

Руководство к лабораторным работам по испытанию металлов

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 66.0
ББК 35
Р85

Р85 Руководство к лабораторным работам по испытанию металлов / – М.: Книга по Требованию,
2024. – 209 с.

ISBN 978-5-458-60507-6

ISBN 978-5-458-60507-6

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг — не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель — вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания — решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

Работа 1.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ПРОПОРЦИОНАЛЬНОСТИ, УПРУГОСТИ И ТЕКУЧЕСТИ.

1. Анализ упругого участка кривой растяжения.

Наиболее распространенным испытанием механических свойств металлов является статическое испытание растяжением. Кривая испытания на растяжение обычно изображается в прямоугольных координатах, в которых по оси ординат отложены действующие во время опыта нагрузки P , а по оси абсцисс, вызванные приложением указанных нагрузок, абсолютные приращения длины образца — Δl . При этом вся кривая растяжения, как известно, состоит из двух совершенно различных участков: первоначального участка, характеризующего сопротивление материала упругим и квазиупругим деформациям, и второго — остаточным (пластическим) деформациям.

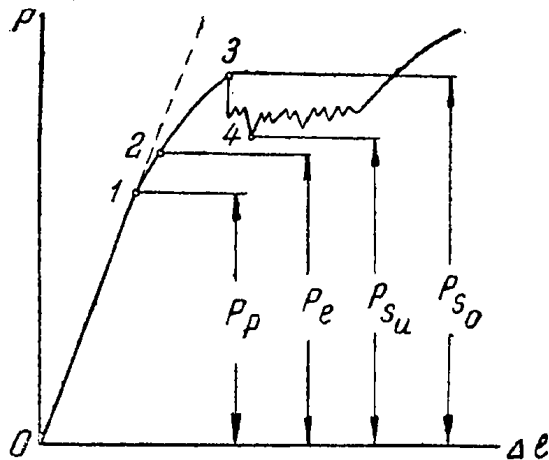


Рис. 1. Начальный участок диаграммы растяжения отожженной малоуглеродистой стали.

Значительный интерес как для металловеда, так и конструктора, представляет собой именно начальный участок диаграммы растяжения. Поэтому в ряде механических испытаний не ограничиваются только общим изучением свойств образца путем его растяжения до разрыва, а проводят еще специальное и детализированное исследование начального — упругого и квазиупругого — участка кривой его растяжения. Предметом настоящей работы и является подробное изучение этой области диаграммы растяжения.

Общий вид начального участка диаграммы растяжения — для мягкой углеродистой стали в отожженном состоянии — изображен на рис. 1.

В начале растяжения образца, до некоторой точки диаграммы 1, зависимость деформации от нагрузки выражается наклонной прямой линией. Далее, начиная с точки 1, кривая постепенно отходит вправо от первоначального прямолинейного направления и плавно поднимается до точки 3, в которой происходит резкое нарушение этого плавного ее характера. Точка 3 на диаграмме отвечает началу так называемого участка текучести. Характерной особенностью этого участка текучести является то, что нарастание на нем деформации протекает при приблизительно одинаковой, колеблющейся около определенного уровня, нагрузке. Участок текучести, именуемый чаще — благодаря указанной его особенности — „площадкой текучести“, представляет собой, вследствие колебаний нагрузки, волнистую линию, общее направление которой параллельно оси абсцисс. Чтобы продолжать растяжение образца за пределом текучести, требуется в каждый следующий момент опыта увеличивать приложенную нагрузку или, другими словами, преодолевать начавшееся упрочнение металла.

Начальная линейная зависимость силы от деформации является выражением известного закона Гука или, иначе, закона пропорциональности. Поэтому точка 1, отвечающая, как уже было выяснено, усилию, до которого сохраняется справедливым закон пропорциональности, имеет важное значение для определения предела пропорциональности.

Пределом пропорциональности в соответствии с этим называют наименьшее напряжение, начиная с которого замечается нарушение линейного закона Гука. Усилие P_p , служащее основанием для вычисления предела пропорциональности, определяют по ординате точки 1. Формула для вычисления предела пропорциональности σ_p пишется следующим образом:

$$\sigma_p = \frac{P_p}{F_0}, \quad (1)$$

где F_0 — исходная (т. е. до нагружения) площадь поперечного сечения образца.

Следующая на кривой точка, отмеченная цифрой 2, отвечает той предельной нагрузке, до которой деформации образца сохраняют чисто упругий характер. Нагружение образца до любой нагрузки, лежащей по кривой ниже точки 2, не должно вызывать появления остаточных деформаций. Наоборот, доведение металла до состояний, отвечающих на кривой ординатам выше точки 2, должно сопровождаться получением остаточных удлинений. Для проверки отсутствия пластической деформации в любом состоянии образца, его нужно разгрузить и убедиться в полном исчезновении приобретенных при нагружении удлинений. Предельная нагрузка P_e , отвечающая состоянию металла в точке 2, определяет собой величину предела упругости σ_e .

Таким образом пределом упругости называют то наименьшее напряжение, начиная с которого в металле после его разгрузки (снятия нагрузки) уже наблю-

дается некоторая остаточная деформация. Предел упругости определяется по формуле:

$$\sigma_e = \frac{P_e}{F_0}. \quad (2)$$

Точкой 3 на кривой отмечено начало площадки текучести. Усилие, отвечающее этой точке, т. е. состоянию металла в момент непосредственно предшествующий текучести, в большинстве случаев бывает больше, чем на самом участке текучести. Поэтому в практику испытания металлов вошли два термина для предела текучести: верхнего предела текучести σ_{s_0} и нижнего — σ_{s_u} .

Верхним пределом текучести называют наибольшее на площадке текучести напряжение, соответствующее обычно началу площадки, а нижним пределом текучести — наименьшее напряжение, которое вообще говоря не связано с определенным местом участка текучести и может проявиться где угодно на его длине (хотя чаще всего у самого начала).

Соответственно сказанному, на кривой помимо точки 3 отмечена еще точка 4. По ординате первой из них (P_{s_0}) вычисляют верхний предел текучести, ордината же второй (P_{s_u}) служит для установления величины нижнего предела текучести. (Большинство укоренившихся у нас обозначений и индексов при характерных напряжениях заимствованы из немецкой литературы, поэтому s_0 и s_u здесь обозначают: s_0 — obere Streckgrenze и s_u — untere Streckgrenze.) Формулы для обозначения обоих пределов текучести пишутся так:

$$\sigma_{s_0} = \frac{P_{s_0}}{F_0}$$

и

$$\sigma_{s_u} = \frac{P_{s_u}}{F_0}. \quad (3)$$

Чаще всего при испытаниях ограничиваются измерением одной лишь первой величины.

Пластическая деформация в поликристаллических материалах, каковыми являются почти все технические металлы и сплавы, возникает не сразу, а зарождается и развивается постепенно. В самом деле, при одном и том же среднем нормальном напряжении по сечению образца, в отдельных кристалликах, вследствие их различной ориентировки по отношению к приложенному усилию, по их плоскостям скольжения действуют неодинаковые скальвающие напряжения. При увеличении нагружения последнее обстоятельство приводит к тому, что первые сдвиги происходят в отдельных зернах не одновременно. Кроме того, также благодаря неоднородности кристаллических зерен и свойственным всякому поликристаллу механическим неоднородностям, все зерна оказываются не в одинаково напряженном состоянии, а часть из них перенапряжена за счет ближайших соседей. Все это также благоприятствует неодновременности перехода за кристаллографический предел упругости отдельных зерен. Поэтому под нагрузкой первые оди-

ночные сдвиги возникают часто уже при очень низких значениях напряжений, но заметить эти деформации, благодаря их микроскопическому размеру, в обычных условиях опыта не всегда оказывается возможным. Чтобы сделать эти остаточные микродеформации доступными для наблюдения, нагружение металла необходимо продолжать до тех пор, пока количество остаточных деформированных зерен не станет достаточно велико, и только тогда, в результате суммарного действия микроскопических сдвигов, локализованных в отдельных кристаллах, они могут заметно отразиться на внешних размерах и форме образца после его разгрузки.

Отсюда следует, что чем точнее приборы для измерения остаточных деформаций, тем раньше становится возможным регистрировать выход металла за предел упругости и тем ниже будет значение последнего. Это с такой же очевидностью справедливо и для предела пропорциональности, так как положение на кривой точки I должно также в сильной степени зависеть от точности измерения начала появления непропорциональной деформации.

Упругий участок кривой растяжения фактически кончается уже при напряжении, отмеченном на кривой точкой 2, отвечающем пределу упругости. Первые же сдвиги, определяющие собой положение точки 2, все же захватывают тогда только наименее благоприятно ориентированные зерна. И хотя они распределены по ним в значительном числе, однако носят только местный характер. Поэтому в рабочем объеме образца, наряду с зернами, получившими остаточную деформацию, может существовать большое число зерен, которые деформированы чисто упруго.

Следовательно факт перехода материала за предел упругости, строго говоря, далеко еще недостаточен, чтобы характеризовать возникновение процесса пластической деформации сразу во всем объеме образца. Момент достижения предела упругости следует, соответственно этому, расценивать только как начало видимого развития пока еще местной пластической деформации. Предел упругости при этом, представляя собой для поликристаллического металла величину статистического порядка (при условии сохранения одинаковыми точности измерения деформации и условий опыта), должен быть для данного металла вполне устойчивой характеристикой.

Дальнейшее развитие сдвигов в зернах за пределом упругости возможно только при повышении нагрузки (среднего напряжения). Это вполне понятно, так как для продолжения деформации нужно непрерывно преодолевать сопротивление сдвигу все более и более прочных (менее благоприятно ориентированных) и не оказавшихся еще охваченными пластической деформацией зерен. Так будет продолжаться до тех пор пока, в результате постепенного возрастания нагрузки, не окажется превзойденным скалывающее напряжение, величины которого достаточно, чтобы произвести одновременно сдвиг не в отдельных кристалликах, а уже в целом макроскопическом слое, захватывающем сразу очень большое число зерен металла. При этом, благодаря тому, что наибольшие скалывающие напряжения лежат в плоскости, наклоненной к оси образца под углом в 45° , следы этого макроскопического сдвига высту-

пают на поверхности образца примерно под тем же углом. Прохождение первого такого сдвига в каком-либо слое сопровождается в нем упрочнением, поэтому вслед за первым сдвигом пластическая деформация должна переброситься на другой участок образца, и сдвиг пробегает во втором, часто соседнем, слое, затем в третьем и т. д. Эти следы макроскопической деформации носят название линий Людерса и появляются впервые при напряжении, отвечающем на кривой точке Z , т. е. началу площадки текучести. Дальнейшее развитие линий Людерса длится на протяжении всей площадки текучести, т. е. до тех пор, пока весь объем образца не окажется охваченным пластической деформацией или, иначе, не будет пересечен сдвигами. К концу этого процесса отдельные линии Людерса выступают на поверхности образца уже столь часто, что их трудно друг от друга отличить. Поверхность же образца, которую для лучшего наблюдения линий Людерса обычно полируют, становится из блестящей — матовой.

Итак, при любом состоянии образца в интервале напряжений от предела упругости и до конца площадки текучести существуют еще, сперва значительные объемы, затем отдельные, постепенно уменьшающиеся области, не получившие сколько-нибудь значительной (охватившей все зерна) пластической деформации. И только к концу площадки текучести пластическая деформация охватывает весь рабочий объем образца и процесс ее развития можно считать завершенным.

Руководствуясь сказанным, не трудно понять, почему изучение начального участка кривой растяжения не ограничивают исследованием одного лишь первого отрезка кривой, оканчивающегося пределом упругости, а распространяют его вплоть до момента полного завершения площадки текучести. Мы видим отсюда также, что если до предела упругости деформация (по крайней мере в пределах точности опыта) действительно может считаться чисто упругой, то при любых напряжениях между σ_p и окончанием площадки текучести мы должны признать ее квази-упругой, так как в разных областях объема образца, наряду с пластической, можно наблюдать также и упругую деформацию.

В соответствии с вышеизложенным можно утверждать, что единственным признаком для установления предела пропорциональности σ_p служит нарушение линейного закона Гука, в то время как (также единственным) признаком достижения предела упругости σ_e может являться только остаточная деформация. Поэтому эти два напряжения — σ_p и σ_e , уже хотя бы из методологических соображений, являются вполне самостоятельными характеристиками. Однако, несмотря на столь очевидное методологическое различие обеих величин, на практике их обычно не различают и один термин заменяют другим. Такая, весьма распространенная, точка зрения о возможности отождествления σ_p и σ_e хотя и имеет, благодаря незначительной практической разнице в величине обоих пределов, некоторое основание, все же не может не быть признана вредной. Недопустимость такого смешения становится еще более очевидной, если разобраться в физическом и практическом смысле обеих величин.

Предел пропорциональности σ_p , являясь мерой предельного напряжения, до которого целесообразно применять линейный закон Гука, имеет безусловно большое практическое значение и, наоборот, абсолютно лишен физического смысла. Совсем другую оценку должен с этой точки зрения получить предел упругости. В самом деле, переход металла за σ_e влечет за собой, как известно, некоторые физические изменения (такими изменениями являются прежде всего остаточные деформации). Значение предела упругости заключается однако не только в том, что металл за σ_e претерпевает остаточные изменения формы, а главным образом в том, что вследствие возникновения остаточной деформации, в нем происходят необратимые изменения его основных физических свойств (как-то: изменение электропроводности, магнитных свойств, микроструктуры и т. п.). Физическое значение и практический смысл предела упругости таким образом очевидны и без специальных пояснений.

Несмотря однако на столь бесспорную важность определения предела упругости σ_e , как физико-механической характеристики металла, измерение предела пропорциональности σ_p в практике все же применяется чаще. Основной причиной этому послужила большая сложность выполнения опыта определения предела упругости. В то время как для измерения σ_p достаточно только следить за изменением длины образца при последовательно возрастающей нагрузке, для установления σ_e требуется, в целях регистрации появления первых признаков остаточной деформации, после каждого нового приращения нагрузки, производить разгрузку образца и проверять сохранил ли образец свою первоначальную длину или уже удлинился. Поэтому, учитывая, что для большинства технических металлов и сплавов оба предела близки по величине, в лабораторной практике сочли возможным для многих рядовых испытаний заменять измерение предела упругости менее сложным определением предела пропорциональности. Такое упрощение испытаний, вполне справедливое для указанных целей, к сожалению и привело к указанному выше и совершенно лишенному каких-либо законных оснований перетасовыванию терминов σ_p и σ_e , а следовательно и к смешению скрытых за ними понятий.

2. Теория допусков для определения предела пропорциональности.

В предыдущем было уже выяснено, что для измерения предела пропорциональности требуется установить то напряжение, начиная с которого происходит нарушение линейного соотношения между силой и деформацией или, что то же, напряжением и деформацией. При этом совершенно ясно, что величина этого напряжения должна в сильной степени зависеть от той точности, с которой проводится весь опыт. Поэтому, чтобы избежать при определениях предела пропорциональности случайных влияний индивидуальных особенностей опыта и различий в точности измерений и исключить фактор субъективности, предел пропорциональности считают превзойденным только тогда, когда признак нарушения закона Гука достигает определенного, заранее

заданного значения. Величина этого предварительно установленного признака достижения σ_p , т. е. допуска для определения σ_p , должна быть очевидно задана в соответствии с той точностью, с которой производился весь опыт. Другими словами, чем точнее обставлен опыт, тем меньшим должен быть задан допуск для определения σ_p и, наоборот, чем ниже точность опыта, тем позднее становится возможным наблюдать нарушение закона Гука и следовательно тем грубее надо выбирать допуск.

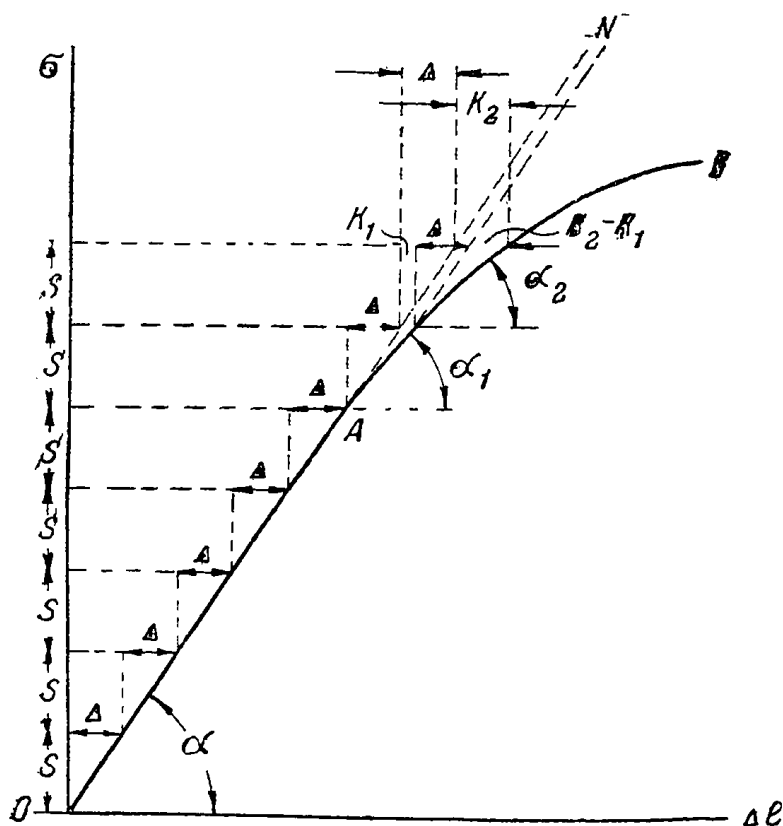


Рис. 2. Графическое пояснение к теории допусков.

Что же однако представляет собой этот допуск для определения σ_p ?

Чтобы ответить на этот вопрос, произведем несколько более подробный, чем это нами было сделано до сих пор, анализ начального участка кривой растяжения. Не останавливаясь пока на методике определения функциональной зависимости напряжений от деформации, допустим, что связь этих двух величин нами уже получена для некоторого образца и графически представлена на рис. 2 кривой OB , изображенной в координатах $(\sigma, \Delta l)$. Допустим также, что нагружение образца с самого начала опыта и до его конца, т. е. до напряжения, отвечающего на кривой точке B , велось одинаковыми ступенями по $s \text{ кг/мм}^2$ каждая. Тогда до некоторой точки A на кривой OB , одинаковым приращениям напря-

жения s отвечают одинаковые же приращения абсолютного удлинения Δ , и кривая сохраняет прямолинейный характер. Обозначая далее через σ прилагаемое к образцу напряжение, через l — длину образца, через Δl — его абсолютное удлинение и через α — угол между направлением прямой OA и осью абсцисс, из рис. 2, согласно закону пропорциональности, находим:

$$E = \frac{\sigma}{\Delta l} \cdot l = \frac{S}{\Delta} \cdot l = l \cdot \operatorname{tg} \alpha.$$

Проследим теперь нашу кривую за точкой A . Следующая после точки A ступень повышения напряжения, как видим, приводит к явному отклонению кривой от прямолинейного, определяемого законом Гука, направления ON . Приращение деформации на этой ступени оказывается больше, чем первоначальные приращения длины Δ на всех предыдущих ступенях. Если до этого приращение длины образца измерялось на каждой ступени отрезком Δ , то в этом случае оно уже равно $\Delta + k$. Величина k представляет здесь разницу между действительным приращением длины образца на данной ступени нагружения и пропорциональным приращением его длины Δ на всех ступенях ниже точки A . Дальнейшее повышение напряжения еще на одну ступень s приводит к еще большему возрастанию и отрезка k . Таким образом не трудно видеть, что k , являясь непропорциональной частью прироста деформации, как-раз и выражает собой абсолютное отклонение кривой от закона пропорциональности при данной ступени нагружения s .

Если отрезки кривой, на каждой следующей за точкой A ступени, принять за прямые или, если в конце каждого отрезка провести к кривой касательные, то углы между их направлениями и осью абсцисс будут каждый в отдельности меньше предыдущего и все — меньше первоначального угла наклона α линейного участка кривой OA . Отсюда следует, что помимо первого признака нарушения закона пропорциональности, выражаемого величиной k , существует еще второй признак, а именно — уменьшение угла наклона касательной к кривой. При этом, как не трудно доказать, оба эти признака связаны друг с другом определенной зависимостью.

Пусть при последовательном ступенеобразном нагружении мы дошли по кривой OB до значения непропорционального прироста деформации, равного некоторой величине k_n . Соответственно этому пусть и угол между касательной к кривой и осью Δl изменился от α до α_n . Допустим при этом, что достижение угла α_n и значения k_n считается в указанном опыте необходимым и вместе с тем вполне достаточным признаком нарушения закона пропорциональности. Если так, то очевидно, что α_n и k_n и могут быть приняты здесь в качестве допусков для определения σ_p . Но в общем случае естественно нельзя задавать допуск абсолютными величинами α_n и k_n , а следует переходить к относительному их измерению. Так например, если наблюдение ведется за изменением угла α , то допуск для определения σ_p должен быть задан величиной относи-

тельного изменения тангенса угла α . Обозначая этот допуск буквой n , напишем его выражение:

$$n = \frac{\operatorname{tg} \alpha - \operatorname{tg} \alpha_n}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (4)$$

Точно также, если момент нарушения закона Гука устанавливается по появлению непропорционального прироста деформации k , то допуск для определения σ_p должен быть выражен в форме отношения $\frac{k}{\Delta}$.

Докажем теперь, что оба допуска, т. е. n и $\frac{k}{\Delta}$, могут быть выражены один через другой. Так как $\operatorname{tg} \alpha = \frac{s}{\Delta}$ и $\operatorname{tg} \alpha_n = \frac{s}{\Delta + k}$, то выражение для допуска n переписывается следующим образом:

$$n = \frac{\frac{s}{\Delta} - \frac{s}{\Delta + k}}{\frac{s}{\Delta}}.$$

Отсюда окончательно имеем:

$$n = 1 - \frac{\Delta}{\Delta + k} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{k}{\Delta}} \quad (5)$$

или

$$\frac{k}{\Delta} = \frac{n}{1 - n}. \quad (6)$$

Резюмируя сказанное, отметим, что предел пропорциональности можно определять либо как напряжение, при котором относительное уменьшение тангенса угла между касательной к кривой и осью деформаций впервые достигло заданного значения n , либо, что удобнее, как такое напряжение, при котором относительное отклонение деформации от закона пропорциональности, выражаемое величиной $\frac{k}{\Delta}$, достигло величины отношения $\frac{n}{1 - n}$.

Весь процесс измерения предела пропорциональности σ_p таким образом сводится теперь к следующему: образец снабжают прибором для измерения его деформаций под нагрузкой, нагружают его равными ступенями по $s \text{ кг/мм}^2$ в каждой, после всякого нового увеличения нагрузки на одну ступень измеряют деформацию образца и устанавливают для каждой ступени сперва пропорциональное приращение длины образца Δ , затем, после точки A , непропорциональный прирост удлинения k и, наконец, за σ_p принимают то напряжение, при котором значение $\Delta + k$ впервые удовлетворило заданному допуском отношению $\frac{k}{\Delta}$.

В табл. 1 дается сводка значений $\frac{k}{\Delta}$ и n для различных, наиболее употребляемых, допусков. Первые два — Джонсона и Мура — принадлежат американским авторам и довольно широко применяются в наших лабораториях. Последний допуск предложен Комитетом эталонов и стандартов для точных исследовательских работ и применяется сравнительно редко.

Таблица 1.

Допуски для определения предела пропорциональности.

Название допуска	Относительное уменьшение тангенса угла наклона касательной n		Относительное отклонение деформации от закона пропорциональности $\frac{k}{\Delta}$		Обозначение предела пропорциональности
	абс. ед.	%	абс. ед.	%	
По Джонсону . . .	1/3	33	1/2	50	$\sigma_{Дж}$
По Муру	1/5	20	1/4	25	$\sigma_{М}$
По КЭС	1/11	9	1/10	10	$\sigma_{К}$

Введение в лабораторную практику такого рода допусков устраняет произвол в выборе критерия для установления предела пропорциональности и облегчает сопоставление результатов, полученных для одного и того же материала, в разных лабораториях.

3. Основы методики определения пределов упругости и текучести.

Выше было уже указано, что определение предела упругости σ_e сводится к установлению того наименьшего напряжения, при котором впервые появляются видимые признаки остаточной деформации. Чтобы убедиться (при заданном напряжении) в отсутствии пластической деформации или, наоборот, в ее существовании, легче всего поступить следующим образом: разгрузить образец и проверить вернулся ли он к своим исходным размерам или нет. Основной методологической особенностью определения σ_e , как раз и является необходимость разгружать образец после каждой новой степени нагружения. В остальном же весь процесс испытания ничем не отличается от описанного выше опыта по определению предела пропорциональности σ_p . Образец также снабжается экстенсометром для измерения деформаций и также ступенчато нагружается. При этом, если на данной степени нагружения предел упругости еще не был достигнут, показания экстенсометра после разгрузки образца должны совпадать с исходными. Признаком перехода материала за σ_e здесь следовательно принимается невозвращение показаний прибора, измеряющего деформацию образца, к первоначальному значению их до приложения нагрузки.

Для определения предела упругости, так же как и для определения предела пропорциональности, существует ряд допусков, назначение которых уже ясно из предыдущего. Допуском для определения предела упругости σ_e называется та наимень-