

## Несущая способность и эрозионная стойкость углеродных композиционных материалов в конвективном тепловом потоке

Э. А. Эскин<sup>а</sup>, В. К. Федчук<sup>а</sup>, А. С. Петров<sup>б</sup>

<sup>а</sup> Институт проблем прочности НАН Украины, Киев, Украина

<sup>б</sup> Министерство энергетики Украины, Киев, Украина

*Представлены результаты исследования закономерностей изменения несущей способности и эрозионной стойкости углерод-углеродных композиционных материалов как с чисто углеродной, так и с боросилицированной матрицей в условиях одностороннего нагрева потоком воздушной плазмы. Дана сравнительная оценка изучаемых характеристик нескольких типов углеродных композиционных материалов. Определена степень влияния боросилицирования углерод-углеродных композиционных материалов на их работоспособность при эксплуатации в конвективных потоках.*

**Ключевые слова:** несущая способность, деформативность, эрозионная стойкость, углерод-углеродные композиционные материалы, боросилицирование.

В аэрокосмической технике все более широко применяются углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ). Эти материалы имеют относительно небольшой удельный вес, обладают высокой прочностью и эрозионной стойкостью при работе в высокотемпературных газовых потоках и рядом других характеристик, что позволяет их использовать при изготовлении деталей и узлов конструкций, эксплуатируемых в условиях высоких тепловых нагрузок.

Существенным недостатком УУКМ является то, что при воздействии окислительной среды их работоспособность практически ограничена температурой 500°C вследствие окисления как углеродного наполнителя, так и углеродной матрицы. Можно незначительно повысить окислительную стойкость материалов путем термообработки при 2000...3000°C в инертной среде.

Более эффективными средствами защиты от окисления служат покрытие или пропитка материалов пиролитическим углеродом, карбидом кремния, силицирование, боросилицирование или нанесение окислов тугоплавких металлов [1, 2].

Одним из типов таких материалов, предназначенных для эксплуатации в высокотемпературных газовых потоках, содержащих кислород, являются боросилицированные УУКМ. Они представляют собой материалы на основе объемно-армированных графитизированных наполнителей и углеродной матрицы – прококсованного связующего и пироуглерода, полученного из газовой фазы при разложении углеводородов. Защита от окисления создается в процессе боросилицирования при высокой температуре [3].

Цель настоящей работы – исследование несущей способности и эрозионной стойкости боросилицированных УУКМ при одностороннем нагреве потоком воздушной плазмы с удельным тепловым потоком  $q = 550 \text{ кВт/м}^2$ , моделирующим условия их эксплуатации в составе изделий аэрокосмической техники.

Исследовались свойства обеих композиций, содержащих до 80% карбидной фазы сложного состава – SiC(B) и SiB(C), а также некоторое количество свободного непрореагировавшего кремния.

Объемное армирование изучаемых УУКМ проводилось как путем прошивки слоев однослойной ткани ТКК-2 с пирокарбидным покрытием (композиция 1), так и путем использования объемного наполнителя на основе многослойной ткани Урал-Н-24/3 (композиция 2).

Испытания проводили на установке, разработанной в Институте проблем прочности НАН Украины на базе линейного плазматрона [4]. Установка позволяет в лабораторных условиях определять прочностные характеристики и несущую способность элементов конструкций, работающих в условиях одностороннего конвективного нагрева, при моделировании факторов, наиболее ответственных за разупрочнение материалов. К ним в первую очередь относятся величина и время воздействия теплового потока, а также его химический состав. Моделирование теплового состояния материала осуществляется потоком низкотемпературной плазмы, получаемой с помощью линейного плазматрона, при граничных условиях как первого, так и второго рода, а химического состава среды – путем использования в качестве рабочего тела различных газов и их смесей.

Несущую способность (прочность и деформативность) композиций 1, 2 исследовали при одностороннем нагреве в условиях четырехточечного изгиба и растяжения. Время нагрева составляло 20 мин, по истечении которого проводилось силовое нагружение образцов вплоть до их разрушения с записью диаграмм деформирования [4].

Несущую способность материалов определяли по значениям пределов прочности и разрушающей деформации. Правомочность такой оценки несущей способности боросилицированных УУКМ при одностороннем нагреве подтверждается тем, что формирование температурного градиента (нестационарный период нагрева) в материале образцов происходит в первые 1–3 минуты, по мере дальнейшего воздействия теплового потока температурное поле по его сечению стабилизируется, разница температур нагреваемой и тыльной поверхности не превышает к 10-й минуте 50...70°C, т.е. по длине образца устанавливается однородное температурное поле. Кроме того, после воздействия теплового потока линейный и массовый унос композиций 1, 2 практически отсутствует. Исследование структуры разрушенных материалов показало отсутствие физико-химических превращений.

Результаты определения несущей способности образцов, вырезанных из композиций 1, 2 при одностороннем нагреве в условиях изгиба и растяжения, представлены на рис. 1, 2.

Анализ приведенных данных показывает, что прочностные характеристики исследуемых материалов при изгибе изменяются незначительно (табл. 1). Так, условный предел прочности композиции 1 увеличивается с 69 МПа в исходном состоянии до 71,5 МПа (на 4%) после 20 минут одностороннего нагрева, т.е. в пределах разброса экспериментальных данных. Деформативность композиции 2 при нагреве уменьшается, а композиции 1 остается без изменений.

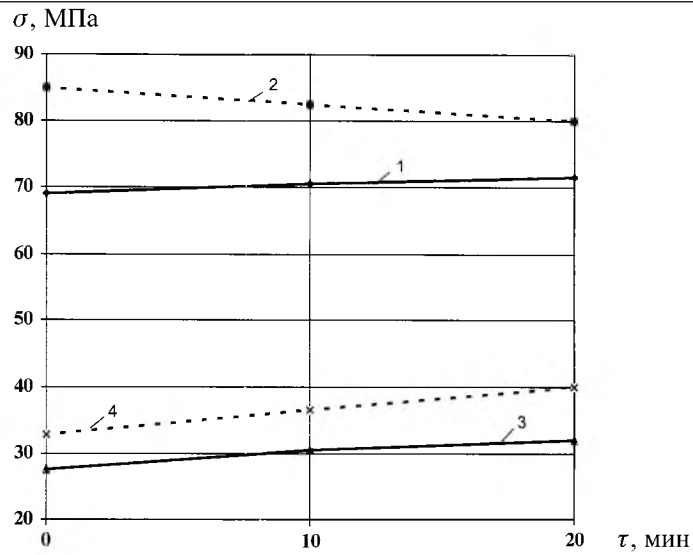


Рис. 1. Изменение прочности композиции 1 (сплошные линии) и 2 (штриховые линии) при изгибе (1, 2) и растяжении (3, 4) в условиях одностороннего нагрева.

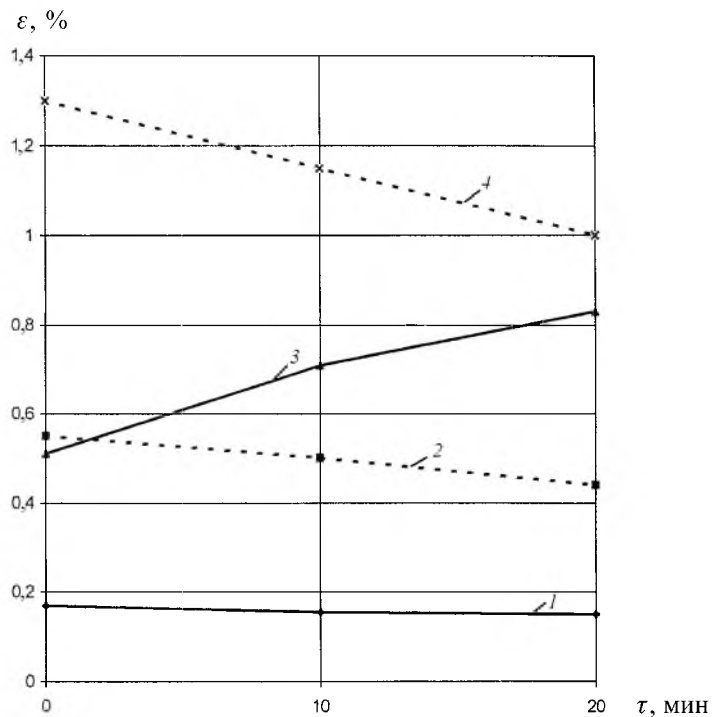


Рис. 2. Изменение предельных деформаций композиции 1 (сплошные линии) и 2 (штриховые линии) при изгибе (1, 2) и растяжении (3, 4) в условиях одностороннего нагрева.

Поведение образцов композиций 1, 2 при испытаниях в условиях растяжения и одностороннего нагрева несколько отличается. Просматривается тенденция увеличения значений условного предела прочности боросилицированных УУКМ. Если предел прочности композиции 1 после нагрева при

изгибе повысился на 3,2% по сравнению с исходным значением, то при растяжении – на 13,75%, композиции 2 – соответственно на 6,25 и 18%. Значения разрушающих деформаций композиции 1 увеличиваются, композиции 2 – уменьшаются.

Т а б л и ц а 1

**Изменение прочности и деформативности композиций 1 и 2 при изгибе и растяжении в условиях одностороннего нагрева потоком воздушной плазмы**

Условия испытаний	Изгиб			Растяжение		
	$M_{\text{ср}}$ , Н·мм	$\sigma_{\text{ср}}$ , МПа	$\varepsilon_{\text{ср}}$ , %	$P_{\text{ср}}$ , Н	$\sigma_{\text{ср}}$ , МПа	$\varepsilon_{\text{ср}}$ , %
$T = 20^{\circ}\text{C}$ (исходное состояние)	5050	69,0	0,17	1590	27,6	0,51
	7740	85,0	0,55	1780	32,8	1,30
$q = 550 \text{ кВт/м}^2$ , $\tau = 20 \text{ мин}$	4860	71,5	0,15	1880	32,0	0,83
	7240	80,0	0,44	2360	40,0	1,00

**Примечание.** Над чертой приведены данные для композиции 1, под чертой – для композиции 2. Здесь и в табл. 2:  $M_{\text{ср}}$  – изгибающий момент;  $P_{\text{ср}}$  – разрушающая нагрузка;  $\sigma_{\text{ср}}$  – условный предел прочности;  $\varepsilon_{\text{ср}}$  – деформация при разрыве.

В реальных условиях эксплуатации в составе изделий аэрокосмической техники испытываемые боросилицированные УУКМ подвергаются также воздействию низких температур. Поэтому проведены исследования по оценке влияния предварительного охлаждения на несущую способность обеих исследуемых композиций. Методически это осуществлялось следующим образом. Исследуемые образцы охлаждались парами жидкого азота до температуры  $-130^{\circ}\text{C}$  с последующей выдержкой при этой температуре в течение 20 мин. Охлажденные таким образом образцы подвергались одностороннему нагреву потоком воздушной плазмы в течение 0,5; 1; 8; 12 и 20 мин, после чего разрушались. Величина удельного теплового потока, как и в предыдущих исследованиях, составляла  $550 \text{ кВт/м}^2$ . Результаты испытаний (табл. 2) показывают, что несущая способность материалов при изгибе существенно отличается. Так, если при воздействии низких температур и последующем одностороннем нагреве условный предел прочности композиции 2 практически не изменяется (остается на уровне значений в исходном состоянии), то аналогичная характеристика композиции 1 уменьшается на 24,3%.

Причем наибольшее снижение прочности при изгибе наблюдается к концу первой минуты нагрева и составляет 44,3% исходной. Это можно объяснить тем, что в первую минуту нагрева в материале образуется значительный градиент температур по сечению образца. Существенная неоднородность температурного поля приводит к большим термическим напряжениям, которые снижают несущую способность образцов. При дальнейшем нагреве градиент температур, а следовательно, и термические напряжения уменьшаются. Это приводит к увеличению значений условного предела прочности после восьмой минуты нагрева до 56,2 МПа. Далее возрастает влияние временного фактора. Несущая способность композиции 1 опять уменьшается и после 20-й минуты нагрева составляет 75,6% исходной.

Деформативность композиции 1 повышается по сравнению с исходной на 26%, в то время как деформативность композиции 2 уменьшается на 32,74%.

Т а б л и ц а 2

**Изменение прочности и деформативности боросилицированных композиций 1, 2 при изгибе и растяжении в условиях одностороннего нагрева потоком воздушной плазмы с учетом предварительного охлаждения**

Условия испытаний	Изгиб			Растяжение		
	$M_{ср},$ Н·мм	$\sigma_{ср},$ МПа	$\varepsilon_{ср},$ %	$P_{ср},$ Н	$\sigma_{ср},$ МПа	$\varepsilon_{ср},$ %
Композиция 1						
$T = 20^{\circ}\text{C}$ (исходное состояние)	5050	69,0	0,17	1590	27,6	0,510
$T = -130^{\circ}\text{C}, \tau = 20$ мин	4000	49,0	0,16	1410	24,4	0,851
$T = -130^{\circ}\text{C}, \tau = 20$ мин $q = 550$ кВт/м <sup>2</sup> , $\tau = 1$ мин	3100	38,5	0,11	–	–	–
$T = -130^{\circ}\text{C}, \tau = 20$ мин $q = 550$ кВт/м <sup>2</sup> , $\tau = 8$ мин	4500	56,2	0,22	–	–	–
$T = -130^{\circ}\text{C}, \tau = 20$ мин $q = 550$ кВт/м <sup>2</sup> , $\tau = 12$ мин	3980	52,7	0,26	–	–	–
$T = -130^{\circ}\text{C}, \tau = 20$ мин $q = 550$ кВт/м <sup>2</sup> , $\tau = 20$ мин	3600	52,2	0,23	1490	26,8	0,460
Композиция 2						
$T = 20^{\circ}\text{C}$ (исходное состояние)	7740	85,0	0,55	1788	32,8	1,300
$T = -130^{\circ}\text{C}, \tau = 20$ мин	7190	82,6	0,42	1793	27,7	1,120
$T = -130^{\circ}\text{C}, \tau = 20$ мин $q = 550$ кВт/м <sup>2</sup> , $\tau = 0,5$ мин	7270	81,6	0,34	–	–	–
$T = -130^{\circ}\text{C}, \tau = 20$ мин $q = 550$ кВт/м <sup>2</sup> , $\tau = 1$ мин	8510	87,0	0,40	–	–	–
$T = -130^{\circ}\text{C}, \tau = 20$ мин $q = 550$ кВт/м <sup>2</sup> , $\tau = 20$ мин	7950	82,6	0,37	1760	34,2	0,720

Прочность композиций 1 и 2 при растяжении в условиях воздействия низких температур уменьшается соответственно на 11,45 и 15,44%, при последующем нагреве она повышается до исходного значения.

Эрозионную стойкость УУКМ изучали при обдуве образцов струей воздушной плазмы с удельным тепловым потоком  $q = 550$  кВт/м<sup>2</sup>, соответствующим реальным условиям эксплуатации. Объектами испытаний служили образцы четырех типов УУКМ:

на основе ткани ТКК-2 и фенольно-формальдегидной смолы марки БСЛ;

на основе ткани Урал-Н-24/3 и фенольно-формальдегидно-фурфурольной смолы марки ФН;

боросилицированный на основе ткани ТКК-2;

боросилицированный на основе ткани Урал-Н-24/3.

В процессе эксперимента фиксировалось изменение веса и линейных размеров образцов. Скорость линейного уноса  $V$  образцов исследуемых материалов определялась изменением высоты образца в течение теплового воздействия. Одновременно определялась величина массового уноса (%) как отношение изменения веса в процессе нагрева к первоначальному весу образца. Результаты исследований эрозионной стойкости УУКМ приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

**Эрозионная стойкость исследуемых материалов при одностороннем нагреве потоком воздушной плазмы**

Состав материала, %	Объемный вес, г/см <sup>3</sup>	Продолжительность воздействия потока, мин	Массовый унос, %	Линейный унос, мм/с
Ткань ТКК-2 (60%) + БСЛ (40%)	1,060	3,0	23,00	0,005300
	1,048	5,0	43,60	0,006300
	1,048	8,0	83,30	0,009100
Ткань УРАЛ (45%) + ФН (55%)	1,025	5,0	65,00	0,009000
	1,025	8,0	82,30	0,009900
	1,010	11,0	92,00	0,007700
Композиция 1*	2,200	20,0	0,94	0,000058
	2,200	24,0	1,00	0,000069
	1,810	20,0	Отсутст.	Отсутст.
Композиция 1	1,710	20,0	»	»
Композиция 2	1,860	20,0	0,40	»
	1,880	20,0	0,25	»

**Примечание.** Звездочкой отмечены образцы, вырезанные из изделия.

Как видно, эрозионная стойкость неборосилицированных углеродных композиционных материалов невысока. На восьмой минуте они теряют более 80% веса и практически полностью исчерпывают свою несущую способность. Анализ результатов испытаний боросилицированных углерод-углеродных материалов (композиции 1 и 2) показал, что они обладают высокой эрозионной стойкостью. Несмотря на то что продолжительность нагрева боросилицированных композиций более чем в 2,5 раза превышала время нагрева неборосилицированных, они практически не разрушались.

Массовый унос образцов, вырезанных из изделия, не превышает 1%, а скорость линейного уноса составляет 0,000064 мм/с, что на два порядка ниже, чем у неборосилицированных УУКМ.

Таким образом, процесс боросилицирования повышает эрозионную стойкость исследуемых композиций, оцениваемую линейным и массовым уносом, в несколько раз.

## Выводы

1. Исследованы закономерности изменения несущей способности и эрозионной стойкости углерод-углеродных материалов в условиях одностороннего нагрева потоком воздушной плазмы. Установлено, что процесс

боросилицирования повышает их эрозионную стойкость при работе в высокотемпературных окислительных средах в несколько раз.

2. Показано, что несущая способность ( $\sigma_{\text{ср}}$ ) композиции 1 при изгибе в условиях одностороннего нагрева в течение 20 мин незначительно увеличивается, а композиции 2 уменьшается, при растяжении композиционных материалов с боросилицированной матрицей в условиях относительно длительного (время нагрева порядка 20 мин) нагрева потоком воздушной плазмы условный предел прочности повышается.

3. Экспериментально оценено влияние глубокого (до  $-130^{\circ}\text{C}$ ) охлаждения образцов боросилицированных углерод-углеродных композиционных материалов на степень и характер изменения их несущей способности в условиях последующего интенсивного одностороннего нагрева. Установлено, что условный предел прочности при изгибе уменьшается. При растяжении прочность композиции 1 практически не изменяется, а композиции 2 незначительно увеличивается.

## Резюме

Наведено результати дослідження закономірностей зміни несучої здатності та ерозійної стійкості вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів як із чисто вуглецевою, так із боросилицированою матрицею в умовах одностороннього нагрівання потоком повітряної плазми. Проведено порівняльну оцінку досліджуваних характеристик деяких типів вуглецевих композиційних матеріалів. Визначено ступінь впливу боросилицирування вуглець-вуглецевих композиційних матеріалів на їх працездатність при експлуатації в конвективних потоках.

1. *Термоустойчивость* пластиков конструкционного назначения / Под ред. Е. Б. Тростянской. – М.: Химия, 1980. – 240 с.
2. Эскин Э. А., Федчук В. К., Христов Г. П. Влияние температуры на структуру и прочность углепластиков в интервале температур от 293 до 1000 К // Пробл. прочности. – 1986. – № 10. – С. 50 – 53.
3. Костиков В. И., Колесников С. А., Шуриаков А. Н. Углеродные композиционные материалы с керамическими матрицами // Конструкционные материалы на основе углерода. – 1980. – № 15. – С. 78 – 88.
4. Писаренко Г. С., Эскин Э. А. Исследование несущей способности образцов и конструктивных элементов покрытий, работающих в условиях совмещенного радиационного и конвективного нагрева // Исследования материалов в условиях лучистого нагрева. – Киев: Наук. думка, 1975. – С. 120 – 135.

Поступила 18. 05. 2000