

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 539.4

Определение характеристик упругости конструкционных металлов в области микро- и макроупругих деформаций

В. А. Стрижало, А. Ф. Войтенко, Е. А. Войтенко

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Описаны прецизионные методы и устройства для исследования модулей продольной упругости и коэффициента поперечной деформации конструкционных металлов в области микродеформаций ($\sim 10^{-7}$) и деформаций, соответствующих реальным рабочим напряжениям. Получаемая точность экспериментальных результатов достаточна для решения как научных (возможность определения “переходов второго порядка” в этих металлах), так и практических задач.

Ключевые слова: модуль продольной упругости, коэффициент поперечной деформации, динамическое и статическое нагружение, микро- и макродеформации, “переходы первого и второго порядка” при статическом нагружении.

Актуальность изучения законов упругого деформирования материалов отмечалась еще Я. Б. Фридманом [1]. Важность корректного определения характеристик упругости материалов для науки и техники обобщена в работах [1–4].

Для конструкционных металлов особую важность приобретает исследование их упругих свойств в области так называемых инфинитезимальных деформаций, или деформаций в диапазоне напряжений, используемых в технике.

Постановка задачи. Известно (напр., [5]), что для большинства металлов и сплавов значения пределов пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$, пределов упругости σ_y и пределов текучести σ_T с некоторым приближением можно принимать равными, и при $\sigma \leq \sigma_{\text{пц}}$ способ определения деформаций, основанный на использовании закона Гука, является оправданным. Рассмотрим, какого уровня достигает погрешность в определении деформации в этом случае.

Согласно стандарту [6], предел пропорциональности определяется как напряжение, при котором отступление от линейной зависимости между нагрузкой P и удлинением образца Δl достигает такой величины, что тангенс угла наклона, образованного касательной к кривой нагрузка–удлинение в точке $P_{\text{пц}}$ по отношению к оси нагрузок P , увеличивается на 50% своего значения на упругом (линейном) участке. Даже если принять, что на диаграмме существует определенной длины линейный участок, то и тогда

следует, что секущий модуль продольной упругости E_c , определенный в точке диаграммы $P_{\text{шц}}$, будет примерно на 20% ниже, чем модуль продольной упругости E_0 , полученный для линейной области диаграммы (аналогичные данные приведены в [7]). Следовательно, при расчете деформации по закону Гука при напряжениях, близких к $\sigma_{\text{шц}}$, ошибка составит более 20%, что недопустимо при расчетах элементов конструкций.

Необходимо также учитывать, что, как показано в работе [2], для многих кристаллических материалов в зависимости от предыстории их термомеханической обработки устойчивым является одно из нескольких числовых значений модуля упругости при напряжениях, близких к нулю. Значит, существует определенная множественность значений одного и того же модуля упругости E_0 – “мультимодульность”. В [2] переход от одного дискретного значения модуля к другому назван как “переход первого порядка”. Отсюда возможна реализация множества кривых деформирования $\sigma - \varepsilon$ вблизи $\sigma = 0$. Кроме того, отмечается [2], что по мере роста напряжений и соответственно деформаций при некотором уровне последних происходит скачкообразный переход от одного значения касательного модуля $E_k = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$ к другому, что получило название “переход второго порядка”.

Следовательно, существует разрыв в значениях первой производной $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ при некоторых уровнях ненулевых деформаций, т.е. кривая деформирования не гладкая, а состоит из ряда прямолинейных участков. Поэтому необходимо учитывать характер процесса деформирования в рабочей области напряжений как для анализа, так и для расчета элементов конструкций на их деформативность.

Уместно отметить, что еще в 1849 г. Британская Королевская комиссия рекомендовала инженерам линейный закон упругости Гука для железа при растяжении, сжатии и изгибе заменить параболической зависимостью [2]:

$$\sigma = A\varepsilon - B\varepsilon^2, \quad (1)$$

где σ – напряжение; ε – деформация; A, B – постоянные.

Как известно (напр., [2–4, 8]), линейная связь между напряжениями и деформациями может быть условно принята для довольно ограниченного ряда конструкционных металлов, имеющих площадку или зуб текучести (малоуглеродистые стали, ряд конструкционных сплавов на основе тугоплавких металлов и алюминия и некоторые металлы, например, в хрупком состоянии). Современным же сильно упрочняющимся металлам присуща ярко выраженная нелинейность даже в области рабочих деформаций. Чугуны, высоколегированные и литые стали, медь и некоторые сплавы на ее основе, большинство пористых и других металлов, полученных методами порошковой металлургии, вообще не имеют прямой пропорциональности между напряжениями и деформациями с самого начала деформирования, и их диаграмма $\sigma - \varepsilon$ описывается соотношением вида (1).

Представляет также несомненный интерес исследование поведения в макроупругой области деформации коэффициента поперечной деформации,

который определяет способность материала сохранять свой первоначальный объем в процессе деформирования, поскольку по этому вопросу в литературных источниках имеются противоречивые сведения. Например, в работах [9, 10] утверждается, что при одноосном растяжении коэффициент поперечной деформации в упругой области (коэффициент Пуассона) не зависит от уровня напряжений, а в [11, 12] – наоборот, что он изменяется с ростом напряжений или деформаций. Также требует уточнения зависимость коэффициента поперечной деформации от напряжений в макроупругой области при нелинейной зависимости $\sigma = \sigma(\varepsilon)$, так как эти данные входят во все расчеты деформативности деталей при сложном напряженно-деформированном состоянии.

Методы исследования. Ниже кратко описаны методы и устройства для определения модуля продольной упругости E и коэффициента поперечных деформаций μ металлических конструкционных материалов в указанной области напряжений и деформаций при динамическом (микроупругие деформации) и статическом (макроупругие деформации) нагружении. Диапазон деформаций устанавливается с точки зрения их использования в технике в следующих пределах: $\varepsilon_{\min} = 10^{-7}$ и $\varepsilon_{\max} = [\sigma]/E$, где $[\sigma]$ – допускаемые напряжения, величина которых выбирается в зависимости от специфических требований к проектируемому изделию, условий его изготовления и эксплуатации, что регламентируется соответствующими стандартами и руководящими материалами.

При разработке нагружающего устройства и измерителей деформации для испытаний металлов в области макроупругих деформаций необходимо прежде всего рассчитать максимальные нагрузку и деформацию испытываемых образцов.

На основании данных работ [13–15] можно показать, что, например, для углеродистых, низколегированных, хромистых, жаропрочных и коррозионно-стойких аустенитных сталей максимальное допускаемое напряжение $[\sigma]$ составляет 240 МПа. При этом напряжении и $E \approx 200$ ГПа максимальные продольная ε_{\max} и поперечная ε'_{\max} деформации в случае линейной зависимости $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ будут равны соответственно 0,12 и 0,036% (при $\mu \approx 0,3$).

Для определения с высокой точностью характеристик упругости конструкционных материалов в области микроупругой деформации целесообразно использовать предложенный ранее [16] и доработанный с учетом поставленной здесь задачи (увеличение деформаций от 10^{-7} до 10^{-6} и несколько выше) резонансный метод. Данный метод позволяет при расчете модуля продольной упругости применять определяющие соотношения высокой точности и по результатам одного эксперимента находить коэффициент Пуассона μ_y .

Экспериментальные исследования в области макроупругой деформации следует проводить на прецизионных установках для испытаний образцов на растяжение. Краткое описание одной из таких установок представлено ниже. При этом учитывалось, что для обеспечения необходимой точности измерений столь малых продольных и поперечных деформаций целесообразно использовать образцы с длиной рабочей части 100 мм и диаметром 10 мм.

Учитывая, что продольное растяжение образца не будет превышать 0,2 мм, для статического нагружения удобно использовать рычажно-гравитационную систему с упругогравитационным замыканием силового контура и неравноплечим грузовым рычагом второго рода с соотношением плеч примерно 1:50. Такая система нагружения с реализацией метода задаваемой нагрузки калиброванными грузами позволяет повысить точность определения нагрузки на образец по сравнению с используемыми тензорезисторными и другими силоизмерителями. Для устранения перекосов образца при его нагружении указанное устройство содержало нормированные американским стандартом захваты [17].

Поскольку уровень рабочих деформаций и напряжений незначителен, с целью повышения точности измерений продольных и поперечных деформаций на рабочую часть образца наносили две кольцевые выточки глубиной 0,01 мм на расстоянии 100 мм одна от другой и четыре равноудаленные продольные риски такой же глубины (их длину и положение выбирали таким образом, чтобы можно было надежно закрепить два тензорезисторных преобразователя деформации для измерения поперечных деформаций в направлениях под углом 90°). Выточки на образце выполняются для исключения проскальзывания ножей преобразователей в процессе его растяжения, что существенно повышает точность измерения удлинения в указанных пределах деформирования. При этом с целью учета возможного перекоса образца в захватах устанавливаются два преобразователя продольной деформации под углом 180° друг к другу. При измерении поперечных деформаций, как указано выше, также необходимо установить не менее двух преобразователей, поскольку при появлении пластических деформаций круглое поперечное сечение образца превращается в эллиптическое сечение, оси которого могут вращаться относительно продольной оси образца в процессе увеличения нагрузки [10].

Предварительная нагрузка на образец принимается равной нагрузке одной ступени, которой соответствует напряжение в образце 10 МПа. В данном случае при выбранных размерах образца такая нагрузка создается грузом массой порядка 20 Н, который был отгарирован с абсолютной погрешностью $dP = (1...2) \cdot 10^{-3}$ Н. Относительная погрешность оценки нагрузки равна $dP/P = (2 \cdot 10^{-3})/20 = 1 \cdot 10^{-4}$, т.е. 0,01%.

Для выбора преобразователей деформации и оценки погрешности измерения продольных ε и поперечных ε' деформаций стального образца необходимо располагать их максимальными значениями (ε_{\max} и ε'_{\max}) и значениями, соответствующими деформации при нагружении образца, например, на одну ступень, 10 МПа (ε_1 и ε'_1).

Как показано выше, деформация $\varepsilon_{\max} = 1,2 \cdot 10^{-3}$ (0,12%), $\varepsilon'_{\max} = 0,36 \cdot 10^{-3}$ (0,036%). Отсюда максимальное удлинение образца $\Delta l_{\max} = 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 100 = 120 \cdot 10^{-3}$ мм и максимальное уменьшение диаметра образца $\Delta d_{\max} = 0,36 \cdot 10^{-3} \cdot 10 = 3,6 \cdot 10^{-3}$ мм. Деформации на одну ступень нагружения $\varepsilon_1 = 10/2 \cdot 10^5 = 5 \cdot 10^{-5}$ и $\varepsilon'_1 = 5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,3 = 1,5 \cdot 10^{-5}$, а $\Delta l_1 = 5 \cdot 10^{-5} \cdot 100 = 5 \cdot 10^{-3}$ мм и $\Delta d_1 = 1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 10 = 0,15 \cdot 10^{-3}$ мм.

Анализ расчетов показал, что чувствительность преобразователя поперечных деформаций должна более чем в 30 раз превышать чувствительность преобразователя продольных деформаций. Это свидетельствует о сложности измерения коэффициента поперечных деформаций при статическом нагружении и об указанной выше противоречивости данных по этому вопросу.

Рассмотренные расчеты являются основой для выбора методики и средств измерения продольных и поперечных деформаций образца при его растяжении в указанном диапазоне деформаций.

Учитывая нормативные требования стандартов [18, 19] и рекомендации специальной литературы [20, 21], для измерения продольных и поперечных деформаций используются тензорезисторные преобразователи деформаций с фольговыми датчиками, которые обладают оптимальным сочетанием таких характеристик, как низкая погрешность измерения (не превышает $5 \cdot 10^{-6}$ в диапазоне деформаций до $3 \cdot 10^{-2}$), линейность отклика датчика в пределах практически всего диапазона измерений, экономичность датчика и связанных с ним устройств.

При создании измерителя продольной деформации образцов был проведен расчет необходимой точности показаний преобразователя для материалов с различной нелинейностью диаграммы $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ в указанном интервале деформаций. Принимали, что эта диаграмма описывается квадратной параболой и соответственно зависимостью (1). В результате получено, что при испытаниях материалов типа стали 12X18H10T, для которой коэффициент B в уравнении (1) равен примерно $4 \cdot 10^7$ МПа, погрешность в определении деформации при общей деформации образца около $1,5 \cdot 10^{-3}$ не должна превышать 10^{-3} , т.е. 0,1%, чугунов при $B \approx 1 \cdot 10^8$ МПа – $2 \cdot 10^{-3}$ (0,2%), пористых материалов, например железа, полученного методом порошковой металлургии, при $B \approx 2 \cdot 10^8$ МПа – $4 \cdot 10^{-3}$ (0,4%).

Отметим, что для получения корректного значения статического модуля продольной упругости металла при указанных выше коэффициентах B и деформациях, на порядок меньших расчетных, точность определения последних должна быть на два порядка выше, т.е. $1 \cdot 10^{-5}$, $2 \cdot 10^{-5}$ и $4 \cdot 10^{-5}$ соответственно для сталей, чугунов и пористого железа. Поскольку достижение такой точности в настоящее время весьма проблематично из-за отсутствия надежных методов тарировки соответствующих измерителей деформаций, к известным данным о статическом модуле упругости для металлов с нелинейной зависимостью $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ следует относиться критически.

Для получения заданной точности определения продольной деформации образцов тензорезисторные преобразователи деформаций были сконструированы и изготовлены таким образом, чтобы обеспечить равномерную максимальную деформацию тензорезисторов и температурную компенсацию всей системы.

В результате соответствующих расчетов и тарировки измерителей деформаций установлено, что для материалов, коэффициент нелинейности которых B близок к $(1...5) \cdot 10^7$ МПа, измеритель продольных деформаций

соответствует обоснованной выше точности измерений (примерно 0,1%), начиная с пятой ступени нагружения, т.е. с 50 МПа. При большей величине коэффициента B необходимая точность измерения деформаций будет обеспечена при еще меньших напряжениях.

Согласно проведенным расчетам, погрешность в определении статического модуля упругости материалов, коэффициент B которых меньше $1 \cdot 10^7$ МПа, составляет 1...1,5%, коэффициента поперечной деформации – 15...3% (погрешность уменьшается за счет роста деформаций).

Проведение испытаний. Объектом исследований служило армко-железо, химсостав которого аналогичен металлу, испытанному в работе [2], где наблюдались переходы как первого, так и второго порядка (по терминологии, используемой в [2]) после полного отжига металла. Коэффициент нелинейности B неотожженного пруткового армко-железа на порядок меньше, чем стали 12Х18Н10Т, что позволяет оценить корректность разработанных методик и устройств.

Из прутка железа диаметром 50 мм вырезали образцы длиной 120 мм и диаметром 8 мм для проведения динамических испытаний в интервале микродеформаций 10^{-7} ... 10^{-6} и длиной рабочей части 100 мм и диаметром 10 мм для статических испытаний. Часть заготовок образцов отжигали в течение 1 ч при температуре 920 К.

Для проведения испытаний в области микроупругих деформаций описанная ранее [16] установка была доработана с целью обеспечения регулировки в процессе испытаний деформаций образца от 10^{-7} до 10^{-6} и более. Электрод возбуждителя колебаний изготавливали подвижным, что позволяло регулировать коэффициент связи между возбуждателем колебаний и образцом. Увеличение указанного коэффициента и подводимого к преобразователю напряжения от генератора обеспечивало повышение деформаций в образце на порядок и более.

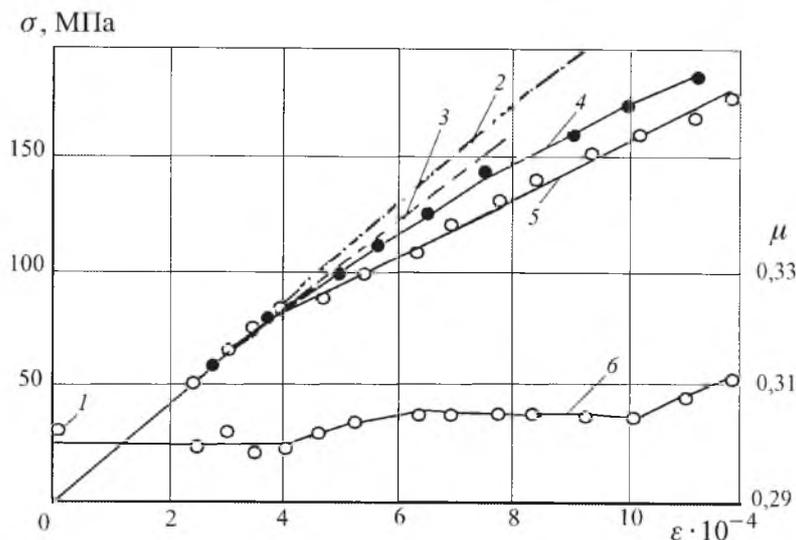
При испытаниях в области макроупругих деформаций вначале тарировали измерители продольных деформаций на штатном для машины “Инстрон” тарировочном устройстве с абсолютной погрешностью 0,38 мкм и измерители поперечной деформации – с использованием мер длины [22] с абсолютной погрешностью менее 0,1 мкм. Тарировали измерители деформаций дважды (до и после испытаний партии образцов) и рассчитывали среднеарифметические значения, которые использовали при обработке экспериментальных данных.

Тарировку тензометров и испытания образцов проводили с учетом требований стандарта [23] к стабильности температуры окружающей среды.

Нагружение образца осуществляли грузами вручную (с помощью рычага с эксцентриком). При этом полагали, что разница в скорости нагружения образца в заданных пределах деформаций и напряжений не окажет существенного влияния на результаты эксперимента.

При нагружении образца каждым грузом его деформацию измеряли после выдержки в нагруженном состоянии в течение 15–20 с, а затем регистрировали показания тензометров и нагружали следующим грузом.

Результаты испытаний и их обсуждение. Некоторые данные испытаний армо-железа в неотожженном (исходном) и отожженном состоянии представлены на рисунке.



Экспериментальные (точки) и расчетные (линии) зависимости $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ армо-железа: 1 – коэффициент Пуассона отожженных образцов при напряжениях ниже 1 МПа; 2 – расчетная прямая для модуля продольной упругости, определенного при динамических испытаниях; 3 – расчетная прямая, характеризующая статический модуль упругости в области линейной зависимости отожженных образцов; 4, 5 – диаграммы $\sigma - \varepsilon$ для наклепанных и отожженных образцов соответственно; 6 – зависимость коэффициента поперечной деформации μ от деформации отожженных образцов.

Испытания в микроупругой области деформаций свидетельствуют, что металл в состоянии поставки характеризуется одной резонансной частотой продольных колебаний, определяющей единственное значение модуля продольной упругости E_0 (215 ГПа) – на рисунке прямая 2, и одним значением коэффициента Пуассона (0,293) – точка 1. Повышение напряжения в образце практически не оказало влияния на указанные результаты (с учетом увеличения рассеяния энергии в системе образец–станина–преобразователь).

Испытания трех отожженных образцов показали, что в каждом из них имеет место от одной до трех резонансных частот различной амплитуды колебаний. При этом резонансные частоты для одного и того же образца отличаются на 0,5...1,5%, а амплитуды колебаний на этих частотах – в 1,5...2 раза (достоверность того, что эти частоты являются резонансными, проверяли различными методами). Модули продольной упругости образцов, рассчитанные по резонансной частоте с максимальной амплитудой, были близки (с учетом погрешности эксперимента) к значению этой характеристики для металла в исходном состоянии. Увеличение амплитуды колебаний образца приблизительно в 10–12 раз привело к уменьшению резонансной частоты при максимальной амплитуде на величину, близкую к 0,05% (с учетом рассеяния энергии в системе). При увеличении напряжений в образце амплитуды “дополнительных” частот (с малой амплитудой коле-

баний) быстро затухали, что не позволяет сделать определенные выводы по данному вопросу.

Результаты испытаний образцов армко-железа в области макроупругих деформаций (статические испытания) показали следующее. При нагружении образцов металла в исходном состоянии зависимость $\sigma = \sigma(\varepsilon)$ может быть описана соотношением вида (1), в котором коэффициент B составляет примерно $1,2 \cdot 10^4$ ГПа (на рисунке кривая 4). Испытания отожженного металла свидетельствуют, что при нагружении образцов до напряжений порядка 80 МПа экспериментальные точки укладываются на прямую 3, соответствующую модулю продольной упругости $E_0 = 208$ ГПа. При дальнейшем нагружении образцов вплоть до напряжений порядка 160 МПа практически все экспериментальные точки ложатся на прямую 5, тангенс угла наклона которой к оси деформаций соответствует модулю упругости $E' = 125$ ГПа. Зависимость коэффициента поперечной деформации μ от деформации отожженного металла представлена кривой 6. Видно, что разброс экспериментальных точек небольшой, и коэффициент μ в приведенной области деформаций практически не зависит от деформации образца (увеличение μ по отношению к μ_y на последней ступени нагружения составляет около 3%).

Заключение. Разработаны методы и устройства для определения характеристик упругости конструкционных металлов и сплавов при микроупругих ($10^{-7} \dots 10^{-6}$) и макроупругих (область рабочих напряжений порядка $\sigma_{0,2}/1,5$) деформациях, позволяющих с достаточно высокой точностью учитывать особенности деформирования конструкционных металлов и сплавов.

Оценена необходимая точность экспериментального определения деформаций в зависимости от степени нелинейности диаграммы $\sigma - \varepsilon$ в указанном диапазоне деформаций. Использование предложенного динамического метода и устройства для определения характеристик упругости металла позволяет исследовать проблему многомодульности конструкционных материалов.

Статические испытания металлических материалов с использованием описанных методов и устройств позволяют более глубоко изучать развитие упругих деформаций при деформировании многих современных конструкционных материалов, а также оценить необходимость учета в прочностных расчетах нелинейности их деформирования в области инфинитезимальных деформаций (при рабочих напряжениях в деталях изделий и конструкций).

Резюме

Описано прецизійні методи і прилади для дослідження модулів поздовжньої пружності та коефіцієнта поперечної деформації конструкційних металів у межах від мікродеформацій ($\sim 10^{-7}$) до деформацій, що відповідають реальним робочим напруженням. Отримана точність експериментальних результатів достатня для розв'язання як наукових (можливість визначення "переходів другого порядку" у цих металах), так і практичних задач.

1. Фридман Я. Б. Механические свойства металлов: В 2 т. – М.: Машиностроение, 1974. – Т. 1. – 472 с.
2. Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. Ч. 1. Малые деформации / Под ред. А. П. Филина. – М.: Наука, 1984. – 600 с.
3. Войтенко А. Ф. Стандартизация испытаний на определение характеристик упругости металлов при низких температурах / АН УССР. Ин-т пробл. прочности. – Препр. – Киев, 1990. – 37 с.
4. Стрижало В. А., Филин Н. В., Куранов Б. А. и др. Прочность материалов и конструкций при криогенных температурах. – Киев: Наук. думка, 1988. – 240 с.
5. Гастев В. А. Краткий курс сопротивления материалов. – М.: Наука, 1977. – 456 с.
6. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Введ. 01.01.86.
7. Шапошников Н. А. Механические испытания металлов. – М.; Л.: Машгиз, 1954. – 443 с.
8. Скрипник Ю. Д., Войтенко А. Ф. Механические свойства металлов в области малых упругопластических деформаций // Пробл. прочности. – 1984. – № 6. – С. 62 – 67.
9. Kuster. Betrachtungen über den Elastizitätsmodul der Metalle und Legierungen // Metallkunde. – 1947. – No. 5. – S. 145 – 158.
10. Гурьев А. В. О коэффициенте поперечной деформации в пластической области // Физика металлов и металловедение. – 1956. – 2, вып. 3. – С. 457 – 463.
11. Гусенков А. П., Зацаринный В. В., Шнейдерович Р. М. Методика получения характеристик сопротивления малоциклового деформированию и разрушению при измерении поперечных деформаций // Завод. лаб. – 1971. – № 4. – С. 464 – 468.
12. Гурьев А. В. Теория упругих деформаций поликристаллического сплава // Журн. техн. физики. – 1954. – Вып. 9. – С. 1644 – 1659.
13. Сопротивление материалов деформированию и разрушению. Справочное пособие. Ч. 1 / Под ред. В. Т. Трощенко. – Киев: Наук. думка, 1993. – 288 с.
14. Лебедев А. А., Чечин Э. В. К выбору допускаемых напряжений при расчете конструкций по критерию статической прочности // Пробл. прочности. – 1980. – № 4. – С. 32 – 34.
15. ОСТ 26-04-2585-86. Техника криогенная и криогенно-вакуумная. Сосуды и камеры. Нормы и методы расчета на прочность, устойчивость и долговечность сварных конструкций.
16. Стрижало В. А., Войтенко А. Ф. Повышение точности определения характеристик упругости и их зависимости от температуры // Пробл. прочности. – 1999. – № 3. – С. 36 – 45.

17. *ASTM E8-69*. Standard Methods of Tension Testing of Metallic Materials // Annual Book of ASTM Standards. – 1973. – Pt. 31. – P. 196 – 215.
18. *ГОСТ 18957-73*. Тензометры для измерения линейных деформаций строительных материалов и конструкций. – Введ. 01.07.74.
19. *ANSI E83-67 (R74)*. Verification and Classification of Extensometers // Annual Book of ASTM Standards. – 1980. – Pt. 10. – P. 303 – 307.
20. *Экспериментальная механика*: В 2 кн.: Кн. 1 / Под ред. А. Кобаяси. – М.: Мир, 1990. – 616 с.
21. *Касаткин Б. С., Кудрин А. Б., Лобанов Л. М. и др.* Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. Справочник. – Киев: Наук. думка, 1981. – 584 с.
22. *ГОСТ 9038-99*. Меры длины концевые плоскопараллельные. – Введ. 01.07.91.
23. *РД 50-98-86*. Методические указания. Выбор универсальных средств измерений линейных размеров. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 22 с.

Поступила 30. 04. 2002