

УДК 539.41

## РАСЧЕТНЫЕ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ПРОЧНОСТИ И ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕРМОПРОЧНОСТИ УГЛЕРОД–УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИЗОСТАТИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ УГЛЕРОДНЫХ МАТРИЦ

© 2019 г. А. А. Антанович<sup>1, \*</sup>, С. А. Колесников<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики высоких давлений имени Л.Ф. Верещагина Российской академии наук, Москва, Россия

<sup>2</sup>Акционерное общество “Научно-исследовательский институт конструкционных материалов на основе графита”, Москва, Россия

\*E-mail: antanov@hppi.troitsk.ru

Поступила в редакцию 10.01.2019 г.

После доработки 13.05.2019 г.

Принята к публикации 27.05.2019 г.

Приведены расчетные оценки прочности и термочности углерод-углеродных композиционных материалов, полученных при формировании углеродной матрицы методом карбонизации каменноугольного пека под высоким давлением. Полученные оценки сравнены с результатами прямо-сдаточного контроля серийно выпускаемых заготовок материала.

DOI: 10.1134/S0367676519100041

### ВВЕДЕНИЕ

Современные углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) находят все большее применение в составе огнеупорных конструкций. Уровень их механических характеристик, в первую очередь прочность и модуль упругости, существенно возрос [1, 2] благодаря эффективному способу формирования углеродной матрицы – изостатической карбонизации при давлениях до 100 МПа и температуре при этом до 750°C [3]. В результате достигается комплекс повышенных свойств: прочностные и упругие характеристики на уровне алюминиевых сплавов при жаростойкости конструкционных графитов. Изостатическая карбонизация композиций на основе каменноугольных пеков сопровождается образованием полиароматических углеводородов с высоким коксовым числом. Особенностью исполнения технологии при повышенных давлениях среды является проведение процесса карбонизации в сверхкритических условиях для образующихся углеводородов. При этом за счет изменения физического состояния углеводородного органического вещества формируются углеродные осадки (кокс) высокой плотности.

Ранее нами были опубликованы [4] экспериментальные данные по прочностным характеристикам УУКМ, основанные на анализе совокупности результатов контроля качества сотен серийно выпускаемых заготовок этого материала при изостатической технологии получения угле-

родных матриц. При этом многомерно армированные заготовки представляли собой толсто-стенные кольца, из которого механической обработкой изготавливались цельные изделия, а также образцы для исследования и контроля свойств материала. Общий вид одного типа изготовленных деталей показан на рис. 1. Схема армирования заготовки хорошо выражена после ее механической обработки.

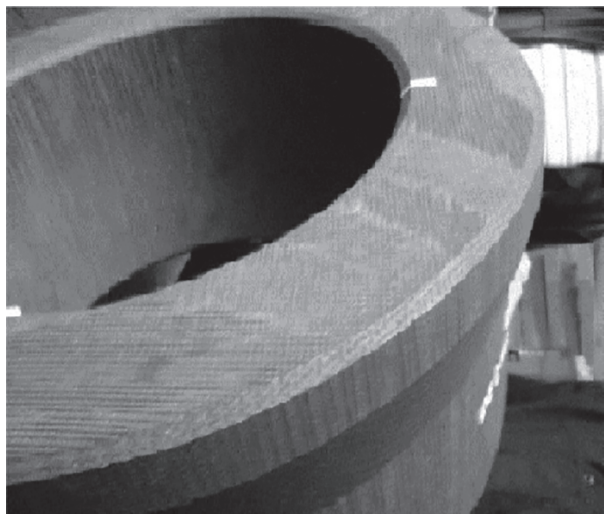


Рис. 1. Крупногабаритная заготовка из трехмерно армированного УУКМ.

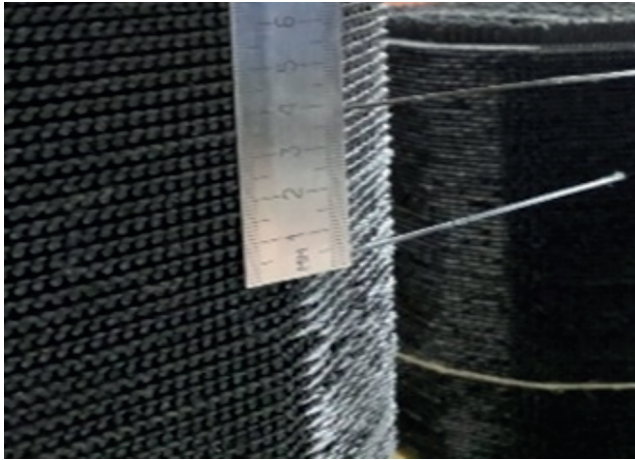


Рис. 2. Каркас УУКМ из стержней армирования.

Наряду с экспериментальными исследованиями свойств УУКМ представляет интерес проведение расчетных оценок этих свойств и сравнение их с фактическими данными. В настоящей работе такой подход рассмотрен на примерах определения прочности при растяжении и термопрочности трехмерно армированного УУКМ.

### ОЦЕНКА УРОВНЯ ПРОЧНОСТИ ПРИ РАСТЯЖЕНИИ УУКМ ТРЕХМЕРНОГО АРМИРОВАНИЯ

Исследуемый материал можно рассматривать как композицию из одномерно армированных углеродных стержней, скрепленных углеродной матрицей. В рассматриваемом случае углеродные стержни были изготовлены из углеродной нити УКН-5000, а углеродная матрица получена высокотемпературной обработкой каменноугольного пека. Прочностные характеристики такого материала должны быть основаны на суммировании прочности стержней при их эффективном соединении матрицей.

Для расчетной оценки прочности композиционного материала из исходных данных по прочности стержней армирования объемной структуры

Таблица 1. Прочностные свойства углерод–углеродных стержней при растяжении

№ образца	Модуль упругости, ГПа	Прочность, МПа	Предельная деформация, %
1	172	733	0,27
2	190	640	0,22
3	171	695	0,26
4	200	760	0,25
5	147	607	0,37
Среднее	176	687	0,27

экспериментально была определена прочность при растяжении однонаправленных стержней с углеродной матрицей. При этом стержни уплотняли коксом каменноугольного пека по общей с композиционным материалом технологии. Длина изготовленных стержней до 200 мм, диаметр до 1.2 мм. Кажущаяся плотность стержней  $\sim 1.84 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ . Длина стержней выбрана достаточной для эффективного “захвата” в заделке для исключения их вытягивания при испытаниях. Расчетное объемное содержание филаментов углеродного волокна в стержне составило  $\sim 0.4$ . Стержни деформировали упруго вплоть до момента разрыва.

Результаты испытания стержней при их растяжении приведены в табл. 1. Как видно из таблицы, среднее экспериментальное значение прочности композитного стержня заметно меньше величины известной прочности филамента этого типа углеродного волокна ( $\sim 3700$  МПа). Основной причиной относительно невысокого уровня реализации прочности углеродного волокна в углеродной матрице является высокая дискретность последней (разные виды пор и микротрещин термического происхождения) [5].

На рис. 2 представлен общий вид каркаса армирования на этапе его сборки из стержней. Как видно, каркас представляет собой достаточно пористую структуру. Объемное содержание углеродных стержней в каркасе и, соответственно, в композите  $V \cong 0.59\text{--}0.61$ . Тогда в направлениях армирования ожидаемую прочность композита можно вычислить по формуле

$$\sigma_{\text{комп}} = \frac{\sigma_{\text{ст}} V}{3}.$$

Поэтому при прочности стержня  $\sigma_{\text{ст}} \sim 687$  МПа ожидаемая прочность композита в каждом из трех направлений армирования, без учета прочности углеродной матрицы, составит  $\sim 135\text{--}140$  МПа. Вклад углеродной матрицы может составить дополнительную величину  $\sim 10$  МПа в пределах прочности при растяжении конструкционного графита и тем самым влиять на дисперсию результатов.

Для оценки вклада углеродной матрицы в уровень прочности композита экспериментально определили адгезионную прочность связи на границе стержень–углеродная матрица. Для этого наблюдали вытяжку стержней из общего объема материала при растяжении образцов с длиной галтели в зоне “захвата”  $\sim 20$  мм. Для локализации вытяжки с одной стороны образцов последние изготовили с несимметричными формами галтелей. Фотография шести образцов после испытаний приведена на рис. 3. Оценку адгезионной прочности ( $\tau_{\text{адг}}$ ) проводили из равенства ка-

сательных и нормальных напряжений для стержня по формуле

$$\tau_{адг} = \frac{P}{Sn},$$

где  $P$  – нагрузка начала вытягивания стержней;  $S$  – боковая поверхность армирующего стержня на высоте галтели;  $n$  – количество стержней, вытянутых из галтели.

Результаты оценки адгезионной прочности УУКМ, представлены в табл. 2. В итоге прочность композита с учетом вклада адгезионной прочности составит ~144–148 МПа.

На рис. 4 приведены статистические данные по реализуемой прочности УУКМ трехмерного армирования за отдельный непрерывный период изготовления. Среднее значение прочности при растяжении по 28 изготовленным заготовкам составило 146.7 МПа, что хорошо согласуется с расчетной оценкой.

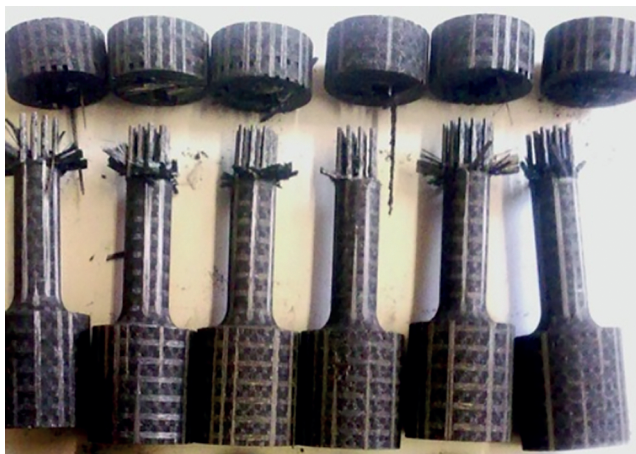


Рис. 3. Образцы УУКМ после испытаний на адгезионную прочность.

Таблица 2. Адгезионная прочность УУКМ при растяжении МПа

№ образца	$P$ , кг	$n$ , ед.	$S$ , см <sup>2</sup>	$\tau_{адг}$ , МПа
1	485	13	5.10	9.32
2	457	13	5.10	8.78
3	369	11	4.32	8.37
4	476	13	5.10	9.33
5	415	12	4.71	8.64
6	325	11	4.31	7.55
Среднее по 6 образцам				8.67

### ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ УРОВНЯ ТЕРМОПРОЧНОСТИ УУКМ ТРЕХМЕРНОГО АРМИРОВАНИЯ

В настоящей работе проведено численное исследование формирования уровня термочности УУКМ трехмерного армирования. Любые формы критериев термостойкости являются формой записи оценки запаса прочности  $k$ , являющегося отношением предела прочности при растяжении  $\sigma$  к действующим термическим напряжениям:

$$k = \frac{\sigma(1-\nu)\lambda}{\alpha\Delta TE},$$

где  $\sigma$  – предел прочности;  $\alpha$  – коэффициент линейного термического расширения;  $E$  – модуль упругости;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\nu$  – коэффициент Пуассона.

Наиболее известен в практическом использовании для стационарных условий эксплуатации материала критерий Кинджери [6]:

$$R = \frac{\sigma\lambda}{\alpha E}.$$

В настоящей работе с целью материаловедческого обоснования оптимальных границ техноло-

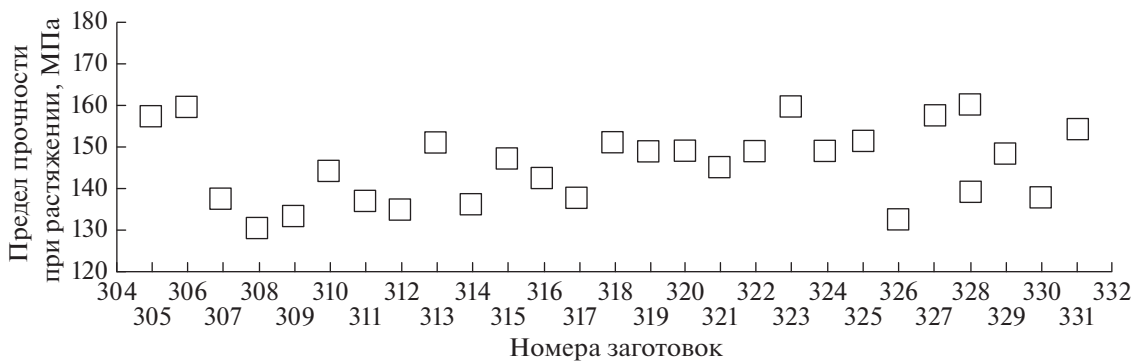


Рис. 4. Статистические данные по реализуемой прочности УУКМ трехмерного армирования за отдельный период изготовления.

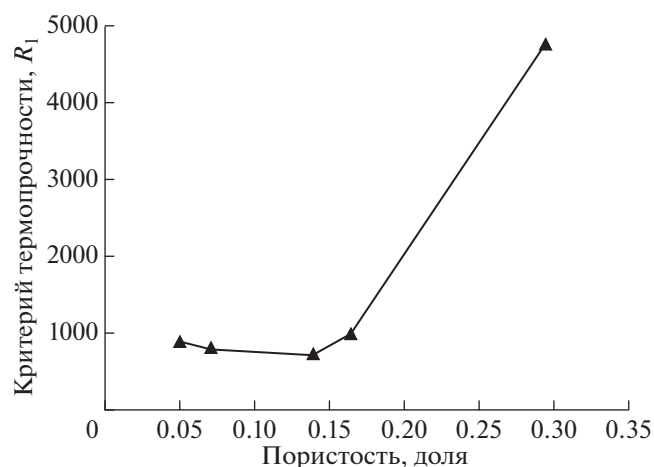
**Таблица 3.** Зависимость прочностных свойств УУКМ от пористости

Свойства	Пористость, доля				
	0.295	0.165	0.140	0.072	0.05
$\rho$ , г · см <sup>-3</sup>	1.46	1.73	1.78	1.92	—
$\sigma$ , МПа	18.6	85	94	114	141
$E$ , ГПа	1.3	28.6	44	48	53
$R_l$	4769	991	712	791	887

гического процесса применили облик критерия Кинджери в упрощенном виде:

$$R_l = \frac{\sigma}{\alpha E}.$$

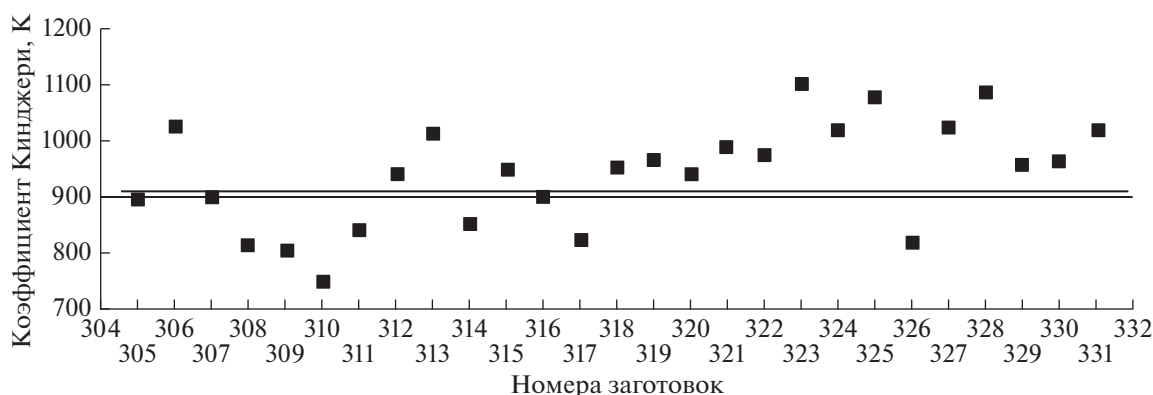
Критерий термочности в настоящем виде введен в прямо-сдаточную документацию трех-

**Рис. 5.** Зависимость критерия термочности УУКМ от пористости.

мерно армированного УУКМ при выпуске деталей, общий вид которых представлен на рис. 1. В производстве УУКМ уплотнение материала производят в процессе нескольких (обычно до пяти) последовательных этапов изостатической карбонизации и последующей высокотемпературной обработке, в результате чего пористость материала в долях снижается от  $\sim 0.3$  после первого этапа уплотнения до  $\sim 0.05$  после заключительного этапа. Для численного анализа поведения величины критерия  $R_l$  были использованы представленные в табл. 3 экспериментальные данные по прочностным свойствам УУКМ при растяжении в зависимости от пористости. Коэффициент термического линейного расширения  $\alpha$  для УУКМ практически не зависит от пористости. Это объясняется тем, что в высокомодульных композитах этот коэффициент практически совпадает с коэффициентом для армирующего углеродного волокна, а оно, как известно, не расширяется само и столь жесткое, что удерживает весь композит от расширения. Поэтому в численных расчетах была принята величина  $\alpha$ , равная  $3.0 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ .

Результаты численного исследования зависимости величин критерия термочности от величины пористости трехмерно армированного УУКМ приведены в последней строке табл. 3 и на рис. 5.

В области высокой пористости материала его модуль упругости относительно мал, и это является основной причиной высоких показателей условного критерия термической прочностности. При уменьшении пористости до  $\sim 0.14$  модуль упругости практически достигает предела роста, что свидетельствует о практически полном включении структурных элементов материала в восприятие и перераспределение внешней нагрузки. Можно считать, что уровень пористости  $\sim 0.14$  и соответствующий ему уровень плотности  $\sim 1.8 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$  являются границами, начиная с которых УУКМ может выполнять функции конструкционного мате-

**Рис. 6.** Результаты прямо-сдаточного контроля параметра термочности заготовок УУКМ.



риала. При той же пористости  $\sim 0.14$  прекращается падение и начинается рост критерия термпрочности, что свидетельствует о достижении границы стабильной эксплуатации огнеупорных деталей из УУКМ.

В практике производства сдаточный параметр коэффициента термпрочности за отдельный период представлен на рис. 6.

#### ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показана хорошая предсказуемость прочностных свойств трехмерно армированного УУКМ, рассчитанных из экспериментальных данных по прочности материала армирования.

2. Определено граничное значение плотности УУКМ  $1.8 \text{ г} \cdot \text{см}^{-3}$ , при котором одновременно достигаются надежная термостойкость материала и его прочностные свойства, обеспечивающие ис-

пользование материала в конструкционных огнеупорных изделиях.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Проценко А.К., Колесников С.А.* Научно-исследовательскому институту конструкционных материалов на основе графита – 55 лет. Сб. ст. М.: Научные технологии, 2015. С. 31.
2. *Антанович А.А., Колесников С.А.* Персп. мат. и технол. Т. 1. Витебск: УО “ВГТУ”, 2017. 467 с.
3. *Weber G.W., Young K.R., Taylor A.J., Curci T.J.* // 13th Bien. Conf. Carbon. (Irvine, 1977). P. 68.
4. *Антанович А.А., Колесников С.А.* // Сб. мат. 60-й междунар. науч. конф. “Акт. пробл. прочности”. (Витебск, 2018). Т. 1. С. 42.
5. *Колесников С.А.* // Мех. полимеров. 1978. № 3. С. 387.
6. *Кинджери В.Д.* Измерения при высоких температурах. М.: Металургиздат, 1963. 466 с.