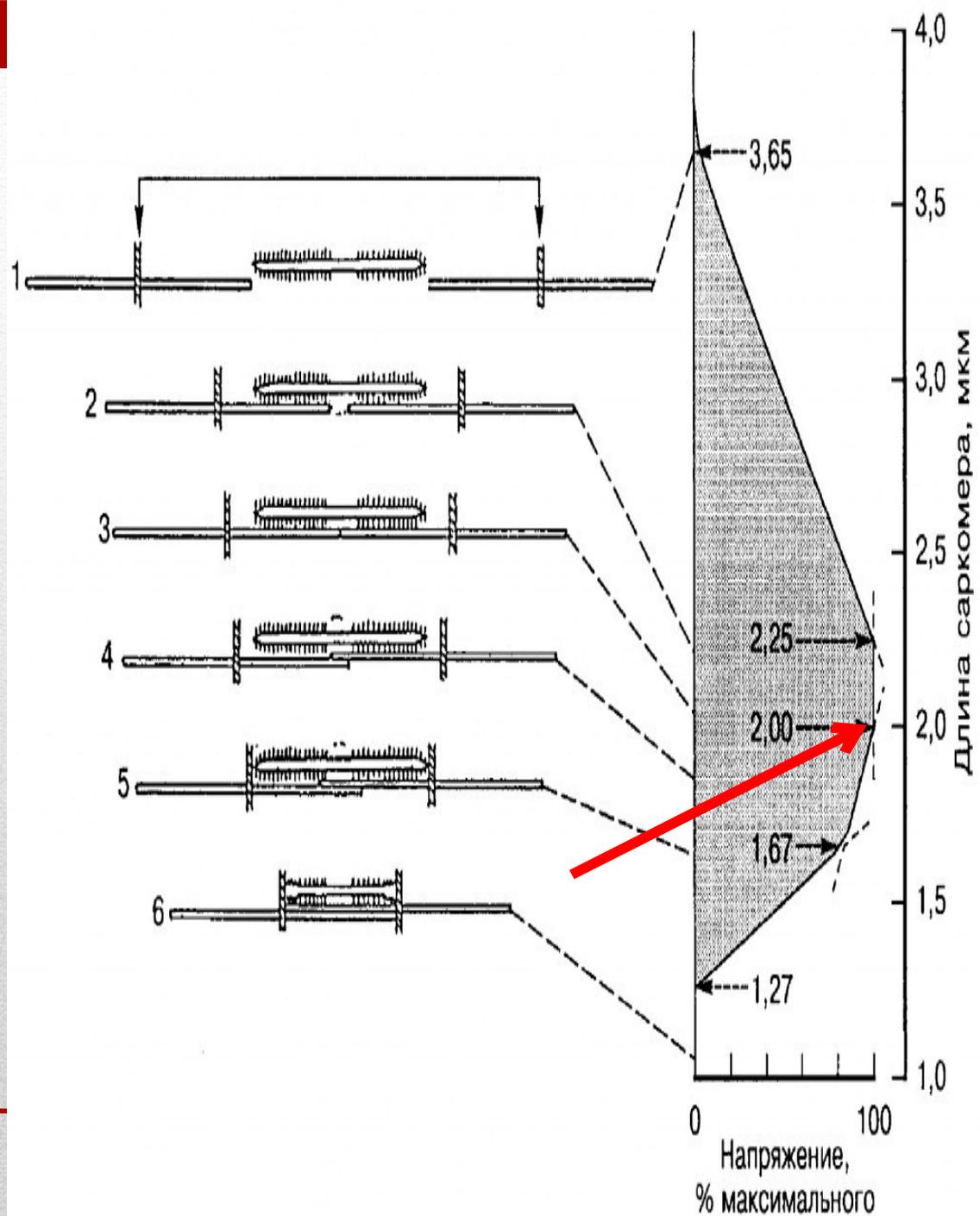
Первое критическое значение длины саркомера равно 1,27 мкм - максимальное укорочение мышцы - регулярность расположения филаментов нарушается, они искривляются, а количество одновременных взаимодействий между филаментами резко уменьшается, поэтому сила падает до нуля.



Второе критическое значение длины саркомера равно 3,65 мкм - максимальному удлинению мышцы - перекрытие толстых и тонких филаментов нет, поэтому сила уменьшается до нуля.



Максимальная сила,
которую способен
развить саркомер,
соответствует значениям
его длины – от 1,67 до
2,25 мкм.



Под действием внешних сил возникают **деформации** (т.е. изменение размеров и формы) тел.

Опр. Деформация – физическое явление, при котором наблюдается изменение формы, размеров тел при наличии внешних воздействий

Опр. Упругая деформация – деформация, при которой после прекращения действия внешних сил восстанавливаются прежние форма и размеры тела

Опр. Сила упругости – сила, возникающая при деформации тел

Опр. Абсолютное удлинение – ф.в., характеризующая изменение размеров тел при деформации относительно их первоначальных размеров

$$\Delta l = |l_2 - l_1|$$

$$\Delta l = [м]$$

Опр. Относительно удлинение – ф.в., характеризующая величину изменения размеров тел при деформации, выраженная в процентах

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \cdot 100\%$$

Опр. Механическое напряжение –

-ф.в., характеризующая величину действия силы на площадь поперечного сечения деформируемого тела.

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

или

$$\sigma = \frac{dF}{dS}$$

$$\sigma = \left[\frac{H}{M^2} \right]$$

Закон Р. Гука в локальной форме

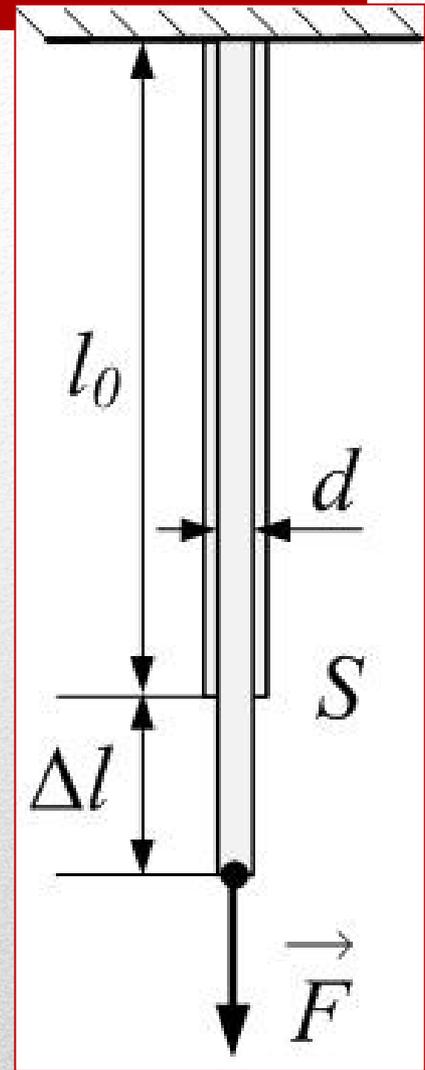
$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

где E – модуль Юнга.

Опр. Модуль Юнга – ф.в.,

характеризующая механическое

напряжение, вызывающее относительное удлинение равное единице.



Установим взаимосвязь силы, вызывающей деформацию тела и характеристик самого тела (размеров, вещества и т.п.)

$$F = \sigma \cdot S = E \cdot \varepsilon \cdot S = E \cdot \frac{\Delta l}{l} \cdot S = \frac{ES}{l} \Delta l = k \cdot \Delta l$$

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad \varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

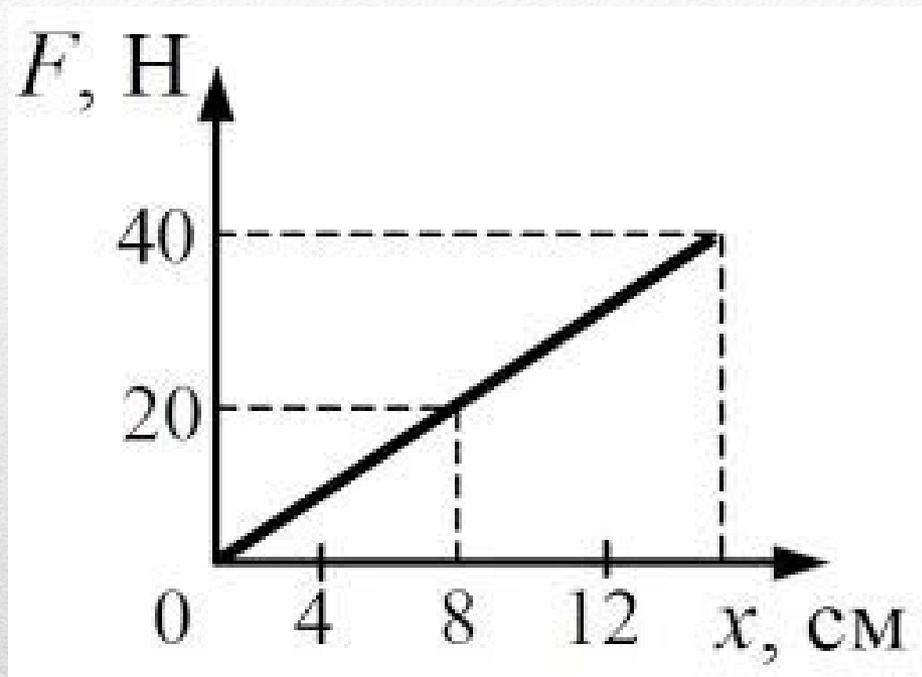
Закон Р. Гука для деформации растяжения и сжатия

$$F = - k \cdot \Delta l$$

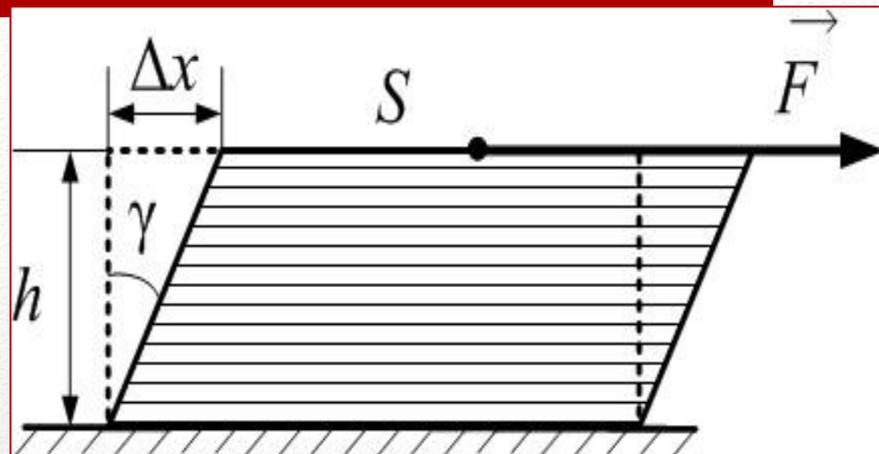
где $k = \frac{ES}{l}$ - коэффициент упругости (жесткость)

Закон Гука для упругой деформации:

$$F_{\text{упр.}} = -k\Delta l$$



Опр. Деформация сдвига – деформация, при которой наблюдается смещение слоев тела относительно друг друга под внешним воздействием



Тангенсальное (касательное напряжение)

$$\tau = \frac{dF}{dS} \qquad \tau = G \cdot \gamma$$

Закон Р. Гука для деформации сдвига:

где $G = \frac{E}{2(1 + \mu)}$ – модуль сдвига,

$$K_{\Pi} = - \frac{\varepsilon_{\perp}}{\varepsilon_{\parallel}}$$

- коэффициент Пуассона

Экспериментальная зависимость механического напряжения от относительной продольной деформации

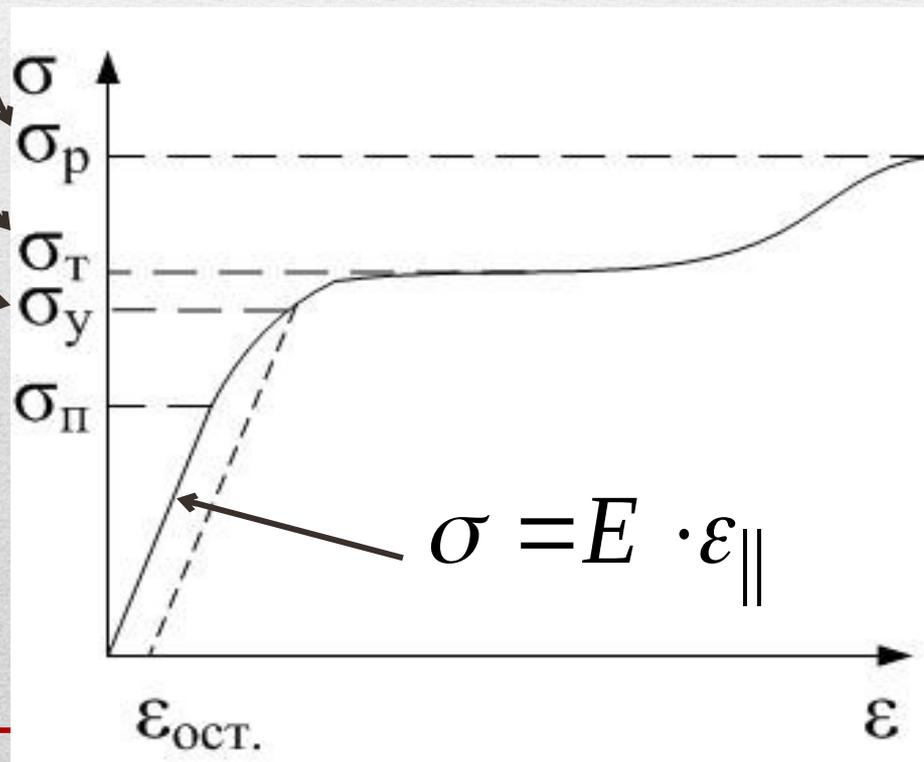
Пределы:

Прочности

Текучести

Упругости

Пропорциональности



Опр. Упругая деформация - деформация, при которой тело после снятия нагрузки возвращается к первоначальным размерам и форме (можно пренебречь остаточной деформацией).

Опр. Пластичная деформация - деформация, при которой тело после снятия нагрузки изменяет форму и размеры

Опр. Прочность деформируемого тела - способность тела сопротивляться разрушению при действии внешних сил.

Опр. Предел прочности материала - напряжение в материале при различных видах деформации, соответствующее максимальному (до разрушения образца) значению нагрузки

Опр. Разрушающее напряжение - отношение нагрузки, необходимой для полного разрушения образца, к его поперечному сечению в месте разрушения.

Механические свойства биологических тканей:

1) Большинство этих тканей **анизотропно**, что связано, прежде всего, с определенным порядком в расположении строящих ее структурных элементов.

Опр. Анизотропия – ф.я., при котором физические свойства вещества проявляются по-разному в различных направлениях

2) Почти все биоткани обнаруживают при деформировании характерные временные эффекты:

а) при **фиксированной деформации** происходит **релаксация** (спад) напряжения;

б) при **фиксированной нагрузке (напряжении)** рост деформации во времени;

в) при **циклическом нагружении** колебания напряжений и деформаций различаются по фазе;

г) механические характеристики тканей часто зависят от скорости деформации.

3) Зависимостям напряжения от деформации при нагрузке и разгрузке соответствуют разные кривые, формируется так называемая "петля гистерезиса"

Вывод: Биологическая ткань проявляет вязкоупругие свойства

Что значит «вязкоупругие свойства»?

Работа внешних сил может **запасаться** в единице объема среды в виде потенциальной энергии деформации (объемная плотность упругой энергии или удельная энергия упругой деформации W).

Работа внешних сил может **необратимо рассеиваться (диссипировать)**, расходуясь на преодоление сил внутреннего трения и переходя в тепло. Этот процесс характеризуется интенсивностью диссипации D в единице объема среды в единицу времени.

1. Если при деформации $W \neq 0$, а $D = 0$, среда называется **упругой**, при деформировании такой среды диссипация внешней работы отсутствует, и вся запасенная энергия при разгрузке тела переходит в работу по восстановлению формы и размеров образца.

2. Если же $W = 0$, $D \neq 0$, среда называется **вязкой**, при ее деформировании вся внешняя работа диссипирует (превращается в тепло). После снятия нагрузки вязкая среда остается в том же состоянии, в котором она была в момент снятия нагрузки. Все деформации в вязкой среде необратимы.

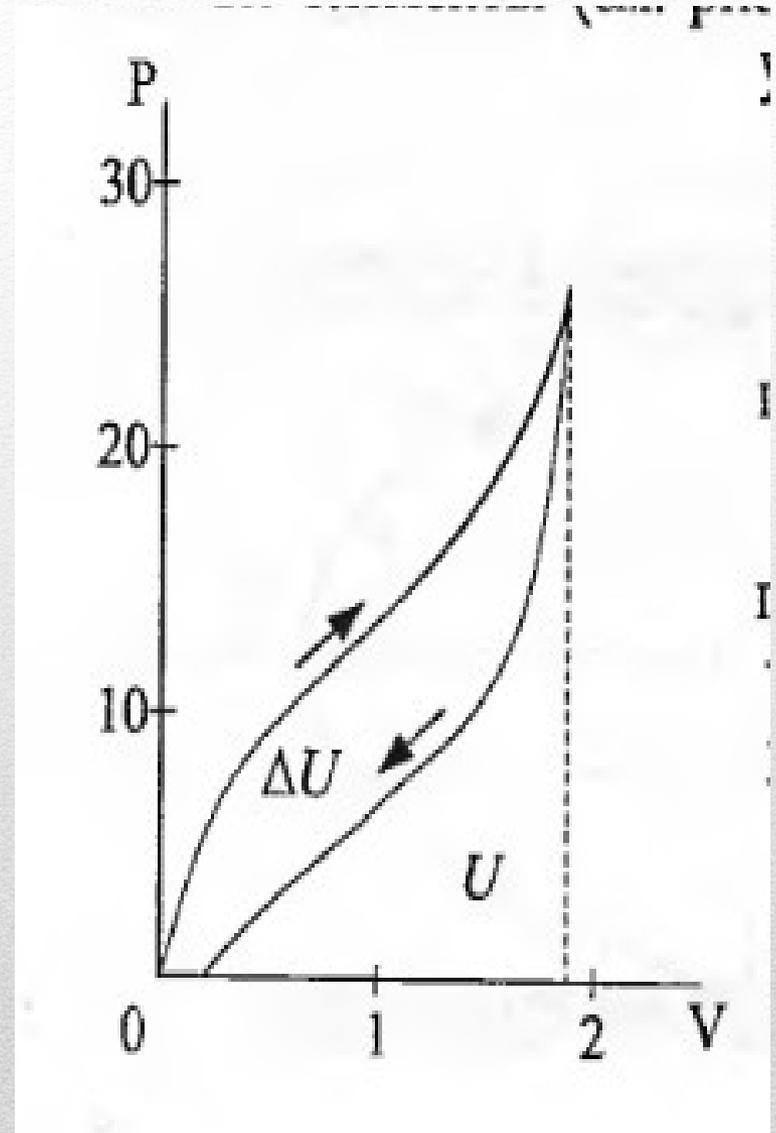
3. Если $W \neq 0$ и $D \neq 0$, среда называется **вязкоупругой**. При ее деформировании какая-то часть внешней работы диссипирует (т.е. необратимо рассеивается в виде тепла), а остальная запасается в материале в виде энергии упругой деформации. После прекращения действия внешних сил в такой среде происходит упругое восстановление и одновременно с этим диссипация накопленной в ней энергии.

Вывод:

1. Для мышцы возникающая в мышце сила упругости не пропорциональна удлинению.

Вначале мышца растягивается легко, а затем даже для небольшого ее растяжения необходимо прикладывать все большую силу (трикотажный шарф), т.е. жесткость мышцы с ее удлинением возрастает. Из этого следует, что мышца представляет собой систему, обладающую переменной жесткостью.

2. Живые ткани - вязко-упругие или упруго-вязкие механические системы. Изменение поверхностной силы при растяжении и при возвращение в исходное состояние не совпадают. Площадь внутри графика – энергия, потерянная в результате растяжения и последующего упругого укорочения.



3. Мышцы обладают запасом прочности, то есть способностью сопротивляться разрушению под действием внешних сил

Предел прочности мышцы оценивается значением растягивающей силы, при которой происходит ее разрыв. Установлено, что предел прочности для миофибрилл равен 1,6-2,5 Н/см², мышц – 20-40 Н/см², фасций – 1400 Н/см², сухожилий – 4000 – 6000 Н/см²; костной ткани – 9000 – 12500 Н/см². При этом предел прочности каната из хлопка на растяжение составляет 3760 – 6770 Н/см²

4. Для мышц характерна релаксация, то есть уменьшения с течением времени силы тяги при постоянной длине.

Для оценки релаксации используют показатель – время релаксации, то есть отрезок времени, в течение которого натяжение мышцы уменьшается в e раз от первоначального значения.

2. Виды сокращения мышц. Тепловая мощность мышечного сокращения

1. В реальных условиях в целой мышце отдельные акты перемещения нитей не синхронизованы, поэтому её сокращение носит плавный характер, отражая средний уровень возбуждения отдельных двигательных единиц. При поступлении серии возбуждающих импульсов мостики, совершают многократные акты замыкания и развития усилий. Если концы волокна свободны, мостики перемещают нити. расстояния.
 2. **Изометрическое сокращение:** длина мышцы почти не изменяется и вся сила затрачивается на развитие напряжения, т.е. на совершение статической работы
-

Изотоническое сокращение: мышечные волокна укорачиваются в условиях постоянной внешней нагрузки.

Уравнение Хилла:

$$(P + a)(v + b) = (P_0 + a)b = a(v_{\max} + b)$$

v - скорость укорочения мышцы

P_0 - мышечная сила

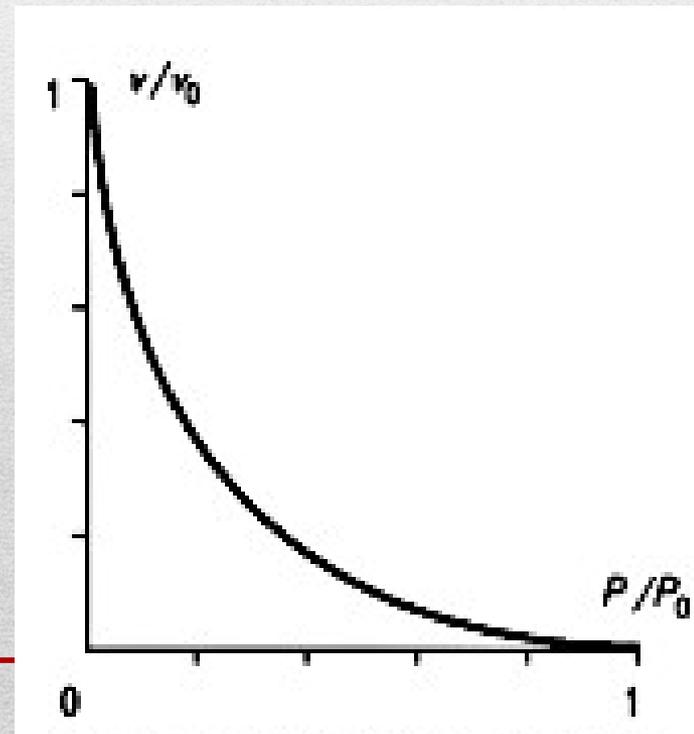
v_{\max} - максимальная

скорость укорочения

P - сила, развиваемая мышцей при нагрузке,

невызываемой изменение ее длины

a и b константы



$$(P + a)v = b(P_0 - P)$$

$$P \cdot v + a \cdot v = b(P_0 - P)$$

Полезная
мощность

Тепловая
мощность


$$N_{\text{общ.}} = b(P_0 - P)$$

Уравнение Хилла выражает полную мощность мышечного изотонического сокращения

Выводы:

1. Так как мышцы проявляют и вязкие свойства, то при перемещении одного их слоя относительно другого часть механической энергии переходит в другие виды, главным образом в тепло (В.Б. Коренберг, 1999).

2. Теплообразование можно разделить на несколько компонентов:

Теплота активации — быстрое выделение тепла на ранних этапах мышечного сокращения, когда отсутствуют видимые признаки укорочения или развития напряжения. Теплообразование на этой стадии обусловлено выходом ионов Ca^{2+} из триад и соединением их с тропонином.

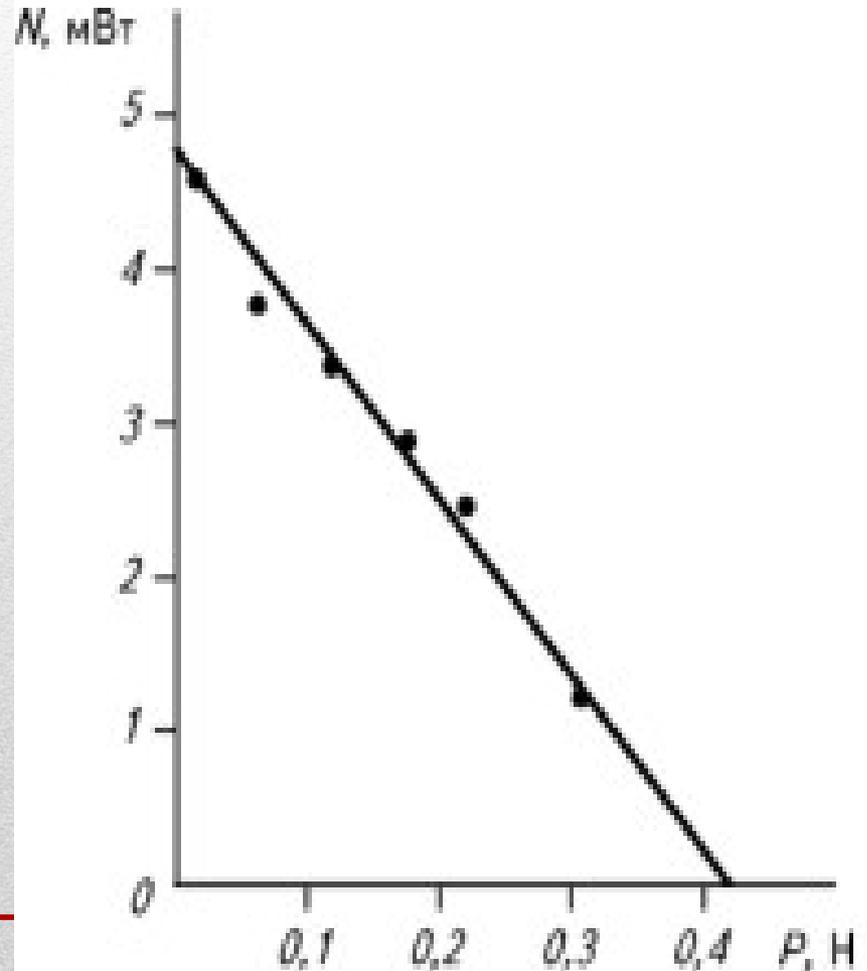
Теплота укорочения — выделение тепла при совершении работы, если речь идет не об изометрическом режиме. При этом, чем больше совершается механической работы, тем больше выделяется тепла.

Теплота расслабления — выделение тепла упругими элементами мышцы при расслаблении. (А. Хилл)

$$N_{\text{общ.}} = (P + a)v = b(P_0 - P)$$

Пример. В икроножной мышце спортсменов спринтеров 60% белых мышц, обеспечивающих мгновенную мощность всей мышцы 120 Вт/кг, у стайеров же в этом органе

белых мышц всего 35% , и, соответственно, мощность целой мышцы 95 Вт/кг, но сохраняется на этом уровне достаточно продолжительное время



Что влияет на силу и скорость сокращения мышц?

сила и скорость сокращения зависят от :

1) силы и интенсивности электрического импульса

- Чем сильнее сигнал, тем больше ионов кальция высвобождается из хранилищ и тем лучше идут химические реакции.
 - Чем выше интенсивность сигнала, тем чаще происходит раскрытие хранилищ с ионами кальция, следовательно, мостики между актином и миозином быстрее продвигаются.
-

2) размера мышцы

чем больше миофибрилов, тем быстрее и сильнее мышца (миф об неуклюжести и медлительности «качков» умирает. Это реальный факт, чем больше мышца, тем больше скорость её сокращения!)

3) Свойства и характеристики связок и сухожилий (толстые эластичные сухожилия способны выдержать резкое сокращение мышцы, т.е. выдержать сокращение большого числа мышечных волокон одновременно и не порваться)

3. Упругие свойства костной ткани

1. Костная ткань один из видов соединительной ткани, состоящей из трех видов клеток и обизвествленного межклеточного матрикса. Клетки составляют $\approx 1-2\%$ от всего объема костной ткани, остальной объем занят порами и каналами (для компактной костной ткани пористость составляет 13-18%, для губчатой она выше) и твердой фазой - органическими и минеральными составляющими костных пластинок.

Органическая составляющая (40-50% твердой фазы) представлена коллагеном. Минеральная составляющая (50-60% твердой фазы) - преимущественно кристаллы гидроксилапатита $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ и других солей кальция.

В пределах пластинки коллаген - минеральные волокна ориентированы в определенном направлении и соединены связующим веществом.

2. Механические свойства кости определяются составом твердой фазы и свойствами ее компонент. В экспериментах можно практически полностью удалить из кости органическую или минеральную составляющую. Форма и размеры образца при этом не меняются, но механические свойства будут разительно отличаться от свойств нормальной кости. Так, кость, лишенная органических веществ, необычайно хрупка, а деминерализованная кость приобретает резиноподобные свойства. Это означает, что костная ткань является прочным конструкционным композитным материалом лишь при определенном сочетании входящих в нее компонентов.

3. Вязкоупругое поведение костной ткани проявляется в зависимости ее механических характеристик от скорости деформации.

Так, например, при сжатии вдоль продольной оси компактного вещества костной ткани человека модуль упругости меняется от 15,1 ГПа при скорости деформации $0,001 \text{ с}^{-1}$ и до 29,6 ГПа при скорости деформации 300 с^{-1} .

Для компактного вещества кости экспериментально фиксируется явление ползучести с последующим восстановлением после разгрузки. Причем при малых уровнях напряжения ($\sigma_1 / \sigma_{1 \text{ разруш.}} \leq 0,3$) деформация после разгрузки полностью исчезает, при более высоких значениях $\sigma_1 / \sigma_{1 \text{ разруш.}}$ имеют место небольшие остаточные деформации.

После достижения некоторого уровня напряжения в плоскости σ , образуется гистерезисная петля.

Отмеченные временные эффекты в кости, видимо, связаны с собственными вязкоупругими свойствами полимерных молекул коллагена, с неупругостью межклеточного матрикса и с наличием вязкой жидкости в костных каналах

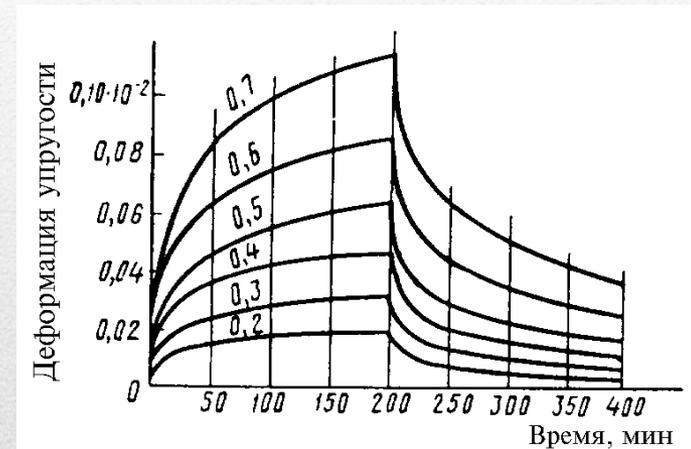


Рис.
Кривые ползучести при относительном напряжении $\sigma_1 / \sigma_{1 \text{ разруш.}}$

Тип кости	Предел прочности при изгибе (МПа)	Е (ГПа)	Содержание минеральных компонентов, %	Плотность ρ , кг/м ³
Бедренная кость коровы	247	13,5	66,7	2060
Стенка среднего уха кита	33	31,3	86,4	2470

4. При различных видах деформации компактное вещество костной ткани, формирующее среднюю часть трубчатых костей, характеризуется нелинейной зависимостью напряжение - деформация и анизотропией упругих и прочностных свойств.

Анизотропия проявляется существенной зависимостью этих свойств от направления нагружения, нелинейность - понижением модуля упругости материала с повышением уровня напряжения, опыты обычно проводятся при статическом нагружении.

Анизотропия разрушающих напряжений больше ориентацией коллаген-минеральных волокон. Макроскопические образцы кости анизотропны из-за упорядоченного расположения остеонов и других структур этого уровня.

5. Значение разрушающих напряжений при сжатии значительно выше, чем при растяжении или кручении. Например, для образцов большеберцовой кости, вырезанных вдоль продольной оси, они составляют в среднем 200 МПа при сжатии вдоль оси, 120 МПа - при растяжении, 90 МПа - при кручении. Эти цифры иллюстрируют ~~известное врачам-ортопедам положение: сжатие - менее опасный вид нагружения, чем растяжение и кручение.~~