

## Методика и установка для исследования композиционных материалов при кручении в условиях температур до 3300 К

В. С. Дзюба, С. В. Окснюк

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

*Предложены методика и установка для исследования прочностных свойств композиционных материалов при кручении в условиях температур до 3300 К в вакууме, окислительной или инертной среде. Установка снабжена системой программного нагрева образцов для реализации условий, близких к эксплуатационным режимам работы материала, что позволяет проводить испытания со скоростью нагрева примерно 500 град/с при соблюдении равномерного температурного поля по длине образца.*

**Ключевые слова:** композиционные материалы, кручение, равномерное температурное поле, нагрев образца, термопары.

В современной технике для изготовления элементов конструкций, работающих при высоких температурах (~ 3300 К), широко используются композиционные материалы (КМ). Поскольку большая часть таких элементов работает в условиях сложного нагружения [1], актуальным является исследование физико-механических свойств указанных материалов не только при растяжении–сжатии [2, 3], но и при кручении [4]. Для получения достоверных сведений об их термомеханических свойствах необходимо проводить исследования прочности в условиях, максимально близких к эксплуатационным. Возникающие при этом трудности связаны с обеспечением точного измерения усилия и деформации, необходимостью быстрого нагрева образца со скоростью примерно 500 град/с, а также поддержанием равномерного температурного поля по длине его рабочей части. В случае проявления в КМ анизотропии механических свойств (при комнатной и высоких температурах) такие характеристики, как предел прочности при кручении  $\tau_c$  и модуль сдвига  $G$ , необходимо определять в каждом из направлений анизотропии. Для этого используются цилиндрические (трубчатые) образцы и образцы некруглого сечения. Учитывая сложность изготовления цилиндрических образцов и получения равномерного температурного поля по их длине при скоростях нагрева 500 град/с и выше, методики исследования прочности КМ на призматических образцах прямоугольного сечения более предпочтительны. В данном случае использовали образцы, показанные на рис. 1.

Минимальный размер сечения образца выбирается таким, чтобы материал можно было считать однородным (выполнением этого условия является требование  $Q/l \leq 0,03$ , где  $Q$  – размер компоненты материала, например диаметр волокон;  $l$  – характерный размер материала, например толщина). Длина рабочей части выбирается равной 30–50 мм с целью измерения угла поворота с заданной точностью (1%) и создания равномерного температурного поля по длине образца. Форма и размеры захватов обеспечивают надежную фиксацию образца при кручении, но не препятствуют его продольному перемещению при нагреве.

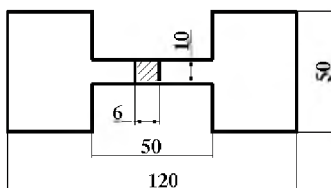


Рис. 1. Образец для испытаний.

В Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины создана установка, предназначенная для испытаний призматических образцов из углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) на кручение при температурах до 3300 К в вакууме, относительной или инертной среде со скоростями нагрева примерно 500 град/с. Установка, изготовленная на базе испытательной машины 1958У10-1, снабжена системой программного нагрева образца, что позволяет реализовать близкие к эксплуатационным режимы работы материала. Используемый в установке способ нагрева образца пропусканием электрического тока с дополнительным подогревом его краев позволяет создавать равномерное температурное поле. Установка подключена к персональному компьютеру, с помощью которого производится запись измеряемых величин. Схема установки приведена на рис. 2.

К верхней траверсе 15 испытательной машины крепится камера 12 цилиндрической формы. На верхней траверсе установлен датчик усилия 16 типа 1798-ДСТУ2, соединенный через толкатель 18 с приспособлением для кручения 11. Образец 14 устанавливается в водоохлаждаемые захваты 13, посаженные на валы 10 и 28. Тросики 7 и 27, закрепленные одними концами на балке 6 нижней траверсы 5, другими концами намотаны на валах таким образом, что при движении нижней траверсы вниз тросик 7 вращает вал 10 в одну сторону, а тросик 27 – вал 28 в противоположную сторону, закручивая образец. Для облегчения подвода-отвода воды к захватам в валах просверлены отверстия, а охлаждающие трубки 22 присоединяются к торцам валов.

Камера вместе с толкателем, нижней траверсой и уплотнениями 4 и 17 составляют герметичную полость для однородной среды испытаний (вакуум, воздух, инертный газ). Создание и контроль условий, близких к вакууму, в камере обеспечиваются насосом 25 и мановакууметром 20. Для получения инертной среды в камере проводится закачка инертного газа из баллона 24.

Нагрев образца осуществляется прямым пропусканием электрического тока. В задней съемной крышке водоохлаждаемой камеры установлены медные водоохлаждаемые токовводы 19, через которые к захватам с помощью медных проводов 21 подводится переменное напряжение для нагрева рабочей части образца. Для дополнительного подогрева краев рабочей части последнего к токоподводам, расположенным на захватах, подключено электрическое питание, подаваемое в цепь основного нагрева с трансформатора 23 типа ОСУ-40, а в цепь дополнительного подогрева – с двух трансформаторов мощностью по 5 кВт. Схема нагрева образца показана на рис. 3.

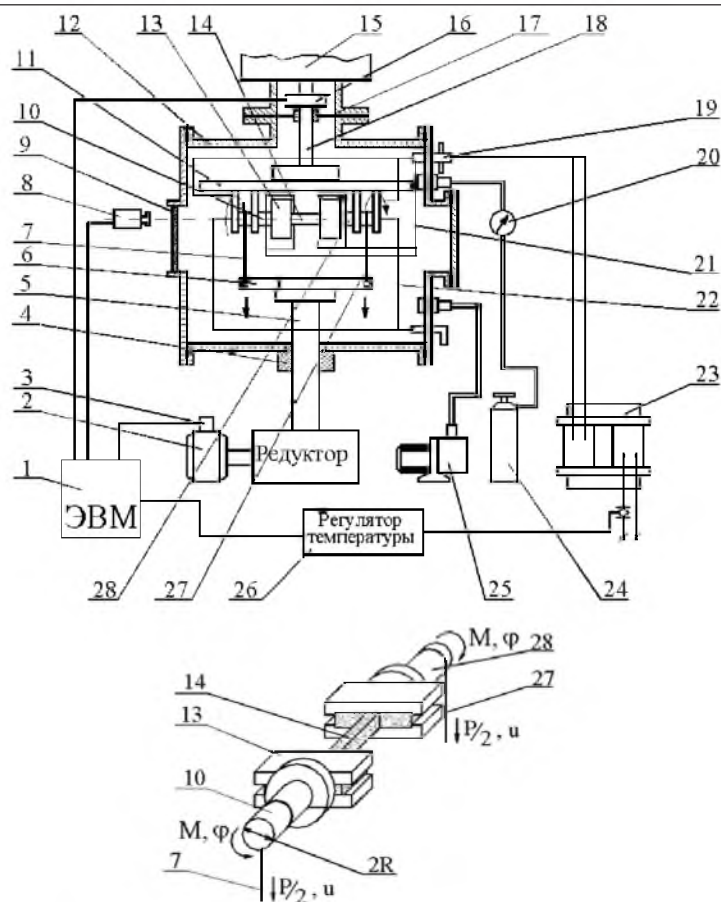


Рис. 2. Блок-схема установки с конструктивными элементами камеры.

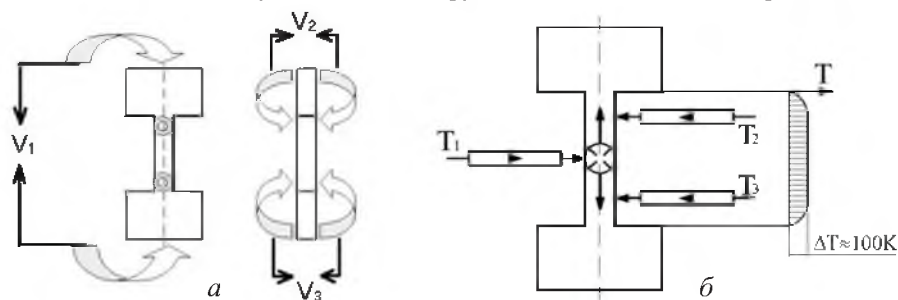


Рис. 3. Схема нагрева образца (а) и измерения температуры (б).

Для получения надежного электрического контакта между образцом и токоподводами при высоких температурах на последних установлены электроды из материала образца, притертые к поверхности и прижимаемые пружинами. С целью обеспечения равномерного температурного поля по длине образца регулирование мощностями в цепях основного и дополнительного нагревов производится с помощью специального устройства. Тиристорный регулятор температуры 26 (рис. 2), на вход которого подаются сигналы с трех термопар (рис. 3, б), корректирует силу тока по каждому из каналов нагрева, выравнивая таким образом температуру по длине рабочей

зоны образца. В передней съемной крышке камеры имеется смотровое окно 9, через которое при температурах более 2300 К осуществляется контроль равномерности распределения температуры путем сканирования по высоте образца визира пирометра 8 (рис. 2). Благодаря вышеописанной схеме можно достичь перепада температур по длине рабочей части не более 100 К (при 3300 К).

Регистрация и первичная обработка получаемой информации (время  $t$ , температура  $T$ , усилие  $P$ , перемещение  $u$ ), а также необходимая в процессе проведения эксперимента ее визуализация осуществляются ЭВМ 1. При окончательной обработке результатов угол закручивания  $\varphi$  определяется путем пересчета перемещения нижней траверсы в угол поворота валов 10 и 28 (рис. 2):

$$\varphi = \frac{2u}{R}, \quad (1)$$

где  $u$  – перемещение нижней траверсы;  $R$  – радиус валов. Ввиду того что при перемещении нижней траверсы образец закручивается в противоположные стороны, в формуле (1) перемещение  $u$  умножается на два. Точность перемещения  $u$ , измеряемого по углу поворота двигателя 2 с помощью датчика перемещения 3 (рис. 2), составляет 5 мкм. Крутящий момент вычисляется путем пересчета сил натяжения тросиков:

$$M = \frac{PR}{2}. \quad (2)$$

Для определения силы  $P$  используется датчик усилия. Данные по перемещению и усилию считываются и обрабатываются ЭВМ. Максимальные абсолютные погрешности измерения угла закручивания и крутящего момента составили соответственно  $8 \cdot 10^{-4}$  рад и  $6,2 \cdot 10^{-4}$  Н·м.

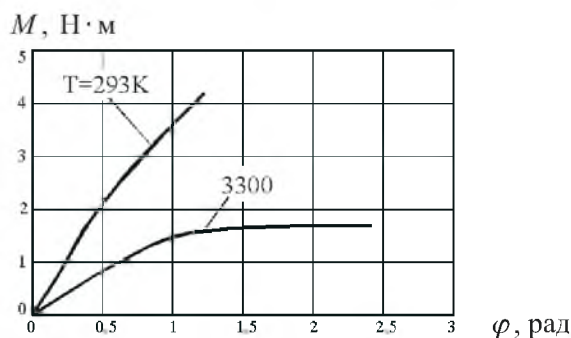


Рис. 4. Влияние температуры на зависимость крутящего момента от угла закручивания углепластика.

С помощью данной методики было исследовано влияние температуры на зависимость крутящего момента от угла закручивания углепластика. В качестве иллюстрации на рис. 4 представлены диаграммы кручения прямо-

угольного образца сечением  $6 \times 10$  мм из углеродного композиционного материала при температурах 293 и 3300 К в инертной среде. Полученные данные свидетельствуют о существенном влиянии температуры на прочностные и жесткостные свойства КМ при кручении.

## Резюме

Запропоновано методику та установку для дослідження характеристик міцності композиційних матеріалів при крутінні в умовах температур до 3300 К у вакуумі, окисному або інертному середовищі. До складу установки входить система програмного нагрівання зразків для реалізації умов, близьких до експлуатаційних режимів роботи матеріалу, що дозволяє проводити випробування зі швидкістю нагрівання приблизно 500 град/с при дотриманні рівномірного температурного поля по довжині зразка.

1. *Лехницький С. Г.* Кручение анизотропных и неоднородных стержней. – М.: Наука, 1971. – 240 с.
2. *Установка СНТ-5П* для исследования механических свойств материалов при сложном напряженном состоянии в широком диапазоне температур // Каталог-справочник. Установки для исследования механических свойств материалов и элементов конструкций. – Киев: Наук. думка, 1982. – С. 10 – 11.
3. *Установка СНТ-6* для испытания материалов при плоском напряженном состоянии // Каталог-справочник. Установки для исследования механических свойств материалов и элементов конструкций. – Киев: Наук. думка, 1982. – С. 12 – 13.
4. *Богомолов А. В., Борисенко В. А.* Установка для испытания композиционных материалов на кручение при температурах до 3300 К // Пробл. прочности. – 1992. – № 1. – С. 87 – 88.

Поступила 17. 07. 2002