

УДК 661.6.66

## ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С МИНИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРНОЙ ЯЧЕЙКОЙ

*E.A.Богачев*

*Открытое акционерное общество «Композит», Королев Московской обл., Россия*

Технология получения высокотемпературных углерод-углеродных и углерод-керамических композитов предполагает заполнение пустот (пор) в армирующем каркасе (преформе) материалом матрицы. Поры в преформе, как правило, межфиламентные (размером менее 1 мкм) и межжутовые или межстержневые (до 1 мм и более), что неприемлемо в случаях, когда размеры неоднородностей материала становятся сравнимыми с характерными размерами деталей (острые кромки, тонкие электроды и т.п.). Существуют пористые углеродные материалы на нетканой основе, в которых углеродные волокна расщеплены до филаментов, однако плотность таких каркасов (не более 0,2 г/см<sup>3</sup>) слишком низка для конструкционных композитов. К плотности углеродных преформ до 0,55-0,65 г/см<sup>3</sup> и приведенному диаметру пор от нескольких до 30-40 мкм приводит прессование нетканых гидросплетенных и иглопробивных заготовок на основе окисленного полиакрилонитрила с последующей карбонизацией. Полученные преформы, названные Ипресскон, позволяют изготавливать конструкции из высокотемпературных композитов с максимальной на сегодняшний день структурной однородностью.

**Ключевые слова:** нетканые материалы, окисленный полиакрилонитрил, гидросплетение, прессование, карбонизация, пористая структура, Ипресскон.

## HIGH TEMPERATURE STRUCTURAL COMPOSITES WITH A MINIMAL STRUCTURE CELL

*E.A.Bogachev*

*Komposit Joint Stock Company, Korolev Moscow region, Russia*

The process to obtain high-temperature carbon-carbon and carbon-ceramic composites envisages the void(pore) filling of reinforcing preforms using matrix material. The preform pores are, usually, interfilament (not less than 1 μm) and intertow or inter-rod ones (up to 1 mm and more), which is impossible in the cases that the size of material non-homogeneities can be compared to typical part dimensions (sharp edges, thin electrodes and so on). There exist pore nonwoven base-carbon materials wherein carbon fibers have been split into filaments; however, the densities of such preforms (no more than 0.2 g/cm<sup>3</sup>) are too low for structural composites. Compacting of the nonwoven spunlaced and needle-punched preforms based on the oxidized polyacrylonitrile followed by carbonization results in carbon preform densities up to 0.55-0.65 g/cm<sup>3</sup> and equivalent pore diameter from several microns to 30-40 μm. The preforms obtained called Ipresskon allow for producing structures out of high-temperature composites having up-to-date maximum structural homogeneities.

**Keywords:** nonwoven materials, oxidized polyacrylonitrile, spunlace, pressing, carbonisation, pores structure, Ipresskon.

### 1. Введение

Современные тенденции указывают на востребованность выборочной замены в изделиях ракетно-космической и авиационной техники металлов высокотемпературными (углерод-углеродными или углерод-

керамическими) композитами, примером которой является использование неохлаждаемых сопловых насадок в жидкостных реактивных двигателях взамен металлических охлаждаемых [1, 2]. Более масштабному проявлению этой тенденции мешает в том числе принципиальное различие в микроструктуре: характерный размер структурных элементов композита, который определяется прежде всего строением его армирующей системы, может на несколько порядков превышать размер зерна металла величиной всего лишь в несколько микрометров.

Высокотемпературные пространственно-армированные композиционные материалы с тканевым, стержневым или нитяным углеродным наполнителем изготавливают из непрерывных углеродных волокон, которые получают, как правило, многостадийной переработкой из поликарбонитрила ( $-\text{CH}_2\text{CH}(\text{CN})-$ )<sub>n</sub> - предшественника высокопрочного углеродного волокна [3]. При этом, ввиду чрезвычайно малого диаметра элементарного углеродного волокна (обычно около 7 мкм), филаменты объединяют в комплексную нить - жгуты (сырец для изготовления тканей, лент, а также стержней диаметром 0,3-0,7 мм). Получается, что в армирующей системе композита присутствует как межфиламентное (доли микрометра), так и межжгутовое или межстержневое пространство (до 1,0-1,5 мм). Поскольку технологии получения высокотемпературных углерод-углеродных и углерод-керамических композитов предполагают заполнение пустот в армирующем каркасе материалом матрицы, структурная неоднородность каркаса затем наследуется и самим композиционным материалом в части равномерности объемного чередования наполнителя и матрицы.

Однако современные требования ко многим высокотемпературным конструкциям подразумевают необходимость обеспечения значительно большей структурной однородности композита. К таким деталям и конструкциям, например, относятся острые (радиусом притупления 0,5 мм и менее) кромки лопаток турбин и высокоскоростных летательных аппаратов [4], композиционные теплообменники с толщиной элементов конструкции менее 0,4 мм [5, 6], углерод-углеродные эмиссионные электроды толщиной 0,3 мм [7] и т.п. Разумеется, изготовление таких деталей с использованием существующих углеродных наполнителей практически невозможно: размеры неоднородностей материала становятся сопоставимыми с характерными размерами деталей.

Таким образом, традиционные наполнители из непрерывных комплексных нитей, с одной стороны, создают излишне крупные и неэффективные структурные неоднородности в композитах, с другой стороны, могут приводить к получению изделий из них с избыточными показателями свойств, например, прочностных или упругих. Все это, удорожая стоимость материалов, препятствует расширению сферы их применения.

## **2. Особенности пористой структуры современных углеродных иглопробивных каркасов**

Анализ однородности структуры композитов, полученных на основе существующих волокнистых наполнителей (тканей, лент, стержневых и плетеных каркасов) указывает на необходимость нового подхода к разработке технологии создания перечисленных выше и подобных им деталей из композитов, в которых наполнитель в идеале должен иметь ячейку порядка диаметра волокна в несколько микрометров.

Перспективным направлением решения данной задачи явилась разработка иглопробивных армирующих систем, среди которых наиболее известными в мире являются иглопробивные каркасы (ИПК) марки Novoltex и его производного Naxeco производства французской компании Snecma Propulsion Solide. Каркас Novoltex, представляющий собой пакет слоев из двухслойного материала - углеродной ткани и нетканого холста из окисленного ПАНа - получают в виде плоских форм, полого цилиндра или усеченного конуса, предназначенных для изготовления, в частности, деталей выходного сопла крупногабаритных тонкостенных сопловых насадков ракетных двигателей из углерод-углеродного композита. По мере присоединения каждого слоя иглопробивная головка сотнями крючковых игл проходит через двухслойный материал и прокалывает предварительно окисленные нити поликарбонитрильного ПАН-волокна. Иглы протягивают через слои ткани перпендикулярно слоям, формируя третье направление армирования. В каркасе Naxeco вместо холста из окисленных ПАН-волокон используют «бумагу» из рубленых промышленных углеродных волокон [1].

Иглопробивная технология обладает многими преимуществами: простотой процесса, высокой степенью автоматизации, низкой стоимостью, возможностью изготовления крупногабаритных тонкостенных деталей и т.п. В настоящее время она является одной из самых популярных технологий изготовления каркасов. Однако плотность иглопробивных каркасов (ИПК) типа Naxesco и Novoltex не превышает  $0,4\text{-}0,45 \text{ г/см}^3$ . Этого из-за малой объемной доли волокна в каркасе недостаточно для конструкционных композитов, где требуется плотность не ниже  $0,5\text{-}0,6 \text{ г/см}^3$ . Другим недостатком ИПК является наличие довольно больших (до  $0,5\text{-}0,7 \text{ мм}$ ) пустот в их структуре, которые находятся между слоями материала (рис. 1).

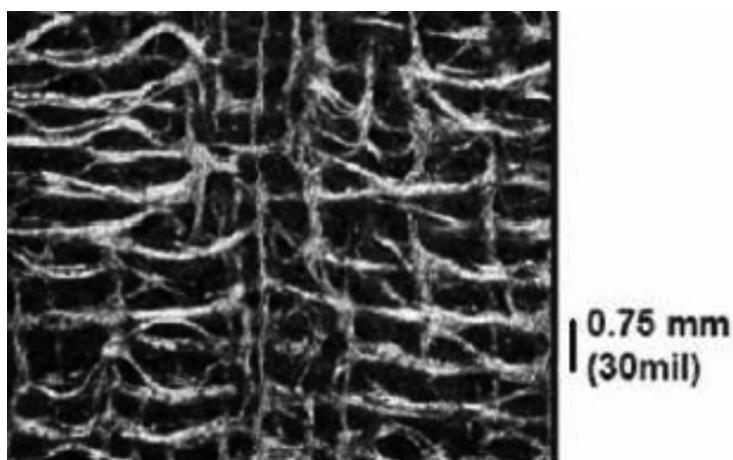


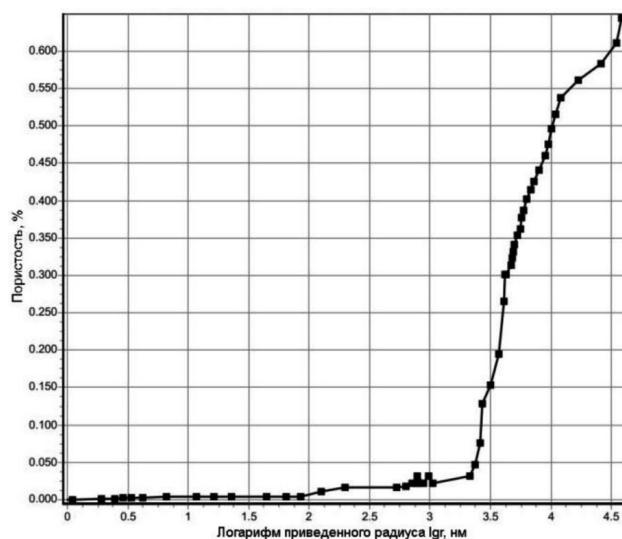
Рис.1. Фото микроструктуры ИПК типа Novoltex[3]  
Photo of the Novoltex-type needle-punched preform microstructure [3]

Эти особенности известных иглопробивных армирующих систем затрудняют решение перечисленных выше задач.

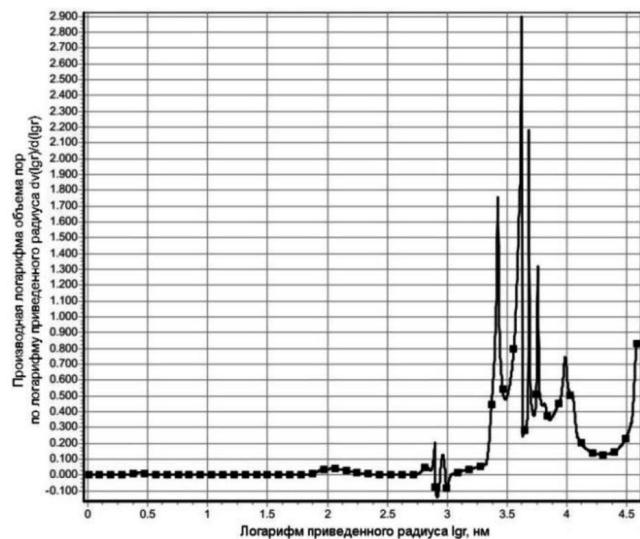
### 3. Особенности структуры нетканых каркасов, уплотненных прессованием

Известно, что разволокнение полимерного наполнителя до филамента является необходимой операцией в большинстве нетканых технологий [8]. Поэтому, когда надо иметь значительно меньшую измельченность пористой структуры, чем у преформ существующих высокотемпературных композитов, следует обратиться к нетканым армирующим системам. Сырьем для них служит ватка из штапелированных (т.е нарезанных на отрезки 50-60 мм) полимерных волокон. Из этой ватки технологически отработанными методами прочеса и раскладки получают разволокненный до уровня филаментов нетканый холст. Кроме механического скрепления холста с помощью иглопробивания стальными иглами, применяется также обработка расчеса тонкими (диаметром 100-150 мкм) водяными струями высокого давления (так называемый гидроструйный или Spunlace-метод) [9]. Подобная гидроструйная обработка является подобием иглопробивания. Она призвана уплотнить довольно рыхлый исходный холст, увеличить его прочность, не только сжимая, но и частично переплетая его в ортогональном направлении.

Известно, что применение штапельного полимерного волокна длиной до 50-60 мм, образование из него расчесанного холста с последующим поперечным иглопробиванием и последующей карбонизацией позволяет изготовить углеродную преформу плотностью около  $0,2 \text{ г/см}^3$  [10], но это недостаточно для применения в качестве армирующего каркаса конструкционного композита. Однако, если перед карбонизацией для повышения плотности и уменьшения среднего размера пор провести прессование иглопробивных преформ на основе нетканых полимерных полотен, то после карбонизации будет получен значительно более плотный трансверсально армированный каркас с однородной по размерам структурной ячейкой [11] и приведенным диаметром пор почти полностью в интервале 4-32 мкм (рис. 2).



a)



b)

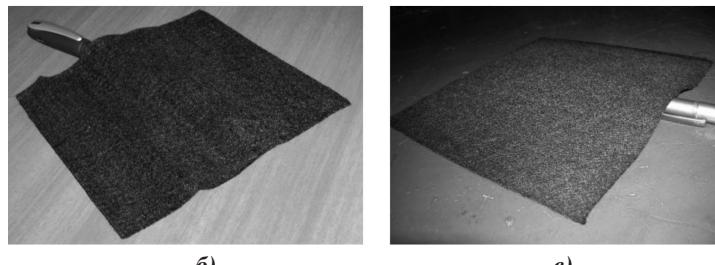
**Рис. 2. Пористая структура углеродного каркаса на основе прессованного окисленного полиакрилонитрила: интегральное (а) и дифференциальное (б) распределение пор в зависимости от логарифма приведенного радиуса в нанометрах (определенено методом эталонной контактной порометрии [12])**

**Pore structure of the carbon preform based on the molded oxidized polyacrylonitrile: integral (a) and differential (b) pore distribution depending on logarithmic equivalent radius in nanometers (using reference standart contact porometry [12])**

Использование окисленного ПАН предпочтительно по двум причинам: именно ПАН является наиболее распространенным сырьем для получения высокопрочных углеродных волокон, и его окисленная форма при переходе в углеродное состояние претерпевает усадку без разрушения – в отличие от исходного ПАН (рис.3).



a)



б)

в)

**Рис. 3. Внешний вид монослойных образцов полимеров: а - из ПАН до (слева) и после (справа) карбонизации; из окисленного ПАН до (б) и после (в) карбонизации. Appearance of the monolayer polymer specimens: а - made of PAN before (left) and after (right) carbonization; maid of oxidized PAN before (б) and after (в) carbonization**

Исходным сырьем для преформ являлось нетканое полотно марки Оксипан (ТУ 8397-002-45680943-2010). При этом технологическая схема, включающая прессование перед карбонизацией, применима как к нетканому монослою из гидросплетенного окисленного ПАНа, так и к объемному каркасу из набора монослойных холстов, скрепленных друг с другом трансверсальным иглопробиванием (рис.4).

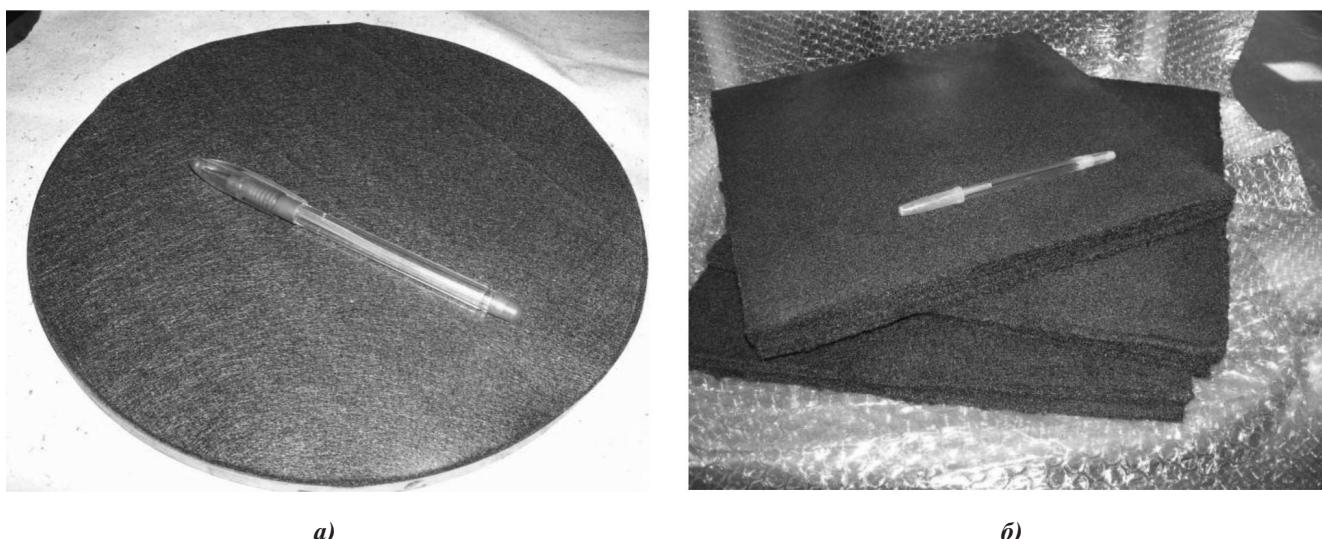


Рис. 4. Примеры уплотненных прессованием преформ из окисленного ПАНа: а - спрессованный гидросплетенный холст; б - иглопробитые плиты после прессования. Examples of the compacted preforms made of oxidized PAN: a - pressed spunlaced fabric; б - as-pressed needle-punched plates

О значительном уплотнении каркасов свидетельствуют данные по свойствам гидросплетенных монослоев (таблица 1) и иглопробивных плит (таблица 2) на различных стадиях переработки.

Таблица 1

Изменение свойств гидросплетенных холстов из окисленного ПАНа по стадиям переработки  
The change of oxidized PAN-spunlaced fabric properties as to processing stages

№ образца	Операция	Размеры (длина×ширина×толщина), мм	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>
C-1	После гидросплетения	201×190×0,80	6,69	0,23
	После прессования, термостабилизации и карбонизации	183×178×0,25	3,24	0,40
C-2	После гидросплетения	187×180×0,80	5,93	0,22
	После прессования, термостабилизации и карбонизации	165×163×0,25	2,41	0,40
C-3	После гидросплетения	200×190×0,80	6,68	0,22
	После прессования, термостабилизации и карбонизации	182×175×0,25	3,22	0,40
C-4	После гидросплетения	201×198×0,80	7,36	0,22
	После прессования, термостабилизации и карбонизации	180×174×0,25	2,91	0,37
C-5	После гидросплетения	187×180×0,80	5,93	0,22
	После прессования, термостабилизации и карбонизации	165×163×0,25	2,41	0,40

Таблица 2

**Изменение свойств иглопробивных плит из окисленного ПАНа по стадиям переработки**  
**The change of oxidized PAN-needle punched plates as to processing stages**

№ плиты	Операция	Размеры (длина×ширина×толщина), мм	Масса, г	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Пористость, %
П-1	После иглопробивания	307×305×33	447,7	0,14	91
	После прессования	317×310×6,6	425,1	0,66	52
	После термостабилизации и карбонизации	287×285×5,5-6,3	276,4	0,57	65
П-2	После иглопробивания	317×310×34	564,8	0,17	90
	После прессования	322×320×7,5	541,3	0,70	49
	После термостабилизации и карбонизации	293×293×5,9	298,6	0,59	64
П-3	После иглопробивания	325×318×49	1031,1	0,20	88
	После прессования	310×310×12,5-13	872,3	0,71	48
	После термостабилизации и карбонизации	284×284×10	477,2	0,59	64
П-4	После иглопробивания	295×293×50	928,2	0,21	87
	После прессования	300×299×12,5	876,5	0,78	43
	После термостабилизации и карбонизации	268×267×10,5	473,0	0,63	62
П-5	После иглопробивания	295×295×51	919,1	0,21	87
	После прессования	297×297×12,5	866,7	0,79	42
	После термостабилизации и карбонизации	271×270×11,0	478,6	0,59	64

Относительно высокие значения плотности каркасов (до 0,57-0,63 г/см<sup>3</sup>) достигаются как раз благодаря происходящей при термостабилизации и карбонизации усадке, которая частично компенсирует значительную (около 50%) потерю массы в результате пиролиза и сохраняет трансверсальное армирование преформы. Плотность углеродных преформ на основе монослойных гидросплетенных холстов несколько ниже (около 0,4 г/см<sup>3</sup>), что объясняется меньшей деформативностью тонкого монослоя материала, чем набора таких слоев.

Повышение объемной доли волокна в иглопробивных углеродных преформах типа Novoltex и Naxeco путем прессования также возможно, но только с предварительным добавлением специальных высокококсовых связующих. Поэтому более высокая плотность предварительно подпрессованных каркасов на основе окисленного ПАНа в сочетании со значительно меньшей и более однородной ячейкой выгодно отличает данный тип углеродных каркасов, получивших название Ипресскон (иглопробивной прессованный, разработки ОАО «Композит», г. Королев Московской обл., и ООО «Ниагара», г. Щелково Московской обл.), от производимых за рубежом.

Микроструктура преформы Ипресскона в сравнении с зарубежным каркасом Naxeco приведена на рис.5.

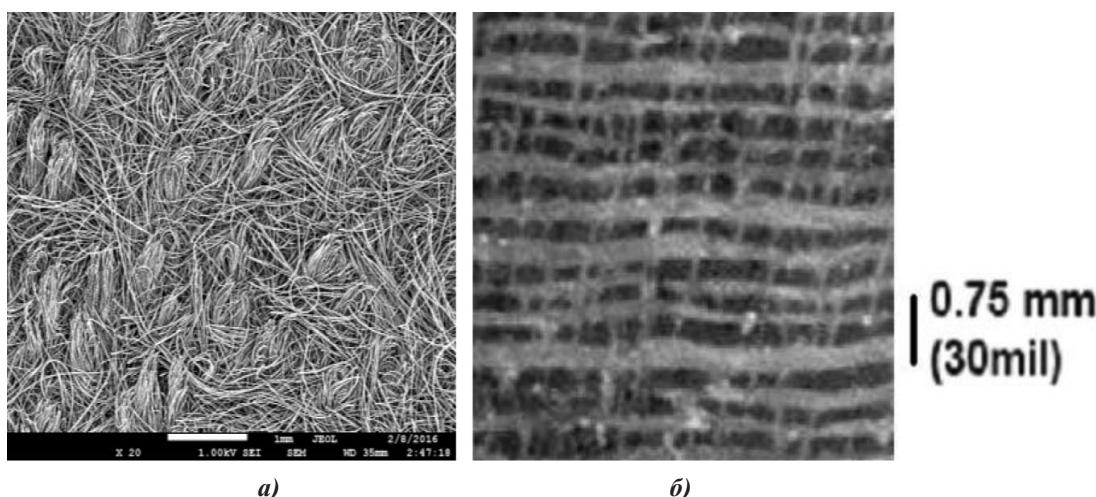


Рис. 5. Микроструктура каркасов типа Ипресскон (а), Naxeco (б [1])  
Preform microstructure such as Ipresskon (a), Naxeco (b [1])

Однородность пористой структуры Ипресскона очевидна: поры каркаса имеют примерно одинаковые размеры микрометрового порядка (см. рис.5, а), тогда как в преформах Novoltex (см. рис.1, а) и Naxeco (см. рис.5, б) поры в горизонтальных слоях также очень малы, однако размер межслоевых пустот достигает 0,5-0,7 мм.

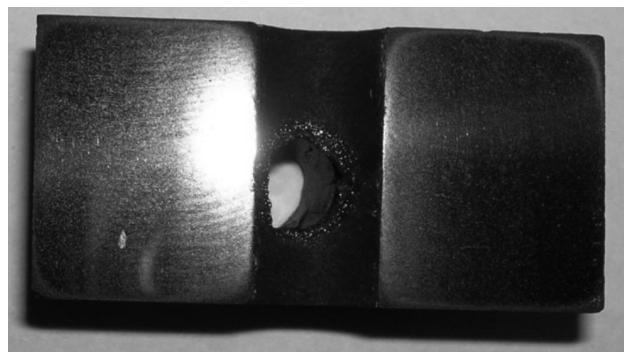
#### 4. Микроструктура и свойства композитов, получаемых на основе Ипресскона

Особенностью Ипресскона является перевод волокон из полимерного в неорганическое углеродное состояние непосредственно в составе каркаса, где неприменимы классические технологии получения углеродного волокна с регулируемой вытяжкой. Однако волокна в спрессованном каркасе находятся в тесном контакте друг с другом. Этот контакт, по-видимому, сохраняется при переходе «полимер-углерод». При операциях термостабилизации и карбонизации преформ волокна претерпевают усадку, но вследствие трения вынуждены растягиваться, создавая натяжение. Разумеется, это натяжение не может быть так же контролируемо, как в производстве непрерывного углеродного волокна при отработанных и в значительной степени изученных процессах термостабилизации и карбонизации жгутов поликарбонита [13].

Другой проблемой технологии формирования Ипресскона является высокая концентрация газо- и тепловыделения в ограниченном пористом пространстве спрессованного полимерного каркаса, что может привести к падению свойств углеродных волокон в карбонизированном каркасе и даже к их деструкции.

Однако композиты на основе Ипресскона свидетельствуют об удовлетворительных эксплуатационных свойствах полученных образцов, наличию у них набора особенностей, недостижимых при использовании композиционных материалов с традиционным тканевым, стержневым или нитяным наполнителем.

Так, шероховатость поверхности отшлифованной углерод-углеродной втулки на основе Ипресскона, уплотненного пироуглеродом, сравнима с достижимой на металлах (рис. 6, таблица 3).



**Рис. 6. Внешний вид отшлифованного среза втулки из углерод-углеродного композиционного материала (УУКМ) на основе каркаса Ипресскон**  
*Appearance of the thin carbon-carbon composite bush section based on Ipresskon preform*

Таблица 3

**Результаты измерения параметра шероховатости Ra на шлифованных поверхностях втулки из УУКМ на основе каркаса Ипресскон (штриховыми линиями показаны направления измерения профилометром-профилографом)**

**Measurement of the roughness parameter Ra at the polished surfaces of the carbon-carbon composite-bush based on Ipresskon preform (dash lines are measurement directions using surface profilometer-roughness gauge)**

Направления измерения профилометром-профилографом	Значения параметра шероховатости $R_a$ , мкм	Класс шероховатости, соответствующий замеренному $R_a$ (по ГОСТ 2789-73)
	0,173	9
	0,589	8
	0,776	7
	0,215	9
	0,206	9
	0,127	10
	0,086	10
	0,448	8

К низким значениям высоты неровностей приводит однородная структура композита, армирующий каркас которого имеет регулярную пористость с пустотами приведенным диаметром от нескольких до 30-40 мкм (см. рис. 2), заполненными углеродной матрицей.

Равномерно-микропористая армирующая система высокотемпературных композитов на основе Ипресскона позволила изготовить тонкие, сложнопрофильные конструкции эмиссионного электрода высокочастотного ионного двигателя из углерод-углеродного композиционного материала (толщина 0,3 мм при диаметре 200 мм, количество отверстий – 2515 шт., диаметр отверстий – от 2,1 до 2,3 мм; минимальное расстояние между краями отверстий – 0,6 мм) (рис.7, а, в) и картриджа высокотемпературного теплообменника из УКМ состава C-SiC на нетканой основе (толщина гофр и разделительных пластин 0,4 мм) [14] (рис.7, б, г).

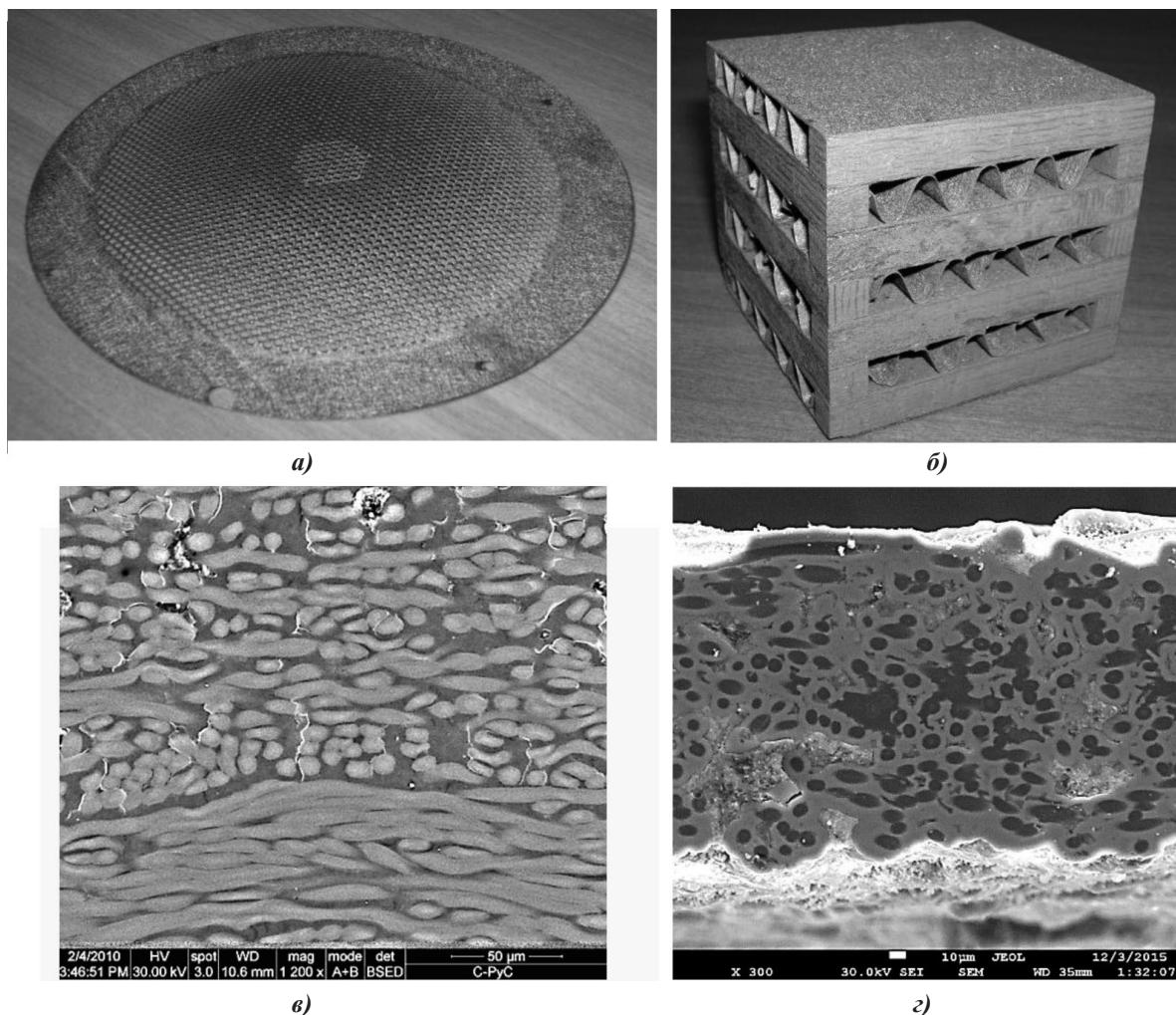


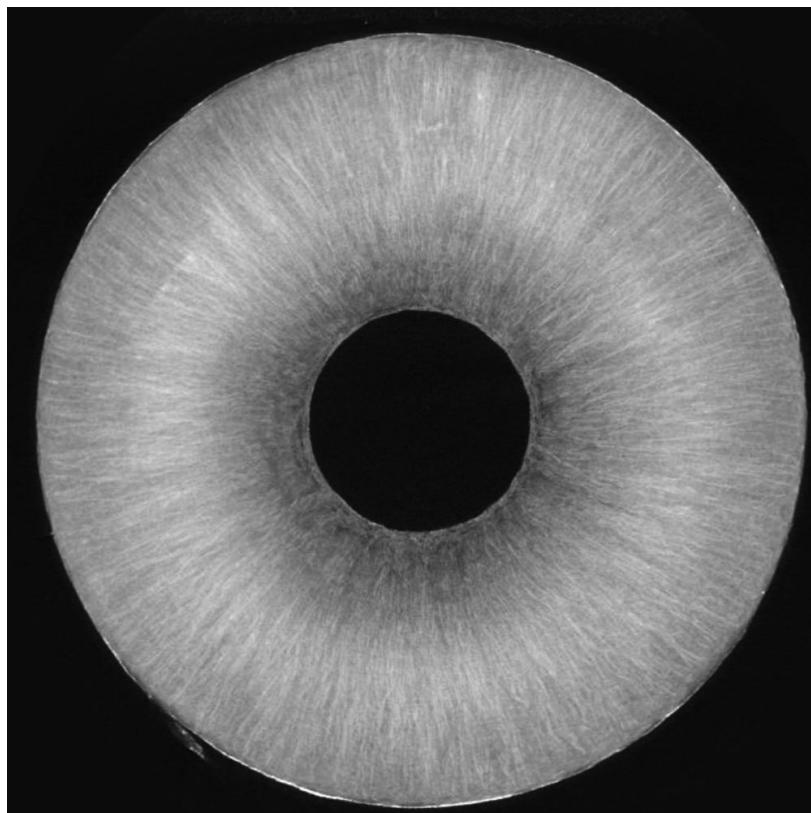
Рис. 7. Внешний вид и микроструктура изготовленных на основе каркаса Ипресскон эмиссионного электрода высокочастотного ионного двигателя из углерод-углеродного композиционного материала (а, в) и картриджка высокотемпературного теплообменника из УКМ состава C-SiC (б, г)

*Appearance and microstructure of the Ipresskon preform-made emission electrode for high-frequency ion carbon-carbon composite engine (a, b) and the core for high-temperature carbon/SiC composite heat exchanger (b, c)*

В теплонапряженных конструкциях ракетно-космической техники (вкладыши критического сечения сопла твердотопливных ракетных двигателей, сопловые насадки), где распространены пространственно-армированные композиты для цилиндрических (тубулярных) и осесимметричных элементов конструкций, использование преформ марки Ипресскон также является актуальным [15, 16]. Их применение способ-

ствует значительно более быстрому и эффективному заполнению пор углеродного волокнистого каркаса из жидкой фазы, когда измельченная и однородная пористость приводит к достижению предельной плотности УУКМ (около 2,0 г/см<sup>3</sup>) за значительно меньшее количество циклов «пропитка-карбонизация».

Следует отметить, что в отличие от хаотично армированных в данном типе композита за счет предварительного иглопробивания создается ортогональная ориентация довольно длинных (50-60 мм длиной) волокон (рисунок 8).



*Рис. 8. Томографическое изображение тубулярного (цилиндрического) углеродного каркаса плотностью 0,53 г/см<sup>3</sup> из штапельных волокон для углерод-углеродного композита (получено на рентгеновском компьютерном томографе XTH 225+320 LC). Видны радиальные нити, образованные иглопробиванием*  
*Tomographic image of the tubular (cylinder) carbon preform of 0.53 g/cm<sup>3</sup> density made of staple fibers for carbon-carbon composite (using computerized tomography scanner XTH 225+320 LC). There can be seen radial threads needle-punched*

Поэтому композиты на основе Ипресскона отличаются более эффективной работой волокна при нагружении, когда происходит передача усилий от одного штапельного («цельного») волокна к рядом лежащему другому («разорванному») [17]. Поскольку при получении Ипресскона большинство процессов, включая превращение волокна из полимера в углерод, происходит в заготовке будущего изделия, в исследовании и выработке рекомендаций главная роль отводится интегральному эксперименту и его сопоставлению с математическим моделированием процессов.

## **5.Выходы**

Анализ структуры существующих композитов с нитяной или стержневой армирующей системой показывает, что объемная неоднородность материала в значительной степени определяется разновеликостью пор и пустот исходного каркаса. В традиционных углерод-углеродных и углерод-керамических композитах межфиламентное и межжгутовое пространство различаются в размерах на несколько порядков. В суще-

ствующих преформах, включая зарубежные иглопробивные, данное различие принципиально не устранено.

При необходимости иметь существенно меньшую, чем у существующих высокотемпературных композитов, структурную неоднородность необходимо использовать способные к предварительному уплотнению прессованием нетканые иглопробивные преформы из полимерного штапельного волокна (в частности, из окисленного полиакрилонитрила – прекурсора углеродного волокна). Получаемый после карбонизации таких преформ каркас – Ипресскон – отличается однородным распределением пор по размерам (приведенным диаметром от нескольких до 30-40 мкм). Это позволяет получать на его основе изделия из высокотемпературных композитов с минимально возможной на сегодняшний день структурной ячейкой: тонкие (0,3 мм толщиной) электроды, острые кромки узлов летательных аппаратов (радиус притупления 0,5 мкм), гофры и разделительные пластины высокотемпературных теплообменников (толщиной менее 0,4 мм).

**Библиографический список**

1. Lacombe A., Pichon Th., Lacoste M. 3D Carbon-Carbon composites are revolutionizing upper stage Liquid Rocket Engine performance by allowing introduction of large nozzle extension. – 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2009, Palm Springs, California. Paper No.° AIAA 2009-2678 / 119-SDM-75 High Temperature Materials session. p.p. 1-11.
2. Миронов В.В., Кочетков Ю.М., Введенский В.С. и др. Экспериментальные исследования работоспособности тонкостенных неохлаждаемых сопел ЖРД из углеродных композиционных материалов. - Авиакосмическая техника и технология, 2001, №3, с. 55-61.
3. Буранов И.М., Воробей В.В.. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 516 с.
4. Карелин О.О., Колтырина К.Ю. Применение композиционных материалов в авиадвигателестроении. - Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А.Соловьева, 2015. № 2 (33), с.53-59.
5. Тягинькин В.В., Богачев Е.А., Суворов А.В., Тимофеев А.Н., Кузьмин А.Б., Ветров Н.В. Способ изготовления теплообменника, теплообменник из композиционных материалов и способ изготовления гофрированного листа для теплообменника. – Патент РФ №2479815 от 20.04.2013.
6. Богачев Е.А., Елаков А.Б., Белоглазов А.П., Быков Л.В. Способ изготовления гофрированного листа для теплообменника из композиционных материалов. – Патент РФ №2562274 от 11.08.2015.
7. Богачев Е.А., Елаков А.Б., Белоглазов А.П., Денисов Ю.А. Эмиссионный электрод ИОС ВЧИД из тонкого углерод-углеродного композиционного материала. - Тезисы доклада международной научно-технической конференции «Электроракетные двигатели. Прошлое. Настоящее. Будущее», 2015, с.33.
8. Горчакова В.М., Сергеенков А.П., Волощик Т.Е. Оборудование для производства нетканых материалов. - М.: МГТУ им. А. Н. Косыгина, 2006. Часть 2. 776 с.
9. Абдуллин И.Ш., Ибрагимов Р.Г., Музафарова Г.Ш., Саматова Э.М. Современные технологии производства нетканых материалов. - Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т.17, №19, с.114-119.
10. Марков Н.С., Якубук А.А., Фихман Ю.Н., Польховский М.В., Антипов А.И., Гриневич П.Н., Лысенко А.А., Асташкина О.В. Способ получения нетканого материала. – Патент Белоруссии №2136 от 30.06.1998.
11. Богачев Е.А., Елаков А.Б., Белоглазов А.П., Денисов Ю.А., Тимофеев А.Н. Способ изготовления пористого каркаса-основы композиционного материала. - Заявка на патент РФ №2016117713 от 06.05.2016.
12. Вольфович Ю.М., Багоцкий В.С., Сосенкин В.Е., Школьников Е.И. Методы эталонной порометрии и возможные области их применения. - Электрохимия, 1980, т. 16, с.1620–1652.
13. Бирюков В.П. Оптимизация процесса термостабилизации при получении углеродного волокна на основе ПАН. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: 2002, 341 с.
14. Быков Л.В., Богачев Е.А. Елаков А.Б., Белоглазов А.П. Использование нетканых углеродных материалов в высокотемпературных теплообменниках состава C-SiC. - Вестник МАИ, 2014, т.21, N3, С.110-116.
15. Богачев Е.А. Высокотемпературные пространственно-армированные материалы на нетканой полимерной основе. – Сб. трудов XVII ежегодной научной конференции отдела полимеров и композиционных материалов ИХФ РАН. М., 2016, с.7-8.
16. Елаков А.Б., Богачев Е.А., Турусов Р.А. Сравнение двух технологических подходов при формировании цилиндрических заготовок из штапельного окисленного полиакрилонитрила для углерод-углеродных композитов. – Сб. трудов XVII ежегодной научной конференции отдела полимеров и композиционных материалов ИХФ РАН. М., 2016, с.12-13.
17. Турусов Р.А., Богачев Е.А., Елаков А.Б. Интенсивность адгезионного взаимодействия и монолитность волокнистых композитов. – Сб. трудов XVII ежегодной научной конференции отдела полимеров и композиционных материалов ИХФ РАН. М., 2016, с.40-42.

### References

1. A. Lacombe, Th. Pichon, M. Lacoste. 3D Carbon-Carbon composites are revolutionizing upper stage Liquid Rocket Engine performance by allowing introduction of large nozzle extension. – 50th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 2009, Palm Springs, California. Paper N° AIAA 2009-2678 / 119-SDM-75 High Temperature Materials Session. p.p. 1-11.
2. Mironov V.V., Kochetkov Yu.M., Vvedenskiy V.S. e. a. Experimental researches of thin carbon-carbon radiative liquid propellant engine nozzles efficiency. – *Aviacosmicheskaya tekhnika i tehnologiya. – Aircraft and rocket technics and technology*, No.3, 2001, pp 55-61 (in Russian).
3. Bulanov I.M., Vorobei V.V. *Tekhnologiya raketnyh i aerokosmicheskikh konstrukcii iz kompozicionnyh materialov [Rocket technology and aerospace composite structures]*. Moscow, Publishing house BMSTU, 1998. 516 p.
4. Karelina O.O., Koltirina K.U. The use of composite materials in aircraft engine. *Vestnik Ribinskoi gosudarstvennoi aviacionnoi tehnologicheskoi akademii im. P.A. Solov'eva. - Periodical of Rybinsk State Aviation Technological Academy named by Soloviev P.A.*, 2015, No.2(33), pp.53-59 (in Russian).
5. Tjatinkin V.V., Bogachev E.A., Suvorov A.V., Timofeev A.N., Kuzmin A.B., Vetrov N.V. Method of producing composite heat exchanger and corrugated sheets for heat exchanger. *Patent RF, No.2479815; 2013* (in Russian).
6. Bogachev E.A., Elakov A.B., Beloglazov A.P., Bykov L.V. Method for manufacturing a corrugated sheet for a heat composite exchanger. *Patent RF, No.2562274; 2015* (in Russian).
7. Bogachev E.A., Elakov A.B., Beloglazov A.P., Denisov Yu.A. [Thin carbon-carbon based emission electrode for the ion-optic system as part of high-frequency discharge ion engine]. *Tezisy doklada mezhdunarodnoi nauchno-tehnicheskoi konferencii «Elektroraketnie dvigateli. Proshloe. Nastoyashee. Budushee». [Proc. Int. Science and Applied Research Conference devoted to the 60-th anniversary of EDB Fakel «Electric propulsion. Yesterday. Today. Tomorrow»], 2015, Kaliningrad, Russia, p. 33* (in Russian).
8. Gorchakova V.M., Sergeenkova A.P., Voloschik T.E. *Oborudovanie dlya proizvodstva netkanyh materialov [Equipment for nonwoven materials production]*. Moscow. Publish house of MSTU named by A.N.Kosygin. 2006. Part 2. 776 p. (in Russian).
9. Abdullin I.Sh., Ibragimov R.G., Muzaferova G.Sh., Samatova E.M. Modern technologies of nonwoven materials production. *Vestnik Kazanskogo tehnologicheskogo universiteta. – Periodical of Kazan Technological University*, 2014, Pt.17, No.19, pp.114-119 (in Russian).
10. Markov N.S., Yakobuk A.A., Fihman U.N., Pol'govskii M.V., Antipin A.I., Grinevich P.N., Lisenko A.A., Astashkina O.V. Method of the nonwoven material production. *Patent BY, No.2136; 1998* (in Russian).
11. Bogachev E.A., Elakov A.B., Beloglazov A.P., Denisov Yu.A., Timofeev A.N. Method of the porous preform for composite manufacturing. *Patent application RF, No.2016117713; 2016* (in Russian).
12. Vol'fkovich U.M., Bagockii V.S., Sosenkin V.E., Shkol'nikov E.I. Metody etalonnoi porometrii i vozmozhnye oblasti ikh primeneniya [Standard methods of porosimetry and possible fields of their application]. *Elektrokhimiya*, 1980, Pt.16, pp. 1620-1652 (in Russian).
13. Birukov V.P. *Optimizaciya processa termostabilizacii pri poluchenii uglerodnogo volokna na osnove poliakrylonitrila [Optimization of thermal stabilization process in the preparation of carbon fiber based on polyacrylonitrile]*. The thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences. Moscow, 2002, 341 p.
14. Bykov L.V., Bogachev E.A., Elakov A.B., Beloglazov A.P. [The use of nonwoven carbon materials in high-temperature C-SiC composite heat exchangers]. *Vestnik MAI. – Periodical of Moscow Aviation Institute*. 2014, Pt.21, No.3, pp.110-116 (in Russian).
15. Bogachev E.A. [High temperature spatial-reinforced materials based on nonwoven polymer]. *Sbornik trudov XVII ezhegodnoj nauchnoj konferencii otdela polimerov i kompozicionnyh materialov IHF RAN. – Proc. 17th annual scientific conference of polymers and composite materials department of the RAS Institute of Chemical Physics*. Moscow, 2016, pp.7-8 (in Russian).
16. Elakov A.B., Bogachev E.A., Turusov R.A. [Comparison of two technological approaches in forming cylindrical preforms from oxidized polyacrylonitrile staple for carbon-carbon composites]. *Sbornik trudov XVII ezhegodnoj nauchnoj konferencii otdela polimerov i kompozicionnyh materialov IHF RAN. – Proc. 17th annual scientific conference of polymers and composite materials department of the RAS Institute of Chemical Physics*. Moscow, 2016, pp.12-13 (in Russian).
17. Turusov R.A., Bogachev E.A., Elakov A.B. [The intensity of the adhesive interaction and monolithic fiber composites]. *Sbornik trudov XVII ezhegodnoj nauchnoj konferencii otdela polimerov i kompozicionnyh materialov IHF RAN. – Proc. 17th annual scientific conference of polymers and composite materials department of the RAS Institute of Chemical Physics*. Moscow, 2016, pp. 40-42 (in Russian).

### Сведения об авторе

**Е.А.Богачев:** канд. техн. наук, начальник отделения открытого акционерного общества «Композит», Королев Московской области, Россия, eug-bogatchev@mail.ru, тел. +7(495) 5132306, +7(910) 4517977.