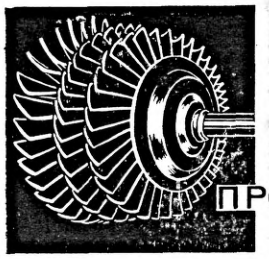

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 620.169.1

Ф. Ф. Гигиняк, О. К. Шкодзинский, Р. К. Федоров, М. В. Сторчак, В. В. Башта (Киев)

Автоматизированный стенд для испытаний конструкционных материалов в условиях сложного напряженного состояния

Описан испытательный комплекс, позволяющий проводить экспериментальные исследования на тонкостенных трубчатых образцах при различных соотношениях главных напряжений в широком диапазоне температур в условиях статического и циклического нагружений и различных режимов силового воздействия.

Комплексные исследования закономерностей деформирования и разрушения конструкционных материалов при двухосном нагружении с вариацией условий испытаний по напряженному состоянию, температуре и режиму имеют большое практическое значение.

Разработанное к настоящему времени оборудование для испытаний при сложном напряженном состоянии не всегда отвечает современным требованиям, предъявляемым к нему. В частности, ограниченным является диапазон реализуемых соотношений главных напряжений; в большинстве случаев установки предназначены для испытаний в условиях однократного нагружения; приводы в системах силового нагружения требуют применения весьма сложного электронного оборудования для согласования их совместной работы. При этом стыковка новейших электронных управляющих систем со сравнительно менее точными системами нагружения, использовавшимися ранее, не дает ожидаемого положительного эффекта [1—3]. Вместе с тем существенным достоинством с точки зрения использования в силонагружающих системах испытательных установок обладают приводы постоянного тока с отрицательной обратной связью.

С учетом вышеизложенного в Институте проблем прочности АН УССР на основе разработанной ранее установки [4] создан испытательный стенд СНТ-8У (рис. 1) для исследований конструкционных материалов на тонкостенных трубчатых образцах в условиях статического и циклического нагружений при сложном напряженном состоянии в широком диапазоне температур.

Стенд состоит из следующих основных систем: нагружения осевой силой и давлением; нагружения осевой силой и крутящим моментом; измерения и регистрации усилий и деформаций; нагрева или охлаждения и регулировки температуры; дозаправки ступени низкого давления.

Система нагружения осевой силой и давлением включает в себя исполнительные устройства в виде поршневого механизма генерации давления с гидроусилителем, тиристорный электропривод постоянного тока типа ЭТУ 3601—4027, датчик давления (модель «Сапфир 22ДИ»), задатчики закона нагружения в виде генератора сигналов специальной формы (модель Г6-15) для случая циклического воздействия нагрузки, а также интегратор для однократного приложения нагрузки или циклического при выдержках в нагруженном состоянии длительностью более половины периода цикла.

Нагружение давлением и осевой силой производится следующим образом. Задающее напряжение задатчика сравнивается на входе блока управления тиристорного привода с напряжением от датчика усилий или соответствующего канала тензоизмерительной системы. Система регулирования тиристорного привода при этом вырабатывает такое управляющее воздействие, которое обеспечивает минимальное рассогласование между задаваемой и регулируе-

ISSN 0556—171X Проблемы прочности.— 1991.— № 10

мой величинами. Аналогичное управляющее воздействие вырабатывается и при изменении усилия в зависимости от температуры и других неконтролируемых возмущений на объект регулирования.

На стенде возможны такие режимы работы.

1. Ручной режим, обеспечивающий нагружение—разгрузку с постоянной скоростью вращения привода, применяется в основном для регулировки и настройки системы.

2. Автоматический режим, предусматривающий:

а) стабилизацию регулируемого параметра (давление, деформация, осевая нагрузка);

б) однократное нагружение с управлением по нагрузке или деформации, измеряемой на рабочей части образца;

в) однократное нагружение с управлением по скорости нагружения или деформирования с переходом в режим стабилизации контролируемого параметра (режим ползучести или релаксации);

г) циклическое нагружение в мягком или жестком режимах по закону, задаваемому генератором Г6-15, обеспечивающим знакопостоянную синусоидальную, треугольную, пилообразную формы цикла;

д) циклический режим по генератору с приставкой, позволяющий получить трапецеидальный закон регулирования с периодом 1 ... 1000 с;

е) циклический режим по трапецеидальному закону с периодом до 2 ч.

Система нагружения осевой силой и давлением дает возможность осуществлять плавный переход в статическом состоянии с режима управления по одному параметру на режим управления по другому. Такой переход реализуется благодаря статичности системы нагружения, которая достигается с помощью самотормозящей пары винт—гайка в приводе узла генерации давления. В системе предусмотрено аварийное отключение при крайних положениях поршня гидроцилиндра узла генерации давления и в случае превышения предварительно заданной скорости двигателя, что гарантирует надежную защиту установки при разрушении объекта испытания и безопасность при длительных экспериментах.

Для нагружения образца осевой силой служит реверсорное устройство с силовым гидроцилиндром, давление в который подается от механизма генерации давления, упоминавшегося выше. С целью получения различных соотношений между осевыми и окружными напряжениями в условиях пропорционального нагружения применяются сменные гидроцилиндры с различным диаметром поршня. Благодаря использованию фторопластовых уплотнений шевронного типа усилия трения в силовом цилиндре сведены к минимуму, что позволяет обеспечить с достаточной для практики точностью постоянство соотношения между давлением и осевой силой при переменном режиме нагружения.

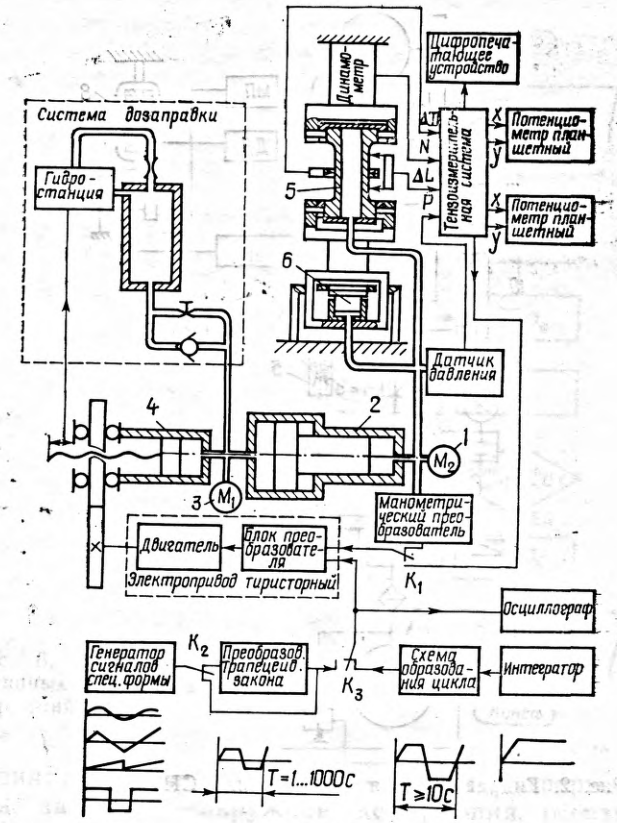

Рис. 1. Блок-схема стенда СНТ-8У: *1* — манометр высокого давления; *2* — гидроусилитель; *3* — манометр низкого давления; *4* — нагружающий цилиндр механизма генерации давления; *5* — испытуемый образец; *6* — гидроцилиндр реверсорного устройства.

Основные технические характеристики системы нагружения стенда

Мощность, кВт	2,2
Максимальное давление *P*, МПа	150
Максимальная осевая нагрузка *N*, Н	10^5
Точность нагружения по давлению, МПа	±0,025
Частота нагружения, Гц	0,001 ... 1
Температура испытаний, °С	400 ... —150
Максимальный крутящий момент $M_{кр}$,	300

Гидравлическая схема установки (рис. 2) включает в себя систему дозаправки, содержащую шестеренчатый насос *1*, нагнетательная магистраль которого посредством электромагнитного золотника *2* соединена с полостью низкого давления гидроусилителя *3*. Давление в магистрали устанавливается с помощью регуляторов *4*, а расход масла регулируется дросселями *5*. Система дозаправки от рабочей полости гидросистемы отделена обратным клапаном *6* и вентелем *7*. Полость высокого давления гидроусилителя соединена с полостью трубчатого образца *8* и силового цилиндра *9* осевого нагруже-

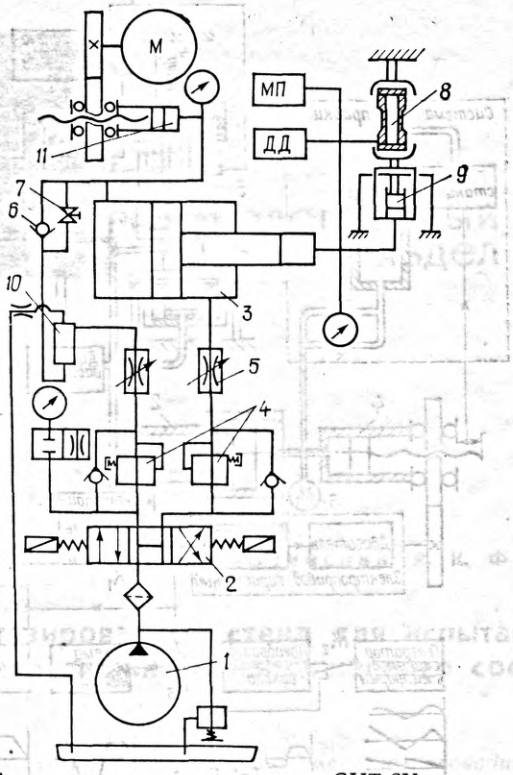

Рис. 2. Гидравлическая схема стенда СНТ-8У.

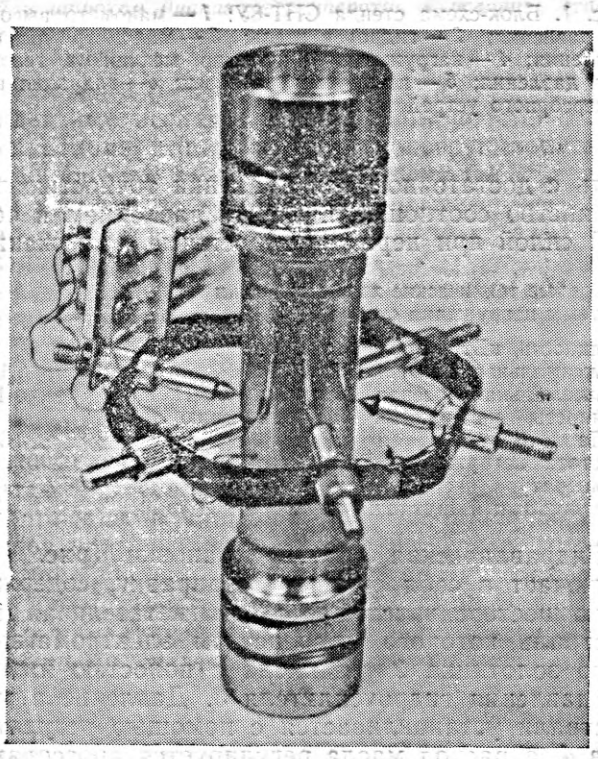

Рис. 3. Тензометр для измерения поперечных деформаций.

ния. Для устранения попадания воздуха из системы дозаправки в рабочую полость низкого давления предусмотрен воздухоотделитель *10*.

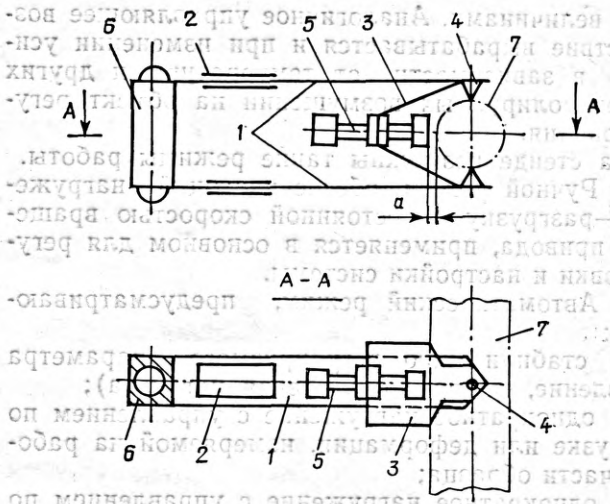

Рис. 4. Устройство для измерения поперечных деформаций: *1* — упругий элемент; *2* — тензорезистор; *3* — защитная пластина; *4* — установочная игла; *5* — упор; *6* — колодка; *7* — образец.

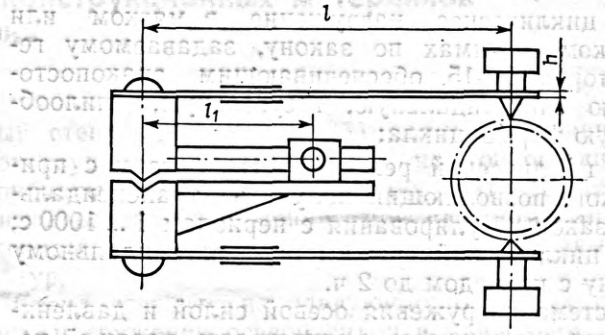

Рис. 5. Схема разборного тензометра с магнитом.

Рабочая полость гидросистемы (полость низкого давления гидроусилителя) соединена с напорной полостью узла генерации давления *11*.

В качестве рабочей жидкости в ступени высокого давления при высоких температурах служит жидкость марки АМГ-10 (ГОСТ 6794—53), при низких — изопентан. Ступень низкого давления гидросистемы заправлялась маслом «Индустриальное 20».

Для совместного нагружения образца осевой силой и крутящим моментом использовали устройство, которое после апробации показало удовлетворительную надежность [3].

Система измерения усилий и деформаций, основанная на тензоизмерительной системе «ТИС — Дельта-16» [5], сохранена прежней [4] и дополнена электронным счетчиком числа циклов нагружения с запрограммированным опросом каналов измерения через число циклов, регламентированное ГОСТ 25.505—85.

Поперечные деформации измеряли с помощью различных тензометров (рис. 3—5), защищенных авторскими свидетельствами [6—8]. Тензометры, показанные на рис. 4 и 5, весьма перс-

пективны при испытаниях в условиях высоких температур, так как позволяют избежать повреждения средств измерений деформаций при разрушении образца. Тензометр для измерения малых тангенциальных деформаций трубчатых образцов (рис. 3) сочетает преимущества двухточечных дискретных тензометров (простота конструкции, надежность и удобство в пользовании) и тензометров с гибким измерителем (получение усредненной информации об измеряемой деформации), кроме того, его конструкция крепления упругих элементов обеспечивает безопасность эксплуатации устройства при разрушении образца в условиях нагружения внутренним давлением. Относительная расчетная погрешность (%) измеряемых и рассчитываемых параметров нагружения и деформации трубчатых образцов такова:

$$\varepsilon_z = \pm 1{,}5;\ \varepsilon_\theta = \pm 2{,}0;\ N = \pm 1{,}0;\ P = \pm 1{,}0;$$
$$\sigma_z = \pm 2{,}2$$
$$\sigma_\theta = \pm 2{,}5;\ M_{кр} = \pm 1{,}5.$$

Система нагрева в стенде СНТ-8У идентична использованной ранее [4]. Для испытаний образцов при низких температурах служит система охлаждения и регулирования температуры, подробно описанная в работе [9].

Рассматриваемый испытательный комплекс позволяет исследовать вязкопластические характеристики материалов по специально разработанной методике испытаний на ползучесть [10] путем ступенчатого нагружения при различных степенях необратимой деформации и скоростях предварительного активного деформирования в условиях линейного и сложного напряженного состояний. Метод ступенчатого нагружения подобен используемому в случае одноосного растяжения [10] и состоит в следующем.

В начале и конце каждого участка ползучести осуществляется переход в режим релаксации. Длительность периода релаксации 600 ... 1000 с выбрана с таким расчетом, чтобы практически полностью достигалось равновесное напряженно-деформированное состояние. Активное нагружение образца производится при постоянно контролируемой скорости деформации. После затухания релаксации напряжений в начале каждой ступени испытательная ($\dot{\varepsilon}_i = 0$) машина переводится в режим ползучести ($\dot{\sigma}_i = 0$), при этом нагрузку быстро повышают до значения, предшествовавшего релаксации. Дальнейшие испытания на ползучесть проводят в течение 600 с. Затем машину снова переводят в режим контролируемой деформации, осуществляют испытания на релаксацию, после чего следует разгрузка. После этого спыт повторяют при более высоком уровне напряжений, и так до потери устойчивости процесса деформирования. Во время испытаний параметры регистрируются в координатах осевая нагрузка — осевая деформация, давление — окружная деформация, осевая деформация — время, окружная деформация — время.

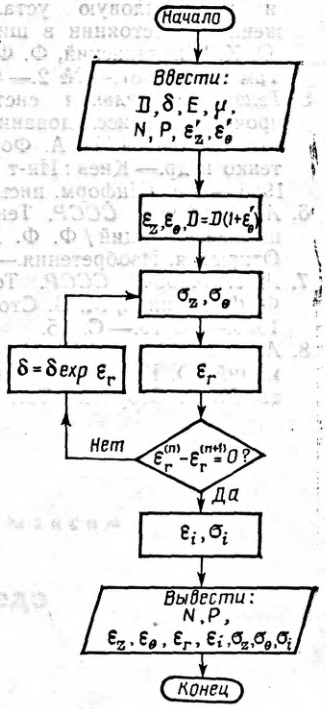

Рис. 6. Алгоритм расчета истинных напряжений и деформаций.

При обработке результатов эксперимента для расчетов напряжений и деформаций использовали известные подходы, подробно изложенные в работе [11]. При этом для различных режимов испытаний применяли разработанный в Институте проблем прочности АН УССР комплекс программ, реализованный на ЭВМ. В качестве примера на рис. 6 представлен алгоритм одной из этих программ.

Summary

A test bed which permits performing experimental studies on thin-walled tube specimens under different correlations of main stresses within a wide range of temperatures under conditions of statical and cyclic loadings and different conditions of force action is described.

1. *Автоматизированная* установка для механических испытаний материалов в условиях сложного напряженного состояния / Б. И. Ковальчук, А. А. Лебедев, В. Г. Гришко и др. // Завод. лаб.— 1977.— 43, № 8.— С. 1008—1012.
2. *Испытательная* техника для исследования прочности материалов / А. П. Волощенко, Ю. А. Кузема, М. М. Алексюк и др. // Пробл. прочности.— 1980.— № 10.— С. 138—145.
3. *Установка* для исследования конструкционных материалов в условиях малоциклового нагружения при сложном напряженном состоянии в широком диапазоне температур / А. А. Лебедев, Ф. Ф. Гигиняк, М. В. Сторчак и др. // Там же.— 1982.— № 5.— С. 115—120.
4. *Установка* для испытаний на циклическую ползучесть,

и малоцикловую усталость при сложном напряженном состоянии в широком диапазоне температур / О. К. Шкодзинский, Ф. Ф. Гигиняк, В. В. Башта и др. // Там же.— 1987.— № 2.— С. 114—117.
5. *Тензоизмерительная* система «ТИС — Дельта-16» для прочностных исследований материалов и конструктивных элементов / Н. А. Фот, А. Г. Малый, И. С. Кондратенко и др.— Киев : Ин-т пробл. прочности АН УССР.— 1986.— 4 с. (Информ. письмо; № 129).
6. *А. с. 1359653 СССР.* Тензометр для измерения поперечных деформаций / Ф. Ф. Гигиняк, О. К. Шкодзинский // Открытия. Изобретения.— 1987.— № 46.— С. 176.
7. *А. с. 1480840 СССР.* Тензометр / О. К. Шкодзинский, Ф. Ф. Гигиняк, М. В. Сторчак, В. В. Башта // Там же.— 1989.— № 19.— С. 15.
8. *А. с. 1421980 СССР.* Устройство для измерения деформаций / О. К. Шкодзинский, Ф. Ф. Гигиняк, В. В. Башта, М. В. Сторчак // Там же.— 1988.— № 33.— С. 148.
9. *Новиков Н. В., Лебедев А. А., Гигиняк Ф. Ф.* Устройства для механических испытаний конструкционных материалов при низких температурах.— Киев : Наук. думка, 1968.— 56 с.
10. *А. с. 1525533 СССР.* Способ определения упруговязкопластических свойств металлических материалов при статическом нагружении / Ф. Ф. Гигиняк, О. К. Шкодзинский, А. А. Лебедев // Открытия. Изобретения.— 1989.— № 44.— С. 155.
11. *Механические* свойства конструкционных материалов при сложном напряженном состоянии / А. А. Лебедев, Б. И. Ковальчук, Ф. Ф. Гигиняк, В. П. Ламашевский.— Киев : Наук. думка, 1983.— 368 с.

Ин-т пробл. прочности АН Украины

Поступила 04.02.91