

ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ РАЗДЕЛ

УДК 620.18(035)

Исследование прочности углерод-углеродных композиционных материалов в условиях температур 293...3300 К при высокоскоростном нагреве

В. С. Дзюба, С. В. Окснюк

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

Приведены результаты исследования влияния температуры от 293 до 3300 К на прочность углерод-углеродных композиционных материалов при растяжении и сжатии. Исследован характер разрушения образцов в диапазоне температур 293...3300 К. Показано, что как при растяжении, так и при сжатии наблюдаются качественно одинаковые изменения прочности материала.

Ключевые слова: композиционные материалы, растяжение, сжатие, упрочнение, разупрочнение, прочность, деформационные свойства.

Получение достоверных данных о механических свойствах углерод-углеродных композиционных материалов (УУКМ) в условиях, максимально приближенных к эксплуатационным, – один из определяющих факторов их эффективного использования. Проведение применительно к таким условиям испытаний на прочность – весьма сложная методическая задача. Существующие в настоящее время методики высокотемпературных испытаний позволяют получать количественные экспериментальные результаты при влиянии температур до 2300...2800 К [1, 2].

Для получения данных о термомеханических свойствах углерод-углеродных композиционных материалов в условиях, близких к эксплуатационным (температура 293...3300 К, скорость нагрева порядка 1000 град/с), в соответствии с описанной ранее [3] экспериментальной методикой проведены испытания на кратковременную прочность при растяжении и сжатии в аргоне. При этом использовался созданный полностью автоматизированный комплекс для испытаний УУКМ при высоких температурах в вакууме, воздушной или инертной среде. Комплекс, изготовленный на базе испытательной установки 1958У10-1 [4], оборудован современными средствами управления экспериментом и измерений с применением ЭВМ. Для повышения надежности результатов при различных видах испытаний предложены оригинальные образцы для испытаний [5–7] (рис. 1).

Используемый способ нагрева пропусканием электрического тока с дополнительным подогревом краев образца позволил провести указанные исследования при скоростях нагрева примерно 1000 град/с с обеспечением

равномерного поля температур по длине рабочей части образца. Режим теплового нагружения определялся работой трех электрически не связанных источников питания (рис. 2), программируемых от единой системы управления нагревом. Оптимизация соотношения напряжений обеспечивает необходимую скорость нагрева, компенсацию оттока тепла в захваты и тем самым минимизацию градиента температуры по длине образца. Контроль за равномерностью температурного поля по длине образца при температурах до 2473 К осуществлялся тремя вольфрам-рениевыми термопарами типа ВР 5\20, при более высоких температурах (2473...3273 К) – с помощью инфракрасного пирометра INFRATHERM IGA-100.

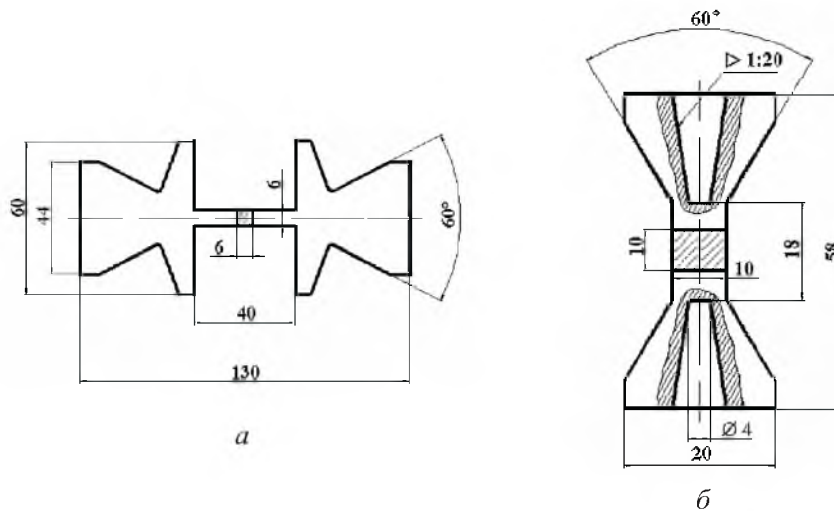


Рис. 1. Образцы для испытаний на растяжение (а) и сжатие (б).

Для измерения нагрузки использовался датчик усилия (диапазон измерения составлял 0,002...100 кН, допускаемая относительная погрешность – $\pm 1\%$). Удлинение рабочей зоны образца измерялось тензометром. Образец для испытаний на растяжение кроме захватных участков 1 имеет две пары крыльшек 2, по взаимному перемещению которых определяется перемещение рабочей зоны. Изменение расстояния между крыльшками в четырех точках (рис. 3,б) через четыре пары рычагов 4 с ножками из жаростойкой керамики 3 преобразуется в электрический сигнал с помощью тензодатчиков 5. Призмы устанавливались на одной линии с концом рабочей части образца, а расстояние между ними подбиралось так, чтобы по четырем точкам этой линии можно было определить пятую точку, находящуюся на оси симметрии образца в конце рабочей зоны. В каждый момент с помощью ЭВМ определялась форма линий выступов, в которую упираются призмы, и вычислялось перемещение этой точки. Использование схемы измерений с четырьмя независимыми каналами измерения перемещения позволяет существенно повысить достоверность получаемых данных о деформационных свойствах материала, исключить в процессе подготовки эксперимента перекос или несоосность образца и захватов, минимизировать их влияние и учитывать это при последующих расчетах.

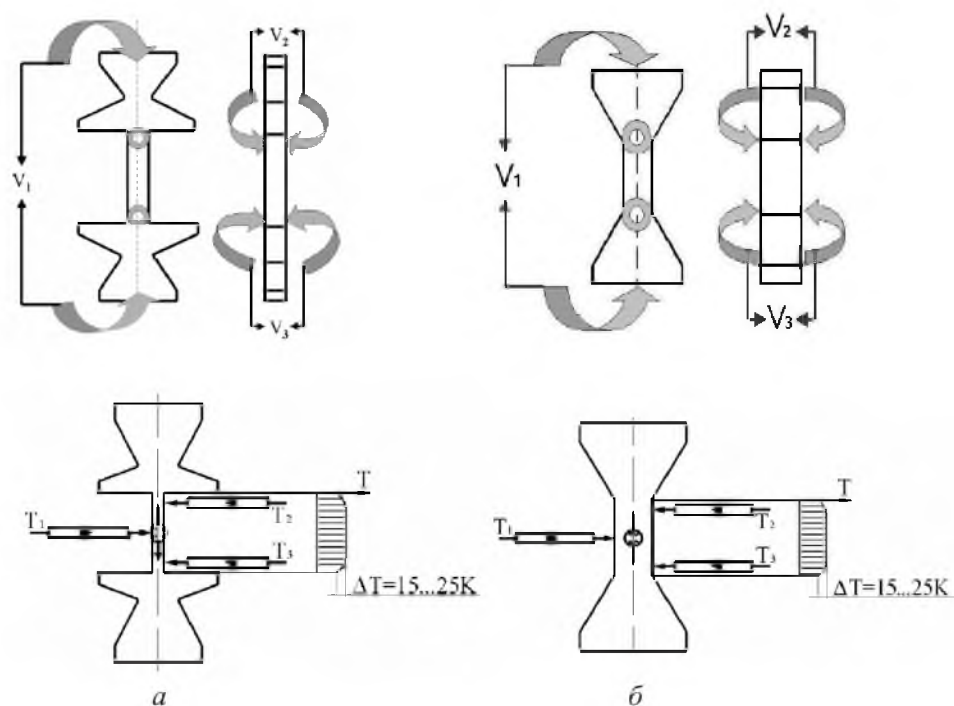


Рис. 2. Схема нагрева и измерения температуры образцов при растяжении (а) и сжатии (б).

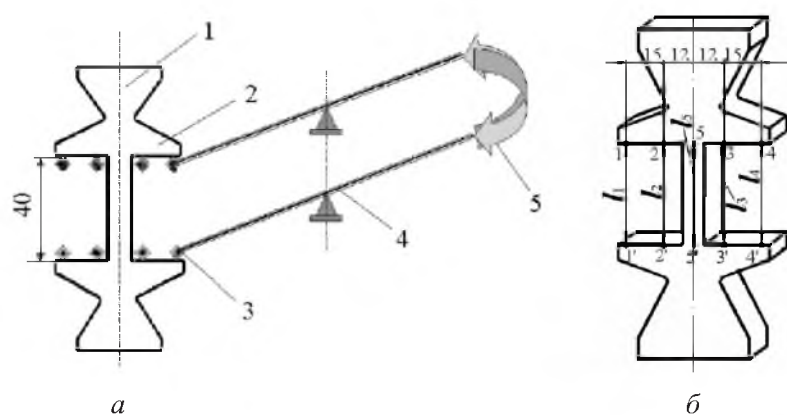


Рис. 3. Схема измерения деформации рабочей зоны при растяжении.

При сжатии (рис. 4) деформация образца *1* отслеживается с помощью изготовленных из материала последнего тонких штоков *2*, касающихся границ его рабочей части. Противоположные торцы штоков упираются в дно подпружиненных плунжеров *4*, соединенных с коромыслами *3*. Взаимное перемещение коромысел через рычаги *5* трансформируется в деформацию тензодатчиков *6*.

Точность измерения перемещения рабочей зоны образца при растяжении и сжатии в разработанном комплексе составила 0,1 мкм [3].

Исследовались образцы из УУКМ, наполненного углеродными волокнами в трех ортогональных направлениях. В качестве связующего использо-

валась фенолформальдегидная смола (ФФС), которой пропитывался материал. Затем проводилась карбонизация ФФС при $T = 1270$ К в инертной среде. При этом коксовый остаток составлял $\sim 40\%$, летучие элементы – $\sim 60\%$. Такая технологическая операция осуществлялась многократно с целью достижения 100%-ного коксового остатка по всему объему.

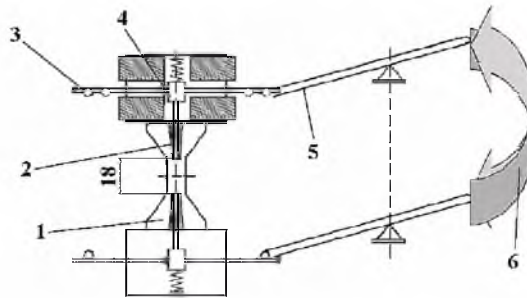


Рис. 4. Схема измерения деформации рабочей зоны при сжатии.

При проведении испытаний соблюдались следующие программы по механическому нагружению и нагреву. Для устранения люфтов вначале образец нагружался до 100 Н в условиях комнатной температуры. При скоростном нагреве образца программа нагружения корректировалась пропорционально увеличению его тепловой деформации. Данная коррекция проводилась исходя из отдельного эксперимента при нагреве методического образца. Благодаря этому в процессе нагрева поддерживалась нагрузка ~ 100 Н. По достижении заданной при испытаниях температуры осуществлялось активное нагружение образца со скоростью 12 мм/мин до его разрушения с поддержанием $T = \text{const}$.

С целью оценки влияния температуры на свойства УУКМ проводились испытания на растяжение и сжатие в среде аргона при температурах 293, 1773, 2273, 2473, 2773, 3073 и 3273 К. При каждой из этих температур испытывалось по пять образцов. Диаграммы деформирования УУКМ при растяжении и сжатии представлены на рис. 5.

Испытания на растяжение (рис. 5,а) показали, что при температуре 293 К диаграмма деформирования близка к линейной. При заданных значениях напряжений порядка ~ 70 МПа материал обладает высоким модулем упругости и небольшой деформацией при разрушении ($\sim 0,16\%$). В случае воздействия температуры в материале одновременно происходят конкурирующие процессы упрочнения (вследствие физико-химических превращений) и разупрочнения (накопление повреждений от теплового и механического нагружения). При разных уровнях температуры вклад каждого из процессов различен, поэтому общее поведение материала определяется соотношением между ними. Так, при $T = 1773$ К в результате упрочнения прочность УУКМ при разрушении увеличилась до ~ 110 МПа по сравнению с таковой при комнатной температуре. Заметно увеличились также деформационные характеристики – среднее значение деформации при разрушении составило $\sim 0,6\%$, т.е. в ~ 4 раза больше, чем при 293 К. С повышением температуры до 2273...2473 К происходит дальнейшее небольшое упрочнение (до

~ 125 МПа при 2473 К). Деформация при разрушении почти не изменилась и составила ~ 0,65%. Представляет интерес тот факт, что с повышением температуры растет нелинейность кривых деформирования, которая проявляется даже при небольших нагрузках (30...40% разрушающей). Это свидетельствует о начале накопления повреждений в материале.

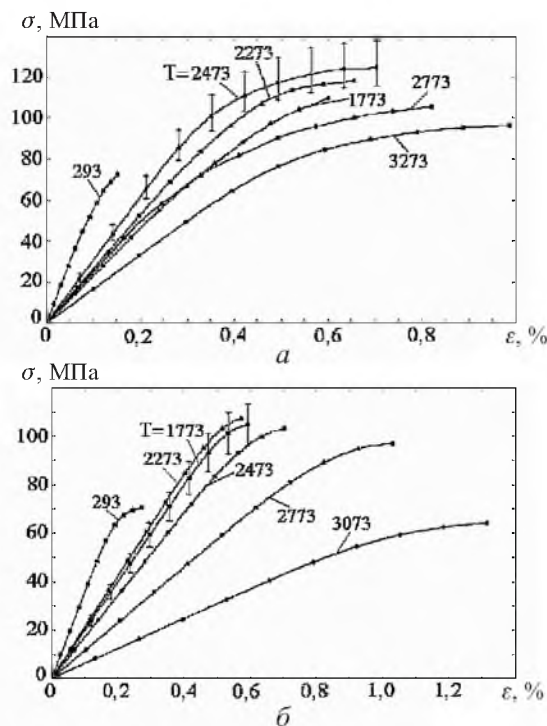


Рис. 5. Изменение диаграммы $\sigma - \varepsilon$ при растяжении (а) и сжатии (б) в зависимости от температуры.

В случае высоких температур (2773...3273 К) наблюдаются разупрочнение материала и увеличение деформационных характеристик. Так, при температурах 2773 и 3273 К прочность материала существенно снижается и составляет соответственно примерно 105 и 96 МПа, деформация при разрушении – соответственно ~ 0,8 и ~ 0,98%.

Аналогичная тенденция в поведении УУКМ имеет место в случае сжатия (рис. 5,б). При $T = 293$ К прочность при разрушении составляет примерно 70 МПа, деформация – ~ 0,25%. С повышением температуры до 1773 К прочностные характеристики увеличиваются до ~ 105 МПа, деформационные – до ~ 0,6%. При температурах 2273 и 2473 наблюдается дальнейший рост прочности (до 110 МПа), в то время как деформация почти не изменяется (0,65...0,75%). С повышением температуры отмечается резкое снижение прочностных и существенное увеличение деформационных характеристик. При температуре 2773 К прочность составила ~ 77 МПа, деформация – ~ 1,2%. Повышение температуры до 3073 К и выше приводит к изменению механизма разрушения путем потери устойчивости образцов, поэтому для более высоких температур испытания при сжатии не проводились.

На рис. 6 представлены зависимости разрушающего напряжения, деформации при разрушении и модуля упругости исследуемого материала от температуры, полученные по кривым деформирования.

Как видно, с качественной точки зрения материал при различных видах испытаний ведет себя одинаково.

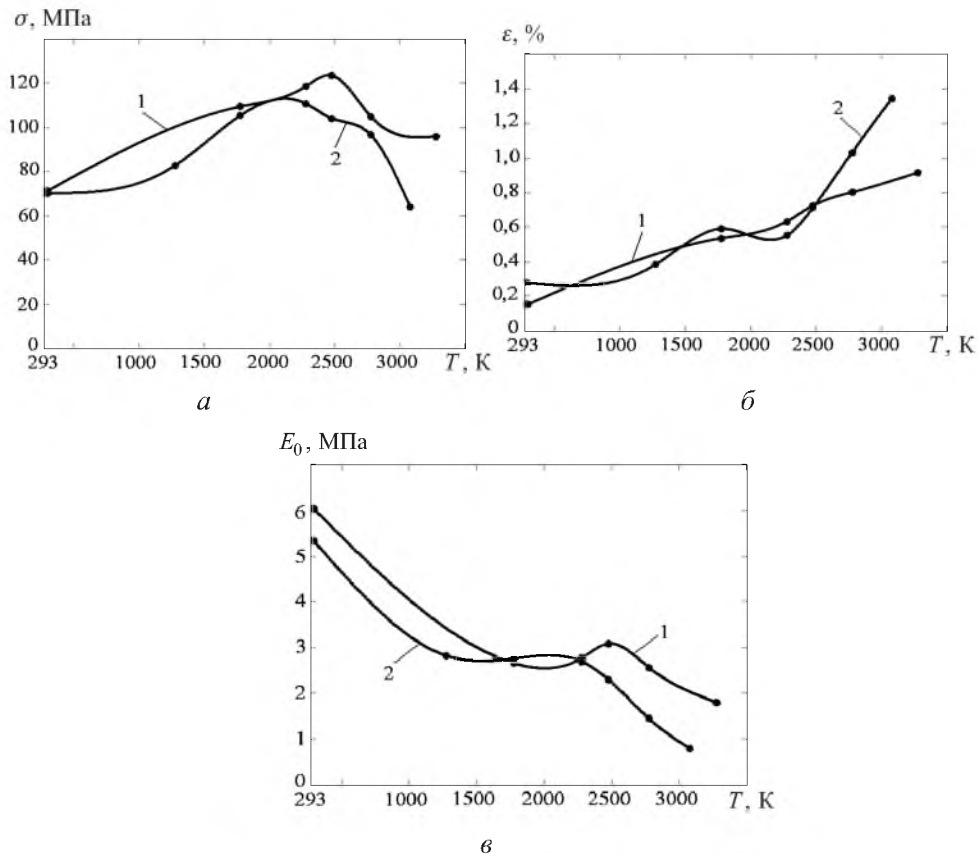


Рис. 6. Влияние температуры на разрушающее напряжение (а), деформацию при разрушении (б) и модуль упругости материала (в) при растяжении (1) и сжатии (2).

На рис. 7 и 8 представлены образцы после испытаний на растяжение и сжатие соответственно. Практически во всем диапазоне температур для обоих видов испытаний наблюдалось хрупкое разрушение. У большинства образцов как в случае растяжения, так и сжатия при температурах до 2473 К плоскость излома расположена перпендикулярно к оси образца. После растяжения (рис. 7) у образцов в зоне разрушения наблюдаются продольные нити, вытянутые на длину 1,5–6,0 мм в рабочей части. При этом чем выше температура, тем короче выступы. Несмотря на то что испытания проводились в инертной среде (аргон), при высоких температурах имеет место унос массы с поверхности образца и утонение его сечения. При растяжении образцов разрушение в основном происходило в рабочей части. В то же время при сжатии (рис. 8) часто разрушение отмечалось одновременно по обоим краям рабочей части образца.

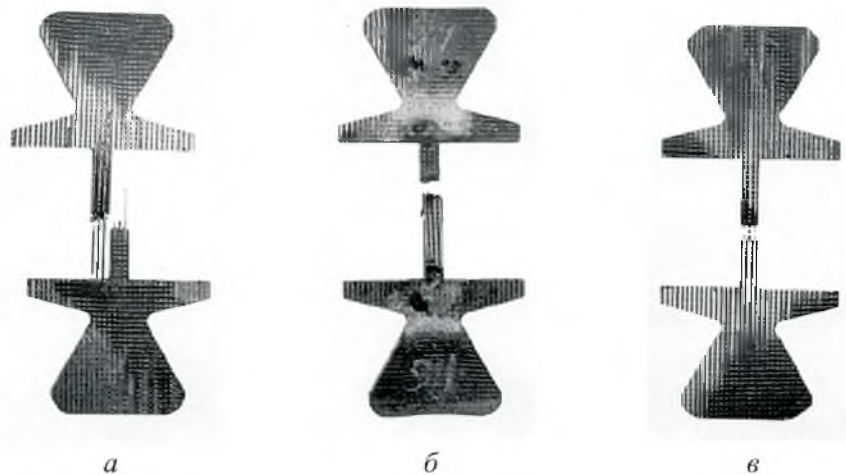


Рис. 7. Образцы после испытаний на растяжение при температурах 293 (а), 2273 (б) и 3273 К (в).

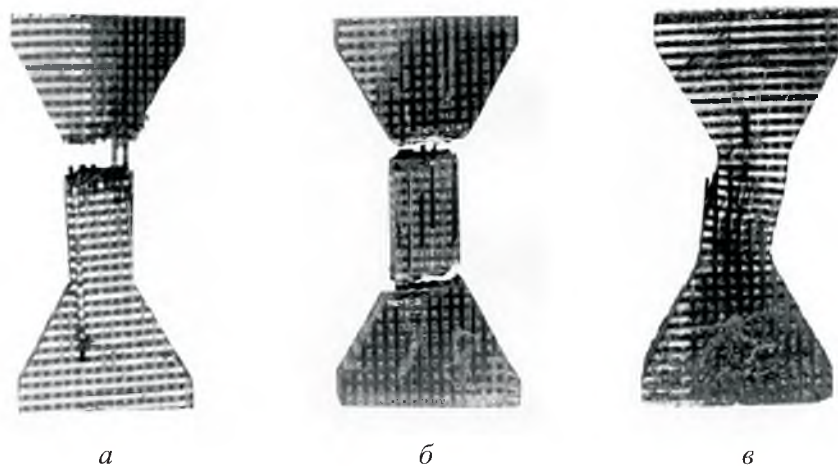


Рис. 8. Образцы после испытаний на сжатие при температурах 293 (а), 2273 (б) и 3073 К (в).

Резюме

Наведено результати дослідження впливу температури від 293 до 3300 К на міцність вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів при розтязі та стиску. Досліджено характер руйнування зразків у діапазоні температур 293...3300 К. Показано, що при розтязі і стиску мають місце якісно однакові зміни міцності матеріалу.

1. *Hatta Hiroshi, Aoi Tatsuji, Kawahara Itaru, et al.* Tensile strength of carbon/carbon composites // JSME Int. J. A. – 2003. – 46, № 3. – P. 290 – 296.
2. *Fajun Y., Jiecai H., and Shanyi D.* Опытное исследование механических свойств гибридных композитов углерод-углерод при сверхвысокой температуре // Реф. журн. – 2004. – № 3. – С. 22.

3. *Дзюба В. С., Окснюк С. В.* Установка для исследования прочности и долговечности композиционных материалов при программном тепловом и силовом нагружении в условиях температур до 3300 К // Пробл. прочности. – 2004. – № 5. – С. 113 – 116.
4. *Дзюба В. С., Высоцкий А. В., Зубик С. В.* Установка и методика для прочностных испытаний композиционных материалов при температурах до 3300 К // Пробл. прочности. – 1994. – № 9. – С. 86 – 90.
5. *Патент України № 2003098506*, МПК⁷ G01N1/00. Зразок для випробування композиційних матеріалів на міцність при розтягуванні в умовах високих температур / В. С. Дзюба, Л. В. Кравчук, В. А. Токарський, С. В. Окснюк. – Опубл. 15. 04. 2004, Бюл. № 4.
6. *Патент України № 2003087440*, МПК⁷ G01N1/00. Зразок для випробування неметалевих матеріалів осевими навантаженнями / В. С. Дзюба, Л. В. Кравчук, В. А. Токарський, С. В. Окснюк. – Опубл. 15. 03. 2004, Бюл. № 3.
7. *Патент Росії № 2003135341*, МПК⁷ G01N1/00. Образец для испытания неметаллических материалов осевыми нагрузками / В. С. Дзюба, Л. В. Кравчук, В. А. Токарський, С. В. Окснюк (Україна). – Опубл. 10. 04. 2004, Бюл. № 10.

Поступила 05. 08. 2004