

УДК 620.1.05

Гусенко А.Р.

КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ НАГРУЖЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ (ДО 3300 К)

Gusenko A.

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine (oleksandrhusenko@gmail.com)

### EFFECT OF LOADING RATE ON STRENGTH OF COMPOSITE MATERIALS AT HIGH TEMPERATURES (UP TO 3300 K)

*В общем случае деформирование и разрушение композиционного материала (КМ) зависят от условий нагружения во времени. При этом, на механические характеристики КМ оказывают существенное влияние не только температура, но и скорость приложения нагружения. В данной публикации рассматривается влияние скорости нагружения на прочность КМ при высоких температурах (до 3300К) в условиях испытаний образцов на растяжение. Приведены диаграммы напряжение-деформация по данным, полученным на образцах для различной скорости нагружения. Проведен анализ полученных результатов. Используя экспериментальные данные и термодинамический подход, прогнозируются диаграммы напряжение-деформация при других скоростях нагружения. Показано, что расхождение между экспериментом и расчетом не превышает 10%.*

*Ключевые слова:* композиционный материал; высокая температура; скорость нагружения; прочность; поврежденность.

#### Введение

Большое влияние на проявление свойств КМ оказывают скорость механического нагружения и температурное воздействие [1]. В зависимости от указанных обстоятельств механические свойства материалов проявляются по-разному. Механические характеристики КМ, полученные на разных установках при разных видах нагружения, могут отличаться значительно - до 30%. Для того, чтобы полученные экспериментальные результаты могли быть использованы при расчетах в условиях, отличных от эксперимента, необходимо разработать методику применения данных экспериментов в расчетах.

#### Цель

В данной работе ставится задача получения экспериментальных данных на растяжение в одном направлении ( $\sigma_1$ ) углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ) при высоких температурах (до 3300К) и разработка методики переноса результатов эксперимента на условия нагружения при разных скоростях.

#### Исследование

Для эффективного использования КМ очень важно получение достоверных сведений об их механических свойствах в условиях, максимально близких к эксплуатационным. Возникающие при этом трудности связаны с обеспечением точного измерения усилия и деформации рабочей зоны образца, необходимостью быстрого нагрева, а также поддержанием равномерного температурного поля образца по длине его рабочей части. В изложенных ниже материалах эксперименты проводятся при постоянной скорости нагрева 1000 град/сек. Для реализации поставленной задачи в Институте проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины разработан испытательный комплекс [2] для исследования термомеханических свойств углерод-углеродных композиционных материалов при растяжении, сжатии и кручении в условиях температур до 3300К в вакууме, окислительной или инертной средах.

В испытаниях на растяжение используется образец сложной формы [2] (Рис. 1) и методики, которые позволяют измерять усилия на образце и деформации его рабочей части при температурах до 3300К.

В нашем случае использовалась установка 1958У-10-1. Для измерения усилия используются четыре сменные динамометрические тензорезисторные измерители нагрузки, обеспечивающие регистрацию усилий в диапазоне 0,002...100 кН. Для устранения помех и шумов сигнал с датчиков проходит обработку с помощью модуля аналогового тензопреобразователя SCM5B38. Далее через АЦП платы А-812PG данные об усилии заводятся в ЭВМ. Точность измерения усилия составила  $\pm 1\%$ .

Перемещение активного захвата подвижной траверсы пропорционально числу импульсов датчика перемещения, установленного на двигателе. Предусмотрено 4 диапазона измерений. Импульсный сигнал преобразуется в аналоговый с напряжением 10В, а затем через цифровой входной модуль SCMD-MIDC5 и АЦП платы А-812PG поступает в ЭВМ. Этому сигналу в зависимости от устанавливаемого диапазона измерений соответствует 2 000, 10 000, 20 000 и 200000 импульсов. Один импульс соответствует 5 мкм перемещения траверсы.

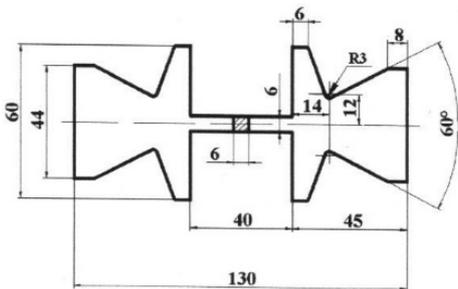


Рис. 1. Образец для испытаний на растяжение

величины накопленных повреждений в образцах при нагружениях зависят от их скоростей и температуры.

При воздействии температуры в материале одновременно происходят конкурирующие между собой процессы упрочнения (за счет физико-химических превращений) и разупрочнения (накопление повреждений от теплового и механического нагружений). При разных температурах вклад каждого из процессов различен, поэтому общее поведение материала определяется соотношением между ними.

При 1773 К в полной мере проявляется свойственное УУКМ для этого диапазона температур упрочнение. Разрушающее напряжение материала увеличилась до ~ 126 МПа (Рис. 3). При этом заметно выросли деформационные свойства - величина деформации при разрушении составила ~ 0,53 %, т.е. в ~ 4 раза больше, чем при  $T = 293$  К.

Увеличение температуры до 2273 К (Рис. 4) влечет за собой дальнейшее упрочнение до ~ 137 МПа. При этих температурах наблюдаются несущественные отличия прочности и деформационных свойств, что может свидетельствовать о стабильности физико-механических свойств УУКМ в этом диапазоне температур.

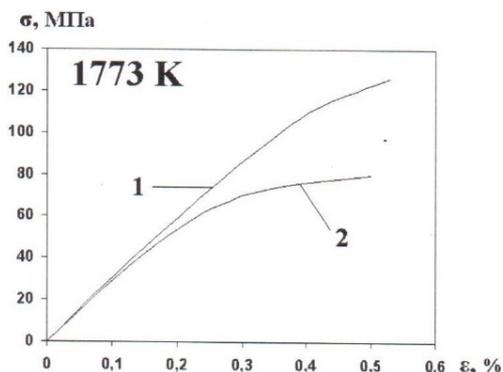


Рис. 3. зависимости "σ-ε" образцов из УУКМ при 1773 К

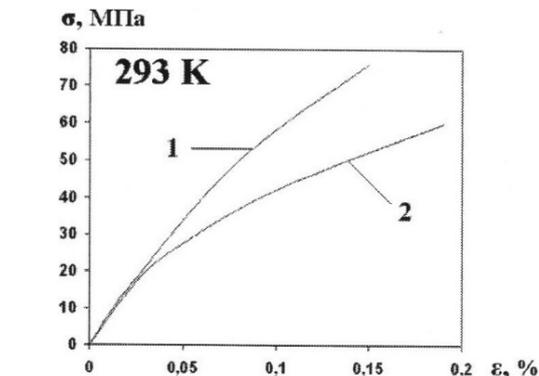


Рис. 2. зависимости "σ-ε" образцов из УУКМ при 293 К

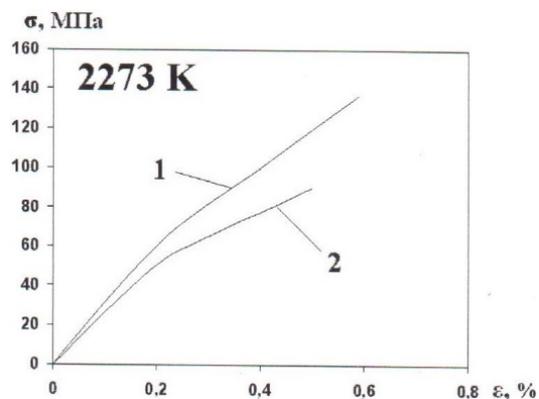


Рис. 4. зависимости "σ-ε" образцов из УУКМ при 2273 К

При более высоких температурах (2773 К, 3273 К) (Рис. 5, 6) наблюдается разупрочнение материала и увеличение деформации при разрушении. При температурах 2773 К и 3273 К разрушающее напряжение материала существенно уменьшая и составляет соответственно ~ 123 МПа и ~ 105 МПа, а деформация при разрушении - соответственно ~ 0.8 % и ~ 0.92 %.

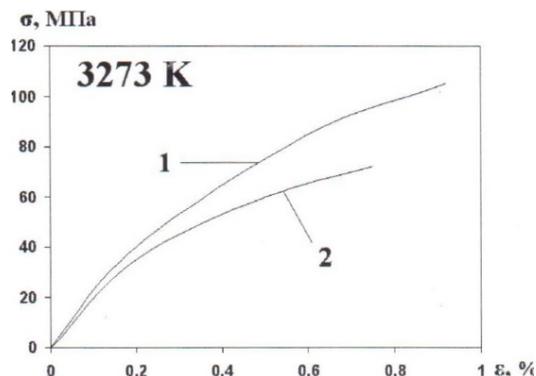
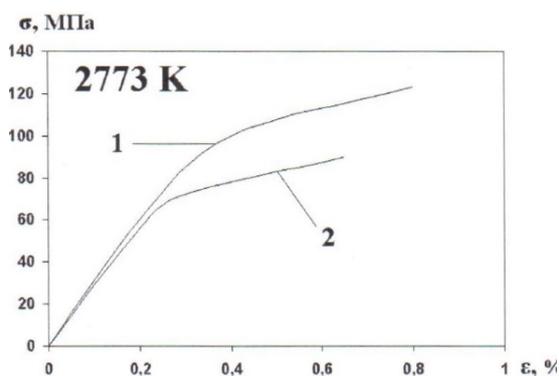


Рис. 5. залежності "σ-ε" образцов из УУКМ при 2773 К

Рис. 6. залежності "σ-ε" образцов из УУКМ при 3273 К

Из рисунков (3-6) по зависимости кривых деформирования от температуры и скорости нагружения видна общая тенденция упрочнения материала при повышении температуры до 2473 К, при которой прочность достигает своего максимума. Это связано с тем, что для УУКМ в диапазоне 1500 - 2300 К характерны фазовые превращения в материале, ведущие к образованию более плотных упаковок на уровне молекулярного строения. Для более высоких температур в большей мере проявляется накопление повреждений от теплового и механического нагружений, что, в конечном счете, вызывает снижение прочности на 22 % при 3273 К.

Ниже приводится методика расчета прочности УУКМ при разных скоростях нагружения, отличных от проводимых в эксперименте. Она заключается в том, что в соответствии со 2-м законом термодинамики  $S$  - энтропия – является функцией состояния.

$$\sum_{i=1}^n S_i = S_{пред.} \quad (1)$$

Уравнение (1) является уравнением состояния системы, где  $S_i$  - отдельные функции состояния системы, а  $S_{пред.}$  - предельное значение суммы этих функций.

Если обозначить  $\frac{S_i}{S_{пред.}} = L_i$ , то уравнение (1) может быть представлено так  $\sum_{i=1}^n L_i = 1$ , и может

изменяться  $0 < \sum_{i=1}^n L_i < 1$ . Для нашего случая, когда имеются механические нагрузки в системе, то  $L$  определяется из диаграммы "σ-ε" следующим образом:

$$S_i = \frac{\Delta Q}{T}, \quad (2)$$

$$S_{пред.} = \frac{Q_{сум.}}{T} \quad (3)$$

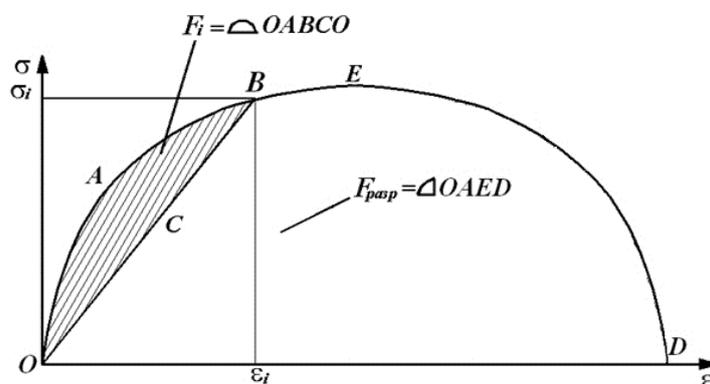


Рис. 7. Схематична діаграма деформування "σ-ε" яку положено в основі математичної моделі

Используя термодинамический подход [3] и формулу (4), определяем по данным испытаний образцов четыре коэффициента  $V_1; n_1; V_2; n_2$ . По этим значениям находим поврежденность [4] другого образца из этого материала при постоянной температуре и другой скорости нагружения.

Для математического описания поврежденности в рамках рассмотренного термодинамического подхода было предложено уравнение [5]:

$$L(\tau) = 1 - \left[ 1 - (r+1) \left[ B_1 [T(\tau)] \frac{\tau^{n_1 [T(\tau)]+1}}{n_1 [T(\tau)]+1} \int_0^\tau \left( \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} \right)^{n_1 [T(\tau)]+1} d\tau + B_2 [T(\tau)] \frac{\tau^{n_2 [T(\tau)]+2}}{n_2 [T(\tau)]+2} \int_0^\tau \left( \frac{\partial \sigma}{\partial \tau} \right)^{n_2 [T(\tau)]+1} d\tau \right] \right]^{\frac{1}{r+1}}, \quad (4)$$

где  $L$  - поврежденность материала,  $\sigma$  - напряжение,  $\tau$  - время.

Так как коэффициенты  $B_1$ ;  $n_1$ ;  $B_2$ ;  $n_2$  являются характеристиками поврежденное<sup>TM</sup> и константами материала при данной температуре, то их можно использовать при построении диаграмм "σ-ε" при других скоростях нагружения. Законы накопления повреждений в УУКМ могут быть определены с учетом физико-химических превращений в таких средах при высоких температурах используя диаграмму "σ-ε", тогда коэффициенты  $B_1$ ;  $n_1$ ;  $B_2$ ;  $n_2$  будут зависеть от температуры.

Ниже приводятся полученные для материала УУКМ коэффициенты при  $T = 293$  К по методике [5]:

$$r^M = 2; B_1^M = 1.373 \cdot 10^{-5}; n_1^M = 1.3; B_2^M = 2.086 \cdot 10^{-6}; n_2^M = 3.007$$

Подставляя эти значения в выражение (6), рассчитываем поврежденность  $L$  ( $0 < L < 1$ ) в каждый момент времени для нового образца УУКМ, у которого скорость механического нагружения составляет 10 МПа/с.

Зная поврежденность материала, рассчитываем и строим диаграмму "σ-ε" (на Рис. 7 кривая 2), так как найденные коэффициенты ( $B_1$ ;  $n_1$ ;  $B_2$ ;  $n_2$ ) являются одинаковыми для всех проведенных экспериментов.

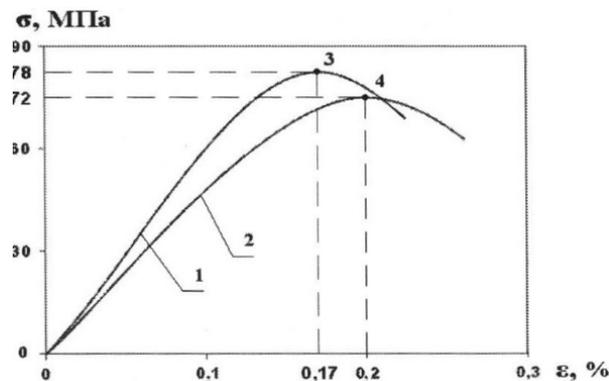


Рис. 8. Экспериментальная (1) и расчетная (2) диаграммы "σ-ε" для образцов из УУКМ на растяжение при  $T=293$ К и скорости нагружения 10 МПа/с.

На Рис. 8 представлены экспериментальная и расчетная (по формуле (4)) зависимости "σ-ε" для образца из УУКМ на растяжении при  $T = 293$ К. Сравнение этих зависимостей показывает, что они расположены близко. Максимальные значения по величине прочности (точки 3 и 4) [6] отличаются всего на ~ 10%. Эти результаты являются удовлетворительными.

### Выводы

Экспериментально показано влияние скорости нагружения на прочность образцов из УУКМ при растяжении. Приведена методика прогнозирования прочности УУКМ, учитывающая скорости нагружения. Расхождение между экспериментальной и расчетной зависимостями по величине прочности не превышает 10%.

**Анотація.** Вплив швидкості навантаження на міцність композиційних матеріалів при високих температурах (до 3300 К).

**Проблематика.** Залежно від зазначених обставин механічні властивості матеріалів проявляються по-різному. Механічні характеристики КМ, отримані на різних установках при різних видах навантаження, можуть відрізнятися значно - до 30%. Для того, щоб отримані експериментальні результати могли бути використані при розрахунках в умовах, відмінних від експерименту, необхідно розробити методику застосування даних експериментів в розрахунках.

**Цілі дослідження.** В роботі ставиться задача отримання експериментальних даних на розтяг в одному напрямку ( $\sigma_1$ ) вуглець-вуглецевого композиційного матеріалу (ВВКМ) при високих температурах (до 3300К) і розробка методики перенесення результатів експерименту на умови навантаження при різних швидкостях.

**Методика реалізації.** За допомогою термодинамічного підходу визначаємо механічні характеристики матеріалу і будемо діаграму розтягу "σ-ε".

Результати випробувань. За допомогою запропонованої методики побудовано розрахункову діаграму, яка відрізняється по міцності всього на 10%

Висновки. Експериментально показано вплив швидкості навантаження на міцність зразків з ВВКМ при розтязі. Наведено методику прогнозування міцності ВВКМ, що враховує швидкості навантаження.

Ключові слова: композиційний матеріал; висока температура; швидкість навантаження; міцність; пошкодженість.

**Abstract.** Effect of loading rate on strength of composite materials at high temperatures (up to 3300 K)

Purpose. Placed in the task of obtaining experimental data in tension in one direction ( $\sigma_1$ ) carbon-carbon composite material (VVKM) at high temperatures (up to 3300K) and develop methods of transferring the experimental results in terms of loading at different speeds

Design/methodology/approach. Using thermodynamic approach to determine the mechanical properties of the material and build tension chart " $\sigma$ - $\epsilon$ ".

Findings. With the proposed method estimated constructed diagram is different in strength by only 10%

Keywords: composite material; heat; loading rate; strength; load damage.

## References

1. Dimitrienko, J.I. (1997), *Mehanika kompozicionnyh materialov pri vysokih temperaturah* [Mechanics of composite materials at high temperatures], Mashinostroenie, Kiev, Ukraine.
2. Dzijuba, V.S. and Oksijuk, S.V. (2004), "Installation for research the strength and durability of composite materials at program thermal and power loading conditions in temperatures up to 3300 K", *Zhurnal "Problemy prochnosti"*, pp. 113-116.
3. Dzijuba, V.S. (1988), "The thermodynamic approach to estimating load capacity of the structural elements of composite materials", *Ukrainian National Conference on Mechanics and Technology of composite materials*, Sofija, Bulgaria.
4. Rabotnov, J.N. (1991), *Izbrannye trudy. Problemy mehaniki deformiruemogo tverdogo tela* [Selected works. The problems of solid mechanics], Nauka, Moscow, RU.
5. Dzijuba, V.S. and Kubchak, D.O. (2015), "Methods of predicting the strength of composite materials based on damageability", *Zhurnal "Problemy prochnosti"*, pp. 174-180.
6. Dzijuba, V.S. (2005), *Prochnost' materialov i konstrukcij*. Strength of Materials and Structures, in Troshhenko, V.T. (ed.), Akadempriodika, Kiev, Ukraine, pp. 929 - 992.

Подана до редакції 31.10.2016