

К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УПРУГИХ, ДЕФОРМАЦИОННЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

В. А. СТРИЖАЛО, Л. С. НОВОГРУДСКИЙ, М. П. ЗЕМЦОВ

Изложен достаточно простой экспериментальный метод определения достоверных значений упругих, деформационных и энергетических характеристик конструкционных материалов, позволяющий учесть упругую деформацию силонагружающей цепи испытательной машины.

This paper describes a sufficiently simple experimental procedure for determination of valid values of the elastic, deformation and energy characteristics of structural materials, which allows for the elastic deformation of a loading force circuit of the testing machine.

Одними из основных показателей качества современных конструкционных материалов являются механические характеристики. При их определении возникает необходимость измерения с достаточно высокой точностью малых изменений геометрических размеров образцов (например, при определении упругих деформаций). Для реализации таких измерений обычно используют высокоточные тензометры либо тензорезисторные преобразователи, устанавливаемые (наклеиваемые) непосредственно на образец [1, 2]. Однако в определенных условиях испытаний при высоких, низких и криогенных температурах, в агрессивных средах, на облученных материалах и т. д., а также при измерении геометрических параметров образцов малых размеров (например, при определении модуля упругости при сжатии тонколистовых материалов) непосредственное определение изменяющихся размеров образцов весьма затруднено. В таких случаях используют довольно сложные системы крепления тензометров, которые позволяют вынести средство измерения из зоны влияния воздействующих факторов [3], но при этом являются источником дополнительных погрешностей измерения. В таких условиях испытаний об изменении размеров образцов также судят по изменению взаимного расположения подвижных и неподвижных нагружающих элементов испытательной машины, например, траверс или частей захватных устройств, находящихся вне зоны влияния воздействующих факторов. Для этой цели обычно используют механические или тензорезисторные измерители, считая, что изменение геометрических параметров образцов в направлении действия силы равно перемещению подвижного захвата или траверсы машины.

При проведении массовых испытаний в условиях заводских лабораторий, как правило, подобные измерения также осуществляют с помощью измерителей, устанавливаемых не на образцах.

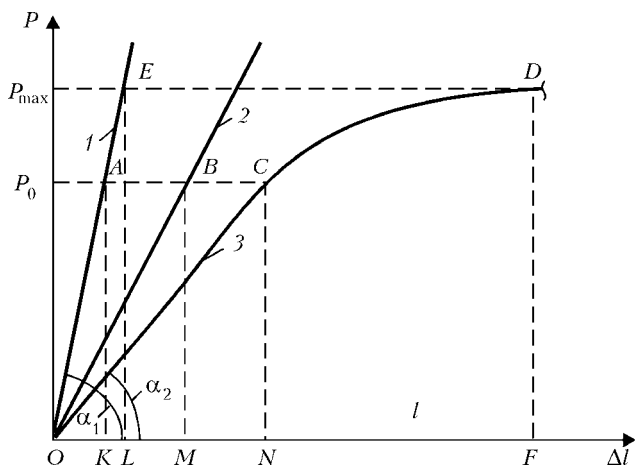
Однако при таких «внешних» схемах размещения измерителей перемещения фиксируется суммарное изменение геометрических размеров об-

разцов $\Delta l_{обр}$, упругих удлинений элементов силонагружающей цепи машины и возможное смятие материала $\Delta l_{см}$ в местах их сопряжений, головках образцов и т. д.:

$$\Delta l_g = \Delta l_{обр} + \Delta l_m + \Delta l_{см}$$

Если величина $\Delta l_{см}$ зависит от качества конструирования и изготовления элементов силовой цепи машины и образцов и может быть практически полностью устранена в результате предварительного обжатия, то величина определяется жесткостью испытательной машины $K_m = P/\Delta l_m$, характеризующей изменение упругого удлинения элементов цепи силонагружения машины Δl_m при изменении нагрузки P , возрастает пропорционально росту нагрузки и не устраняется. Величина жесткости силовой рамы устанавливается в технических условиях на конкретную машину [4], как правило, известна, что позволяет вычислить часть удлинения Δl_m , вызванную упругой деформацией силовой рамы. Однако суммарная жесткость переходных узлов, тяг, захватов, устройств герметизации ввода тяг в рабочую полость камеры и др., является величиной неизвестной и трудно рассчитываемой. Прогнозируемость изменения жесткости такой части силовой цепи, состоящей из ряда разнородных элементов, например, при изменении температуры, также недостоверна из-за неадекватного изменения жесткости каждого ее элемента. Таким образом, рассчитать величину части удлинения Δl_m , вызванную упругой деформацией указанных элементов с высокой точностью, не представляется возможным. А именно, удлинение этих элементов вносит, как правило, основной вклад в упругое удлинение силонагружающей цепи машины, так как силовые рамы испытательных машин обладают высокой жесткостью.

Данный подход позволяет определять указанные характеристики материалов с помощью серийных испытательных машин при «внешнем» расположении измерителей перемещения и не требует измерения изменений геометрических параметров непосредственно на образце.



Учет упругой деформации цепи силовонагружения машины при определении упругих, деформационных и энергетических характеристик материала (схема)

Сущность рассматриваемого подхода заключается в том, что установление истинных значений характеристик достигается за счет предварительного определения величины упругой деформации (упругого удлинения) элементов силовонагружающей цепи машины. Для этой цели применяется жесткий образец с весьма малым, практически нулевым, приращением упругой деформации при максимальной нагрузке, создаваемой машиной. Эффект максимальной жесткости достигается за счет использования для изготовления образца материала с высоким модулем упругости и выбора соответствующих данному требованию его размеров. При этом нагружение жесткого образца осуществляется в условиях абсолютно идентичных условиям испытаний исследуемых образцов. В результате нагружения жесткого образца до нагрузки, соответствующей максимально допустимому значению для данной машины, определяется жесткость цепи силовонагружения машины и значение $\Delta l(P) = P \operatorname{ctg} \alpha_1$, где α_1 — угол между диаграммой деформирования жесткого образца и осью удлинений на диаграммной плоскости (рисунок). Истинное значение упругого удлинения исследуемого образца $\Delta l_{\text{км}}$ определяется как разность между регистрируемыми при нагрузке P_0 значением его удлинения Δl_{0N} ($\Delta l_{0N} = P_0 \operatorname{ctg} \alpha_2$, где α_2 — угол между линией упругости исследуемого образца ОС и осью удлинений на диаграммной плоскости деформирования), и значением удлинения жесткого образца $\Delta l_{\text{ОК}}$:

$$\Delta l_{\text{км}} = \Delta l_{0N} - \Delta l_{\text{ОК}} = P_0(\operatorname{ctg} \alpha_2 - \operatorname{ctg} \alpha_1). \quad (1)$$

Здесь $P_0 \leq P_{\text{пн}}$ ($P_{\text{пн}}$ — нагрузка, при которой начинается пластическое деформирование исследуемого материала).

Общая величина полного удлинения образца Δl_{LF} по аналогии с (1) может быть определена как

$$\Delta l_{\text{обр}} = \Delta l_{\text{LF}} = \Delta l_{\text{OF}} - \Delta l_{\text{OL}} = \Delta l_{\text{OF}} - P_{\text{max}} \operatorname{ctg} \alpha_1.$$

Весьма существенные погрешности в определение характеристик разрушения материала может

внести неучет податливости испытательной машины при вычислении энергии, затрачиваемой на его деформирование и разрушение. При «внешнем» расположении измерителя перемещения площадь под регистрируемой в процессе нагружения образца диаграммы соответствует энергии W , затрачиваемой на его деформирование (разрушение) и упругое деформирование элементов силовонагружающей цепи машины. Площадь под диаграммой (см. рисунок) описывается выражением

$$S_{\text{OCD}F} = \int_0^{\Delta l_{\text{OF}}} P d(\Delta l),$$

а энергия упругого деформирования, определяемая при испытаниях жесткого образца, будет

$$A_{\text{упр}} = S_{\text{OEL}} = \frac{1}{2} P_{\text{max}} \Delta l(P_{\text{max}}).$$

Здесь P_{max} — значение нагрузки, соответствующее наибольшему, зафиксированному при нагружении исследуемого образца в точке Δ диаграммы. Работа, затраченная именно на деформирование (разрушение) образца определяется как $A_{\text{обр}} = W - A_{\text{упр}}$.

В качестве примера определили энергию, необходимую для продвижения трещины (на участке ее стабильного роста) в образцах стали 03X20H16AG6 при температуре 4,2 К. Для того, чтобы реализовать такой температурный режим, прямоугольный призматический образец с боковым надрезом и иницированной в нем трещиной (СТ 0,5), установленный в захватах испытательной машины гидравлического типа помещали в криостат с односторонним вводом силовых элементов, который закрепляли на неподвижной траверсе машины ZD-10 и заполняли жидким гелием. Значения перемещения точек приложения нагрузки к образцу, необходимые для вычисления энергии, определяли, измеряя перемещение подвижной траверсы относительно неподвижной. Поправку на упругое деформирование элементов силовонагружающей цепи машины находили с помощью образца, изготовленного из материала с высоким значением модуля упругости — термообработанной по специальному режиму стали 40X. При этом образец, представляющий собой прямоугольную призму без надреза и исходной трещины, закрепляли в тех же захватах, помещали в криостат с жидким гелием и нагружали до нагрузки, соответствующей максимальной при нагружении образца стали 03X20H16AG6. Вычисленное по диаграмме значение работы, затраченной на продвижение трещины в образце стали 03X20H16AG6, составило 12,5 Дж. Максимальное значение нагрузки, зафиксированное в процессе испытаний достигало 39500 Н. Для указанного уровня нагрузки накопленная элементами силовонагружающей цепи машины энергия равна 2,2 Дж. Следовательно энергия, затраченная собственно на продвижение трещины, составит 10,3 Дж или 82,5 % от вычисленного по диаграмме значения. Иными словами, погрешность определения величины указанной энергии при неучете



чете упругой деформации элементов цепи силонагружения могла бы составить 21,3 %!

Дальнейшее развитие указанного подхода позволяет определять модули упругости материалов с использованием серийных испытательных машин в условиях ограниченного доступа к объекту испытаний и без специальных измерительных устройств, устанавливаемых непосредственно на нем. Для этой цели необходимо в абсолютно одинаковых условиях испытаний зафиксировать начальные, соответствующие упругому деформированию, участки диаграмм растяжения образца исследуемого материала, жесткого образца и образца материала с известным в данных условиях модулем упругости.

Последовательность операций при определении модуля упругости исследуемого материала следующая:

1) нагружение жесткого образца и регистрация диаграммы деформирования ОА (поз. 1, см. рисунок);

2) нагружение образца с известным модулем упругости $E_{изв}$ и регистрация начального участка ОВ диаграммы деформирования (поз. 2);

3) нагружение образца исследуемого материала с одинаковыми с образцом по п. 2 геометрическими параметрами и регистрация начального участка ОС диаграммы деформирования (поз. 3);

4) определение истинных значений упругих деформаций образца с известным модулем упругости $E_{изв}$ и образца исследуемого материала E при одинаковом уровне нагрузки P_0 :

$$\epsilon_{изв} = \frac{\Delta l_{ОМ} - \Delta l_{ОК}}{l_0} \text{ и } \epsilon = \frac{\Delta l_{ОН} - \Delta l_{ОК}}{l_0},$$

где l_0 — начальная расчетная длина образца.

Несложно показать, что при соблюдении изложенных в пп. 1–4 требований модуль упругости исследуемого материала E будет

$$E = E_{изв} K, \text{ где } K = \epsilon_{изв} / \epsilon.$$

С использованием такого подхода был определен модуль упругости пластин слоистого стеклопластика толщиной 10 мм в поперечном направлении при сжатии на машине Инстрон. В качестве материала с известным модулем упругости использовали сплав Д16.

Поправку на упругое деформирование цепи силонагружения определяли в результате сжатия опор без образца. При одинаковых уровнях нагрузки перемещение при сжатии без образца составило 0,038 мм, при сжатии образца сплава Д16 — 0,050 мм, а при сжатии образца из стеклопластика — 0,059 мм. Расчетное значение модуля упругости слоистого стеклопластика — 11000 МПа. Паспортное значение модуля упругости — не менее 10800 МПа.

Выводы

Рассмотренные в работе подходы позволяют учесть упругую деформацию цепи силонагружения испытательной машины при определении упругих, деформационных и энергетических характеристик материалов, избежав тем самым весьма значительных погрешностей при нахождении их значений, а также определять значения статического модуля упругости материалов без применения специальных измерительных устройств.

1. *E111-61*. Standard Method of Test for Young's modulus at Room Temperature. — Annual book of Standards, Part 31, 1973. — P. 414–418.
2. *Тарнопольский Ю. М., Кинцис Т. Я.* Методы статических испытаний армированных пластиков / 3-е изд. перераб. и дополн. — М.: Химия, 1981. — 271 с.
3. *Алексюк М. М., Борисенко В. А., Краценко В. П.* Механические испытания материалов при высоких температурах. — Киев: Наук. думка, 1980. — 208 с.
4. *ГОСТ 28840-90*. Машины для испытания материалов на растяжение, сжатие и изгиб. Общие технические требования. — Введен 01.01.93. — М.: Изд-во стандартов, 1991. — 10 с.