



DOI: 10.18721/JEST.240213
УДК 678.5/8:539.5

А.Б. Елаков¹, Р.А. Турусов², Е.А. Богачев¹, А.Ю. Сергеев¹

1 – ОАО «Композит», г. Королев Московской обл., Россия

2 – Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук,
г. Москва, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ НЕТКАНОГО ХОЛСТА ПРИ НАМОТКЕ НА ЦИЛИНДРИЧЕСКУЮ ОПРАВКУ

Окисленный волокнистый полиакрилонитрил (ПАН) – наиболее распространенный предшественник углеродного волокна. В ОАО «Композит» разработан способ изготовления пористого углеродного армирующего каркаса – основы композиционного материала, получаемого из нетканого окисленного ПАН по иглопробивной технологии с последующим прессованием и серией термообработок. Объемные цилиндрические каркасы могут быть получены силовой намоткой нетканого ПАН-холста на металлическую оправку двумя способами: с радиальным иглопробиванием наматываемых слоев и без него. В настоящей работе представлена аналитическая модель напряженно-деформированного состояния полимерного холста при намотке на оправку. С использованием модели получены и проанализированы результаты для каждого из способов намотки. В результате проведенного в работе теоретического и экспериментального исследования формирования структуры объемных цилиндрических каркасов при двух способах намотки нетканого холста из окисленного ПАН на оправку установлено, что применение в процессе намотки радиального армирования путем иглопробивания изменяет степень анизотропии материала, что приводит к уменьшению радиальных и окружных напряжений и позволяет избежать потери устойчивости при прессовании цилиндрических заготовок. Благодаря этому после последующих термообработок получают массивные углеродные каркасы с однородной бездефектной структурой.

Ключевые слова: нетканые материалы, окисленный полиакрилонитрил, иглопробивание, напряженно-деформированное состояние, оправка, механика растущего тела, упругая анизотропия.

Ссылка при цитировании:

А.Б. Елаков, Р.А. Турусов, Е.А. Богачев, А.Ю. Сергеев. Моделирование напряженно-деформированного состояния нетканого холста при намотке на цилиндрическую оправку // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 2. С. 149–160. DOI: 10.18721/JEST.240213.

A.B. Elakov¹, R.A. Turusov², E.A. Bogachev¹, A.Yu. Sergeev¹

1 – JSC «Kompozit», Korolev Moscow region, Russia

2 – Semenov Institute of chemical physics Russian academy of sciences, Moscow, Russia

SIMULATION OF THE STRESS-STRAIN STATE IN NON-WOVEN FABRIC WINDING ONTO A CYLINDRICAL MANDREL

Fibrous polyacrylonitrile (PAN) is the most widespread carbon fiber precursor. Kompozit JSC has developed a technique to fabricate a porous carbon preform that is a composite material base wherein a reinforcing carbon preform will be made out of needle-punched non-woven oxidized PAN, with subsequent pressing and a series of heat treatments. A cylindrical reinforcing preform can be shaped by pre-winding and compacting non-woven PAN-fabric using two processes. The present paper gives an analytical model for winding the fabric onto the mandrel using both of the

above processes, as well as presents experimental and theoretical data for the estimation of the stress-strain state made for each fabric winding process. The analysis has been given of the results obtained.

Keywords: non-woven materials, oxidized polyacrylonitrile, needle-punching, stress-strain state, winding, mandrel, growing solid mechanics, elastic anisotropy.

Citation:

A.B. Elakov, R.A. Turusov, E.A. Bogachev, A.Yu. Sergeev, Simulation of the stress-strain state in non-woven fabric winding onto a cylindrical mandrel, *St. Petersburg polytechnic university journal of engineering science and technology*, 24(02)(2018) 149–160, DOI: 10.18721/JEST.240213.

Введение

Композиционные и порошковые материалы — одни из наиболее перспективных для применения в современных быстро развивающихся отраслях промышленности — космическом и авиастроении, автомобилестроении, энергетике, медицине, строительстве и др. [1–8]. Значительная часть композиционных материалов имеет металлическую матрицу. Однако все большее применение получают керамические и полимерные композитные материалы.

Исследуемый материал. Как известно, окисленный волокнистый полиакрилонитрил (ПАН) — это наиболее распространенный предшественник углеродного волокна [Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: Учеб. для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. 516 с.]. Поскольку выход углерода при карбонизации окисленного ПАНа составляет примерно 50 % масс., возможно использование армирующего углеродного каркаса на его основе для будущего создания композиционного материала. В ОАО «Композит» разработан способ изготовления пористого углеродного каркаса — основы композиционного материала [9]: армирующий углеродный каркас конструкционной прочности и объемной плотностью $0,6 \pm 0,05$ г/см³ получается за счет переработки при помощи иглопробивной технологии нетканого окисленного ПАНа и его дальнейшего перевода в углеродное состояние путем серии термообработок. Использование высокоплотных (объемной плотностью до 2,0 г/см³) углерод-углеродных композитов (УУКМ) осо-

бенно актуально для силовых элементов пресс-форм горячего прессования (цилиндрические обечайки) взамен традиционно используемых графитов, не обладающих достаточной механической прочностью, а также в осесимметричных деталях и узлах теплонагруженных конструкций ракетно-космической техники (вкладыши критического сечения сопла, сопловые насадки, теплозащитные экраны и т. д.).

Технология получения материала. Известны два технологических способа формирования объемной цилиндрической заготовки путем намотки нетканого холста из окисленного ПАНа на металлическую оправку [10, 11].

При первом способе на изотропную оправку с некоторым усилием натяжения наматывается нетканое полотно, предварительно уплотненное гидроструйной обработкой (Spunlace-метод) — неким аналогом иглопробивания, при котором вместо игл с зазубринами применяются тончайшие водяные струи высокого давления [12, 13]. После снятия с оправки полученный полый цилиндр помещается в закрытую пресс-форму, где подвергается предварительному нагреву, осевому сжатию, снятию с оправки после остывания и дальнейшему циклу термообработок, в том числе и высокотемпературной. В результате получается изделие, материал которого должен обладать определённой плотностью и прочностью и при этом быть однородным и монолитным. Именно по этой причине намотанный цилиндр подвергается интенсивному осевому сжатию (прессованию). Как известно на примере технологии формирования толстостенных цилиндров из

армированных полимеров [14], в процессе намотки материала могут образоваться концентрические складки (свилы) вследствие натяжения последующих слоев, сжимающих предыдущие. Эта складчатость при снятии материала с оправки после осевого сжатия или после термообработки часто приводит к нарушению монолитности изделия и возникновению дефектов в виде расслоений. По этой причине монолитными получаются лишь изделия относительно малого диаметра и высоты.

Второй технологический способ получения осесимметричных изделий состоит в сочетании намотки относительно рыхлого механически иглопробитого нетканого холста на стальной вал с одновременным радиальным пробиванием заготовки (поперек намотки слоев) иглами обратной стреловидности и последующего осевого сжатия. Такой прием позволяет получать изделия с меньшим процентом брака и, наряду с этим, легче снимать образец с пресс-формы после этапа прессования.

В обоих способах далее следует снятие уплотненного прессованием цилиндра с оправки и серия термообработок для перевода уплотненной полимерной заготовки в углеродное состояние.

Известные модели намотки. Процесс намотки достаточно плотных и прочных армирующих систем на цилиндрические оправки достаточно хорошо разработан в теории механики композитных материалов [15–18]. Задача решается с привлечением дискретной теории механических явлений при фронтальном отверждении, предложенной в работе [16]. Этот подход к моделированию намотки позволяет проследить физику и кинетику процесса. Результат получается в виде интеграла двух переменных — текущего радиуса образовавшейся твердой фазы и координаты фронта роста (места конкретной намотки). В работе [16] изложена континуальная теория механики фронтального отверждения. Известны конечно-разностные модели анализа намотки композитов [17, 18], позволяющие оценить радиальные и окружные напряжения на

определенном витке материала, предварительно производя расчет этих напряжений на каждом из предыдущих витков.

В современных исследованиях средствами вычислительного комплекса ANSYS можно варьировать множество параметров, задаваемых при осуществлении намотки, однако зачастую это не позволяет выявить ключевые факторы, влияющие в конечном итоге на напряженное состояние получаемого материала.

Целями нашей работы было сравнительное исследование механизмов формирования структуры пористых углеродных цилиндрических каркасов с использованием двух различных технологий намотки нетканого холста из окисленного ПАНа — без иглопробивания и с иглопробиванием наматываемых слоев, а также создание новой модели аналитического типа в виде замкнутой формулы, позволяющей оценить радиальные и окружные напряжения, действующие на полимерный холст в процессе намотки.

Предлагаемая модель

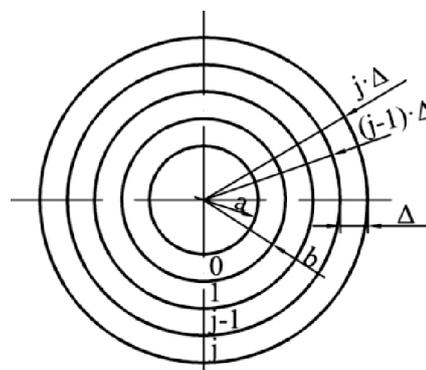


Рис. 1. Схематичное представление наматываемого цилиндра в виде набора большого числа колец

Fig. 1. Schematic representation of a winding cylinder in the form of a set of a large number of rings

На рис. 1 — принятая при разработке съема намотки. Здесь: a и b — внутренний и наружный радиусы оправки соответственно, мм; j — номер слоя материала холста; Δ — толщина слоя, мм

В случае намотки полотна на оправку без иглопробивания алгоритм решения следующий. Пусть на изотропную упругую металлическую оправку намотан $(j - 1)$ -й слой; толщина каждого слоя Δ . Далее на анизотропный материал, находящийся на изотропной упругой оправке, наматывается слой j с заданным натяжением. Наружный радиус для него $r_j = j\Delta$. Этот слой будет создавать в массиве предыдущих слоев напряжения сжатия. На него не оказывает влияния напряженно-деформированное состояние (НДС) предыдущей конструкции. Затем интегрированием всех предыдущих и последующих воздействий получается окончательное распределение напряжений.

Приведем основные соотношения для упругого композита:

$$\begin{aligned} \sigma_r(r) &= C_1 r^{-k-1} + C_2 r^{k-1}; \\ \sigma_\varphi(r) &= -kC_1 r^{-k-1} + kC_2 r^{k-1}. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $\sigma_r(r, R(t))$ и $\sigma_\varphi(r, R(t))$ – радиальные и окружные напряжения, действующие при намотке на текущем радиусе; k – коэффициент упругой анизотропии материала,

$$k = \sqrt{\frac{E_\varphi}{E_r}}; \quad E_\varphi, E_r - \text{модули Юнга материала}$$

соответственно в окружном и радиальном направлениях; C_1, C_2 – константы, зависящие от граничных условий.

Напряжения в изотропной оправке подчиняются выражениям

$$\begin{aligned} \sigma_{r0}^j &= C_{10}^j + \frac{C_{20}^j}{r^2}; \\ \sigma_{\varphi 0}^j &= C_{10}^j - \frac{C_{20}^j}{r^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Индекс внизу означает: первый – направление (r или φ); второй (0 – ноль) – принадлежность к оправке; индекс сверху показывает, от действия какого наматываемого по порядку слоя возникли эти напряжения (j – означает, что от действия j -го намотанного слоя).

Граничные условия для оправки:

при $r = a$ принимаем

$$\sigma_{r0}^j = 0;$$

при $r = b$

$$\begin{aligned} \sigma_{r0}^j &= \sigma_{rT}^j; \\ \frac{1}{E_0}(\sigma_{\varphi 0}^j - \nu_0 \sigma_{r0}^j) &= \frac{1}{E_\varphi}(\sigma_{\varphi T}^j - \nu_{r\varphi} \sigma_{rT}^j). \end{aligned} \quad (3)$$

Граничные условия для массива анизотропного композита:

при $r = b + (j - 1)\Delta$ полагаем

$$\begin{aligned} \sigma_{rT}^j &= \sigma_{rj}^j; \\ \sigma_{\varphi T}^j &= \sigma_{\varphi j}^j + \frac{\sigma^*}{E_\varphi}; \end{aligned} \quad (4)$$

при $r = b + j\Delta$

$$\sigma_{rj}^j = 0.$$

Используя граничные условия (3) и (4) и выражения (1), (2), получим систему уравнений

$$\left\{ \begin{aligned} C_{10}^j + \frac{C_{20}^j}{a^2} &= 0; \\ C_{1,0}^j + \frac{C_{2,0}^j}{b^2} &= C_{1T}^j b^{k-1} + C_{2T}^j b^{-(k+1)}; \\ \frac{1}{E_0}[(1-\nu_0)C_{1,0}^j - \frac{C_{2,0}^j}{b^2}(1+\nu_0)] &= \\ = \frac{1}{E_\varphi}[C_{1T}^j b^{k-1}(k-\nu_{r\varphi}) - C_{2T}^j b^{-(k+1)}(k+\nu_{r\varphi})]; \\ C_{1T}^j [b+(j-1)\Delta]^{k-1} + C_{2T}^j [b+(j-1)\Delta]^{-(k+1)} &= \\ = C_{1j}^j [b+(j-1)\Delta]^{k-1} + C_{2j}^j [b+(j-1)\Delta]^{-(k+1)}; \\ C_{1T}^j [b+(j-1)\Delta]^{k-1} - C_{2T}^j [b+(j-1)\Delta]^{-(k+1)} &= \\ = C_{1j}^j [b+(j-1)\Delta]^{k-1} - C_{2j}^j [b+(j-1)\Delta]^{-(k+1)} + \frac{\sigma^*}{k}; \\ C_{1j}^j [b+j\Delta]^{k-1} + C_{2j}^j [b+j\Delta]^{-(k+1)} &= 0. \end{aligned} \right. \quad (5)$$

Из решения системы (5) получим

$$\begin{aligned} C_{1T}^j &= \frac{\sigma^*}{2k} [b+(j-1)\Delta]^{-k+1} \times \\ &\times \left(1 - \frac{(B+[b+(j-1)\Delta]^{2k})}{[b+j\Delta]^{2k} + B} \right); \\ C_{2T}^j &= \frac{\sigma^*}{2k} [b+(j-1)\Delta]^{-k+1} \times \\ &\times B \frac{[b+j\Delta]^{2k} - [b+(j-1)\Delta]^{2k}}{[b+j\Delta]^{2k} + B}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $C = \frac{B}{A}$; $A = \frac{E_\phi}{2k} \left[\frac{(1-\nu_0)}{E_0} + \frac{a^2(1+\nu_0)}{b^2 E_0} + \frac{(b^2-a^2)}{b^2} \times \right.$
 $\left. \times \frac{(k+\nu)}{E_\phi} \right]$; $B = [(b^2 - a^2)b^{(k-1)} - b^{k+1}A]b^{k-1}$.

Теперь подставим (6) в (1) и получим для одного j -го слоя

$$\begin{aligned} \sigma_r(r) = & \left[\frac{\sigma_\phi^*}{2k} [b + (j-1)\Delta]^{-k+1} \times \right. \\ & \times \left(1 - \frac{(B + [b + (j-1)\Delta]^{2k})}{[b + j\Delta]^{2k} + B} \right) \Big] r^{k-1} + \\ & + \left[\frac{\sigma_\phi^*}{2k} [b + (j-1)\Delta]^{-k+1} \times \right. \\ & \left. \times B \frac{[b + j\Delta]^{2k} - [b + (j-1)\Delta]^{2k}}{[b + j\Delta]^{2k} + B} \right] r^{-k-1}. \end{aligned} \quad (7)$$

Суммируя все слои в массиве композитной оболочки, получим

$$\begin{aligned} \sigma_r(r) = & \frac{r^{k-1}}{2k} \sum \sigma_\phi^* [b + (j-1)\Delta]^{-k+1} \times \\ & \times \frac{[b + j\Delta]^{2k} - [b + (j-1)\Delta]^{2k}}{[b + j\Delta]^{2k} + B} + \\ & + \frac{r^{-k-1}}{2k} \sum \left[\sigma_\phi^* [b + (j-1)\Delta]^{-k+1} \times \right. \\ & \left. \times B \frac{[b + j\Delta]^{2k} - [b + (j-1)\Delta]^{2k}}{[b + j\Delta]^{2k} + B} \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

Произведем замены:

$$\begin{aligned} b + (j-1)\Delta &= \xi; \\ [b + j\Delta]^{2k} - [b + (j-1)\Delta]^{2k} &= d(\xi^{2k}). \end{aligned} \quad (9)$$

Подставим в (8) и получим

$$\sigma_r(r) = \left(r^{k-1} + \frac{B}{r^{k+1}} \right) \int \frac{\sigma_\phi^*}{\xi^k + B\xi^{-k}} d\xi. \quad (10)$$

Запишем уравнение равновесия для элементарного тела:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = \frac{\sigma_\phi - \sigma_r}{r}. \quad (11)$$

Подставим (11) в (10) и получим

$$\begin{aligned} \sigma_\phi(r) = & \sigma_\phi^*(r) - \\ & - k \left(r^{k-1} - \frac{B}{r^{k+1}} \right) \int \frac{\sigma_\phi^*}{\xi^k + B\xi^{-k}} d\xi, \end{aligned} \quad (12)$$

где $C = \frac{B}{A}$; $A = \frac{E_\phi}{2k} \left[\frac{1-\nu_0}{E_0} + \frac{a^2(1+\nu_0)}{b^2 E_0} + \frac{b^2-a^2}{b^2} \times \right.$
 $\left. \times \frac{k+\nu_{r\phi}}{E_\phi} \right]$, $B = (b^2 - a^2)b^{2(k-1)} - b^{2k}A$.

Здесь E_ϕ , E_0 – окружной модуль упругости соответственно композита и оправки; a , b – внутренний и внешний радиусы оправки;

$k = \sqrt{\frac{E_\phi}{E_r}}$ – коэффициент упругой анизотропии;

ν_0 , $\nu_{r\phi}$ – коэффициенты Пуассона соответственно оправки и композита.

Из анализа выражения (10) следует, что уровень радиальных напряжений зависит от коэффициента анизотропии наматываемого материала.

При рассмотрении варианта намотки полотна на оправку с иглопробиванием логика анализа следующая. Поскольку волокна окисленного ПАНа в плоскости полотна распределены хаотически, то полотно в своей плоскости изотропно, т.е. можно считать, что в каждом из направлений вдоль и поперек полотна работает половина волокон (половина – ориентированных вдоль, а вторая половина – поперек). Игла с зазубринами захватывает некоторое количество волокон из плоскости полотна и переводит их в перпендикулярное направление. Поскольку диаметр совокупности захваченных волокон (менее 1 мм) весьма мал по сравнению с длиной волокон (50–70 мм), то в месте прохода иглы образуется ослабленное место, т.е. жесткость полотна в плоскости полотна в данном месте существенно падает. И, хотя в этот слой полотна входят перпендикулярно ему волокна из последующих слоев, они уже практически не прибавляют жесткости материалу в плоскости полотна, но создают перпендикулярно полотну его связь с соседними слоями. Данные волокна создают жесткость

на растяжение (сжатие) в направлении перпендикулярно слоям, формируя пространственный каркас для будущего пространственно армированного композита. При намотке вследствие прошивки жесткость материала между линиями прошивки уменьшается ($D = E \cdot S$). Следовательно, уменьшаются сила натяжения и, практически, (при неизменном поперечном сечении полотна) модуль Юнга вдоль полотна (в наматываемом цилиндре это E_ϕ), а следовательно, и напряжение натяжения σ_ϕ . Тогда уменьшится и радиальное напряжение σ_r .

Известные условия равновесия тонкого цилиндрического слоя:

$$\frac{T}{H\delta} = \sigma_\phi; \quad \sigma_r 2r = 2T = \sigma_\phi H\delta = \sigma_\phi S.$$

Здесь H – ширина; δ – толщина наматываемого слоя; T – сила натяжения.

Следовательно, каждый последующий слой с прошивкой будет создавать меньшее давление на все предыдущие слои, включая оправку. Это означает, что увеличение (благодаря прошивке) модуля Юнга в радиальном направлении каркаса приводит к уменьшению давления на оправку. Наличие радиальных волокон, соединяющих наматываемые слои, должно существенно увеличить трансверсальную (радиальную) прочность каркаса (без иглопрошивания трансверсальная прочность каркаса практически равна нулю). При этом существенно уменьшается коэффициент Пуассона, и давление на

оправку практически не меняется. Такой каркас в результате должен легче сдвигаться с оправки в направлении оси Z , ибо сила трения уменьшается. Без иглопробивания у каркаса сравнительно большой коэффициент Пуассона, следовательно, при осевом сжатии внутренний диаметр увеличивается и должно облегчаться снятие намотанного цилиндра с оправки. Но на практике все наоборот: вероятно, довольно рыхлые слои без прошивки при осевом сжатии теряют устойчивость и дополнительно зажимают оправку.

Экспериментальная часть и численный расчет

Испытания на растяжение. Для исследования свойств каркасов, не подвергшихся иглопробиванию, были вырезаны образцы, представляющие собой пластину длиной 50 мм и шириной 9,5 мм. Образцы устанавливали в захваты разрывной машины Instron и определяли предельные напряжения и деформации. Результаты испытаний приведены в таблице. Типичные диаграммы разрушения представлены на рис. 2. Также были испытаны образцы, подвергшиеся механическому иглопробиванию, длиной 60 мм и шириной 27 мм.

Испытание на растяжение «войлока» (т. е. без прошивки) проводились при следующих условиях:

Скорость испытания	10,0 мм/мин
Температура	22,0 °С
Ширина образца	9,5 мм
Длина	50,0 мм

Физико-механические характеристики при растяжении вдоль полотна (без иглопрошивания)

Mechanical characteristics of tension along the non-woven web (without needle-punching)

Номер образца	Модуль упругости, МПа	Предел прочности, МПа	Удлинение при разрыве, %	Нагрузка при максимуме, Н	Ширина образца, мм	Толщина образца, мм
1	45,4	2,5	10,9	282,73	9,5	12,0
2	43,2	2,6	13,8	299,83	9,5	12,0
3	33,4	1,9	11,4	212,47	9,5	12,0
4	39,2	2,1	14,4	238,85	9,5	12,0
5	40,6	2,2	11,5	246,89	9,5	12,0
Среднее	40,4	2,2	12,4	256,15	9,5	12,0

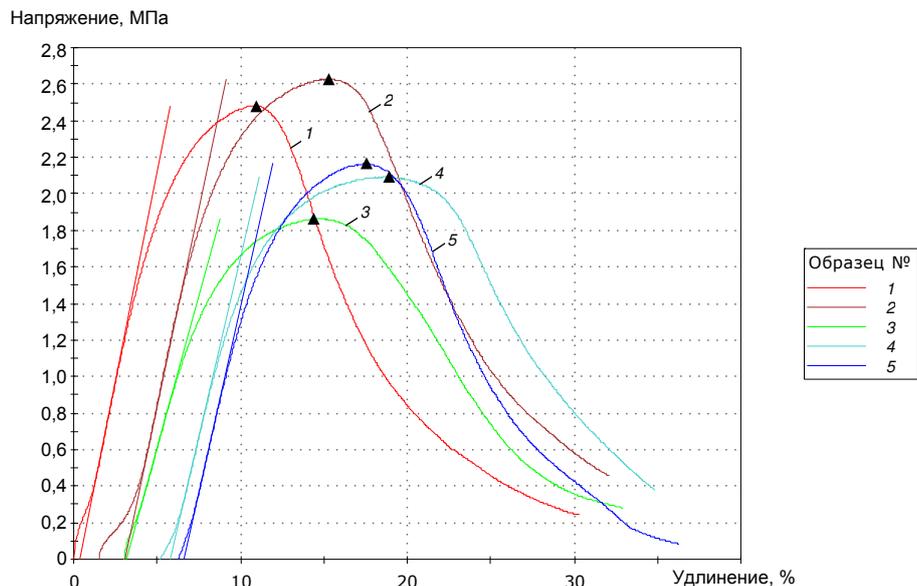


Рис. 2. Диаграмма растяжения образцов 1–5 материала каркаса вдоль полотна без иглопробивания

Fig. 2. Tensile strength of the polymer perform 1–5 along the non-woven web without needle-punching

Параметры испытаний на растяжение иглопробивного материала:

Скорость испытания.....	10,0 мм/мин
Температура.....	22,0 °С
Ширина образца.....	27,0 мм
Длина.....	60,0 мм
Количество образцов.....	5 шт.

Физико-механические характеристики при растяжении вдоль полотна (с иглопробиванием):

Модуль упругости.....	1,5 МПа
Предел прочности.....	0,4 МПа
Удлинение при разрыве.....	36,6 %
Нагрузка при максимуме нагрузки.....	157,90 Н
Ширина образца.....	27,0 мм
Толщина образца.....	13,0 мм

Типовой график диаграммы растяжения для образцов материала с иглопробиванием представлен на рис. 3.

Как видно из приведенных результатов испытаний, характеристики иглопробивных каркасов существенно изменились. Установлено, что модуль Юнга вдоль полотна уменьшился примерно в 26 раз,

прочность при растяжении уменьшилась в пять раз, при этом деформация удлинения увеличилась в три раза. Это означает, что серьезного уплотнения при намотке с иглопробиванием не происходит. Однако в результате радиального иглопробивания получилось новое распределение волокон по пространству каркаса. Появились волокна, связывающие слои в трансверсальном (здесь – в радиальном) направлении.

К плотности материала каркаса из окисленного ПАН-волокна предъявляются конкретные требования, указанные выше, чем и определяется содержание углеродного армирующего волокна в будущем трехмерно армированном углерод-углеродном композите. Для иглопробивных каркасов сравнительно высокой плотности можно добиться прессованием вдоль оси намотанного цилиндра. Кроме того, серию термообработок массива волокон для его превращения в углеродное состояние с ориентированной структурой следует проводить в стесненных условиях, применяя специальные фиксирующие оснастки.

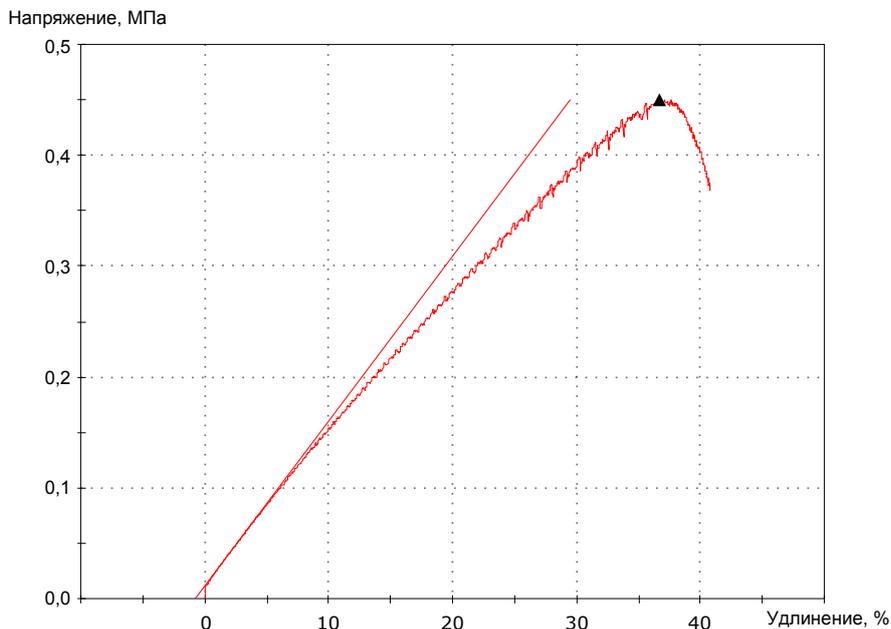


Рис. 3. Типовой график диаграммы растяжения образцов материала с иглопробиванием

Fig. 3. Typical tensile diagram of specimens of needle-punched material

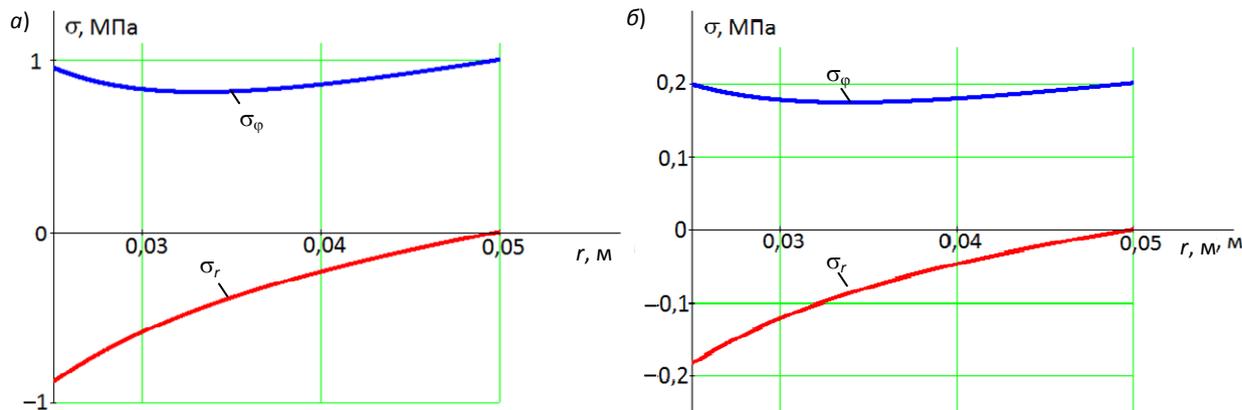


Рис. 4. Диаграммы радиальных и окружных напряжений в случае намотки без радиальной прошивки (а) и при радиальном иглопробивании (б)

Fig. 4. Diagrams of radial and circumferential stresses during winding without (а) and with radial needle-punching (б)

Оптические измерения. Коэффициенты Пуассона материала были оценены по методике оптического измерения катетометром (по точечным отметкам маркеров) поперечных перемещений пакета холстов при приложении к нему сжимающих напряжений. Начало отсчета соответствовало свободному положению образца (до приложения сжимающей нагрузки), а окончание – положению образца, при котором началась потеря устойчивости.

На основании экспериментальных данных с использованием полученных выражений для окружных и радиальных напряжений произведены численные расчеты; их результаты представлены на диаграммах напряжений (рис. 4).

Результаты численных расчетов. Условия, при которых производились расчеты:

1) в варианте без прошивки – $\sigma_{\varphi}^* = 1$ МПа; $E_0 = 2 \cdot 10^5$ МПа; $\nu_0 = 0,33$; $E_{\varphi} = 40,4$ МПа; $E_r = 30$ МПа; $a = 23$ мм; $b = 25$ мм; $R(t) = 50$ мм = const; $\nu = 0,05$;

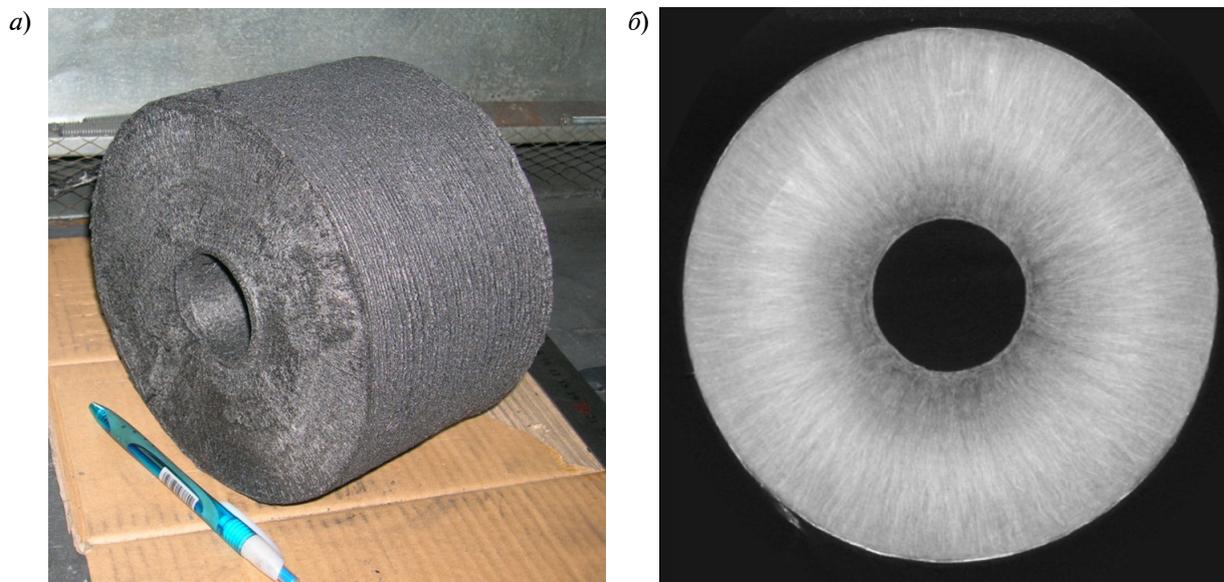


Рис. 5. Внешний вид массивного углеродного каркаса (внешний диаметр \varnothing 175 мм) после карбонизации (а); томографическое изображение микроструктуры поперечного среза (б), видна характерная анизотропия

Fig. 5. Appearance of a large carbon preform (outer diameter \varnothing 175 mm) after carbonization (a); tomographic image of the cross-section microstructure (b), the typical anisotropy is taken place

2) в варианте с радиальным иглопробиванием – $\sigma_{\varphi}^* = 0,2$ МПа; $E_0 = 2 \cdot 10^5$ МПа; $\nu_0 = 0,33$; $E_{\varphi} = 1,5$ МПа; $E_r = 10$ МПа; $a = 23$ мм; $b = 25$ мм; $R(t) = 50$ мм = const; $\nu = 0,01$

Как видно из рис. 4, уровень напряжений в случае каркасов с радиальным иглопробиванием оказывается в несколько раз ниже, чем при отсутствии иглопробивания.

Анализ полученных результатов

Установлено: применение для массивных цилиндрических объектов радиального армирования путем иглопробивания изменяет степень анизотропии материала; это приводит к уменьшению радиальных и окружных напряжений, снижает коэффициент Пуассона цилиндрического каркаса примерно в 5 раз (см. рис. 4) и модуль Юнга в окружном направлении, что позволяет избежать потери устойчивости при прессовании цилиндрических заготовок из окисленного ПАНа. Малые величины коэффициента Пуассона и модуля Юнга приводят к уменьшению давления прессованного материала на стенки пресс-формы, что существенно упрощает ее конструкцию

и операцию снятия с оснастки (распрессовку). Моделирование растущей заготовки при намотке позволяет следить за кинетикой напряженного состояния в системе «оправка – растущий упругий цилиндр».

При отсутствии иглопробивания намотанные слои слабо связаны между собой по сравнению с внутренними связями. Поскольку в этом случае модуль Юнга в окружном направлении выше значения модуля для случая иглопробивания, то давление на оправку, как видно из графиков рис. 4, заметно больше давления при намотке без иглопробивания. Но положительный коэффициент Пуассона слоистой структуры при последующем технологическом сжатии в осевом направлении приведет к ослаблению давления на внутреннюю оправку либо к отходу намотанного слоистого цилиндра от оправки. При последующем осевом сжатии внутренние тонкие и не связанные друг с другом слои почти неизбежно начнут терять устойчивость, создавая складчатость, которая оборачивается браком после термообработки. В процессе с иглопробиванием получается более рыхлая

структура каркаса с почти нулевым коэффициентом Пуассона. При последующем осевом прессовании эта структура равномерно сжимается без зажима или отхода от оправки.

Вся указанная совокупность факторов позволила сформировать качественную однородную заготовку на этапе прессования. В результате применения радиального армирования путем иглопробивания получены массивные цилиндрические каркасы (рис. 5, а), микроструктура которых демонстрирует характерную анизотропию (рис. 5, б).

Отчетливо различимое радиальное армирование обеспечивает дополнительное усиление механической прочности армирующего каркаса в радиальном направлении, что актуально для наиболее теплонагруженных элементов пресс-форм горячего прессования – цилиндрических обечаек. Полученные в дальнейшем УУКМ на основе радиально армированных цилиндрических каркасов продемонстрировали отсутствие в их структуре дефектов (трещин, расслоений).

Выводы

В результате проведенного теоретического и экспериментального исследования формирования структуры объемных цилиндрических каркасов при двух способах намотки на оправку нетканого холста из окисленного ПАНа установлено, что применение в процессе намотки радиального армирования путем иглопробивания изменяет степень анизотропии материала, приводя к уменьшению радиальных и окружных напряжений и позволяя избежать потери устойчивости при прессовании цилиндрических заготовок. Это дает возможность получить в результате последующих термообработок массивные углеродные каркасы с однородной бездефектной структурой.

Использована аналитическая модель напряженно-деформированного состояния полимерного холста при намотке на цилиндрическую оправку, позволяющая оценить радиальные и окружные напряжения практически на любом радиусе как для макетных, так и для промышленных заготовок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рудской А.И., Волков К.Н., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Физические процессы и технологии получения металлических порошков из расплава. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. 610 с.
2. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Алгоритм и технологические процессы синтеза порошковых деталей электронным лучом в вакууме // Технология машиностроения. 2015. № 1. С. 11–16.
3. Соколов Ю.А., Кондратьев С.Ю., Лукьянов А.А. Получение изделий из композиционных материалов методом электронно-лучевого синтеза и исследование их свойств // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 2. С. 35–41.
4. Соколов Ю.А., Павлушин Н.В., Кондратьев С.Ю. Новые аддитивные технологии с использованием пучка ионов // Вестник машиностроения. 2016. № 9. С. 72–76.
5. Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Новый подход к синтезу порошковых и композиционных материалов электронным лучом. Часть 1. Технологические особенности процесса // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. № 1 (727). С. 30–35.
6. Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А. Новый подход к синтезу порошковых и композиционных материалов электронным лучом. Часть 2. Практические результаты на примере сплава ВТ6 // Металловедение и термическая обработка металлов. 2016. № 3 (729). С. 40–44.
7. Рудской А.И., Белов И.М., Гордеев С.К., Барзинский О.В., Кондратьев С.Ю. Углеродные наноструктурные имплантаты для замещения костных дефектов и технология их изготовления // Металловедение и термическая обработка металлов. 2018. № 1 (751). С. 20–25.
8. Кокорин В.Н., Рудской А.И., Филимонов В.И., Бульжёв Е.М., Кондратьев С.Ю. Теория и практика процесса прессования гетерофазных увлажненных механических смесей на основе железа. Ульяновск: Изд-во УлГТУ, 2012. 236 с.
9. Патент РФ № 2620810 от 29.05.2017 г. Способ изготовления пористого каркаса – основы композиционного материала / Богачев



Е.А., Елаков А.Б., Белоглазов А.П., Денисов Ю.А., Тимофеев А.Н.

10. **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 // Сборник трудов XVII ежегодной научной конференции отдела полимеров и композиционных материалов ИХФ РАН. М., 2016. С. 12–13.

11. **Елаков А.Б., Богачев Е.А., Турусов Р.А.** Особенности формирования цилиндрических заготовок из штапельного окисленного полиакрилонитрила методами иглопробивных технологий для углерод-углеродных композитов // Сборник материалов VI Международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества»: Суздаль, 2016. С. 96.

12. **Горчакова В.М., Сергеенков А.П., Волощук Т.Е.** Оборудование для производства нетканых материалов. М.: Изд-во МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2006. Часть 2. 776 с.

13. **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.

14. **Турусов Р.А.** Адгезионная механика. Монография. М.: Изд-во НИУ МГСУ, 2016. 230 с.

15. **Турусов Р.А., Давтян С.П.** [и др.]. Механические явления в условиях распространения фронта отверждения // Доклады АН СССР. 1979. Т. 247. № 1. С. 97–99.

16. **Метлов В.В., Турусов Р.А.** О формировании напряженного состояния вязкоупругих тел, растущих в условиях фронтального отверждения // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1985. № 6. С. 145–160.

17. **Тарнопольский Ю.М., Портнов Г.Г.** Изменение усилия натяжения при намотке изделий из стеклопластика // Механика полимеров. 1966. № 2. С. 278–284.

18. **Бейль А.И., Мансуров А.Р., Портнов Г.Г., Тринчер В.К.** Модели для силового анализа намотки композитов // Механика композитных материалов. 1983. № 2. С. 303–313.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ЕЛАКОВ Александр Борисович – начальник группы ОАО «Композит»

E-mail: e_zann@mail.ru

ТУРУСОВ Роберт Алексеевич – доктор физико-математических наук главный научный сотрудник Института химической физики имени Н.Н. Семёнова Российской академии наук

E-mail: 79167505593@yandex.ru

БОГАЧЕВ Евгений Акимович – кандидат технических наук начальник отделения ОАО «Композит»

E-mail: eug-bogatchev@mail.ru

СЕРГЕЕВ Андрей Юрьевич – кандидат технических наук начальник группы ОАО «Композит»

E-mail: Sergeevandrey89@gmail.com

Дата поступления статьи в редакцию: 25.05.2018

REFERENCES

[1] **Rudskoy A.I., Volkov K.N., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A.**, Fizicheskiye protsessy i tekhnologii polucheniya metallicheskih poroshkov iz rasplava. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta, 2018. 610 s. (rus.)

[2] **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A.**, Algoritm i tekhnologicheskiye protsessy sinteza poroshkovykh detaley elektronnykh luchom v vakuume, *Tekhnologiya mashinostroyeniya*. 2015. № 1. S. 11–16. (rus.)

[3] **Sokolov Yu.A., Kondratyev S.Yu., Lukyanov A.A.**, Polucheniye izdeliy iz kompozitsionnykh materialov metodom elektronno-luchevogo sinteza i issledovaniye

ikh svoystv, *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2015. № 2. S. 35–41. (rus.)

[4] **Sokolov Yu.A., Pavlushin N.V., Kondratyev S.Yu.**, Novyye additivnyye tekhnologii s ispolzovaniyem puchka ionov, *Vestnik mashinostroyeniya*. 2016. № 9. S. 72–76. (rus.)

[5] **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A.**, Novyy podkhod k sintezu poroshkovykh i kompozitsionnykh materialov elektronnykh luchom. Chast 1. Tekhnologicheskiye osobennosti protsessa, *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2016. № 1 (727). S. 30–35. (rus.)

[6] **Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A.**, Novyy podkhod k sintezu poroshkovykh i kompozitsionnykh materialov elektronnyim luchom. Chast 2. Prakticheskiye rezultaty na primere splava VT6, *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2016. № 3 (729). S. 40–44. (rus.)

[7] **Rudskoy A.I., Belov I.M., Gordeyev S.K., Barzinskiy O.V., Kondratyev S.Yu.** Uglerodnyye nanostrukturnyye implantaty dlya zameshcheniya kostnykh defektov i tekhnologiya ikh izgotovleniya, *Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov*. 2018. № 1 (751). S. 20–25. (rus.)

[8] **Kokorin V.N., Rudskoy A.I., Filimonov V.I., Bulyzhev Ye.M., Kondratyev S.Yu.**, Teoriya i praktika protsessa pressovaniya geterofaznykh uvlazhnennykh mekhanicheskikh smesey na osnove zheleza. Ulyanovsk: Izd-vo UIGTU, 2012. 236 s. (rus.)

[9] **Patent RF № 2620810 ot 29.05.2017 g.** Sposob izgotovleniya poristogo karkasa-osnovy kompozitsionnogo materiala / Bogachev Ye.A., Yelakov A.B., Beloglazov A.P., Denisov Yu.A., Timofeyev A.N. (rus.)

[10] **Yelakov A.B., Bogachev Ye.A., Turusov R.A.**, Sravneniye dvukh tekhnologicheskikh podkhodov pri formirovani tsilindricheskikh zagotovok dlya shtapelnogo okislennogo poliakrilonitrila dlya uglerod-uglerodnykh kompozitov, *Sbornik trudov XVII yezhegodnoy nauchnoy konferentsii otdela polimerov i kompozitsionnykh materialov IKhF RAN*. M., 2016. S.12–13. (rus.)

[11] **Yelakov A.B., Bogachev Ye.A., Turusov R.A.**, Osobennosti formirovaniya tsilindricheskikh zagotovok iz shtapelnogo okislennogo poliakrilonitrila

metodami igloprobivnykh tekhnologiy dlya uglerod-uglerodnykh kompozitov, *Sbornik materialov VI Mezhdunarodnoy konferentsii s elementami nauchnoy shkoly dlya molodezhi «Funksionalnyye nanomaterialy i vysokochistyye veshchestva»*: Suzdal, 2016. –S. 96. (rus.)

[12] **Gorchakova V.M., Sergeyenkov A.P., Voloshchik T.Ye.**, Oborudovaniye dlya proizvodstva netkanykh materialov. M.: Izd-vo MGTU im. A.N. Kosygina, 2006. Chast 2. 776 s. (rus.)

[13] **Abdullin I.Sh., Ibragimov R.G., Muzafarova G.Sh., Samatova E.M.**, Sovremennyye tekhnologii proizvodstva netkanykh materialov, *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2014. T.17, № 19. S. 114–119. (rus.)

[14] **Turusov R.A.**, Adgezionnaya mekhanika. Monografiya. M.: Izd-vo NIU MGSU, 2016. 230 s. (rus.)

[15] **Turusov R.A., Davtyan S.P. [i dr.]**, Mekhanicheskiye yavleniya v usloviyakh rasprostraneniya fronta otverzheniya, *Doklady AN SSSR*. 1979. T. 247. № 1. S. 97–99. (rus.)

[16] **Metlov V.V., Turusov R.A.**, O formirovani napryazhennogo sostoyaniya vyazkouprugikh tel, rastushchikh v usloviyakh frontalnogo otverzheniya, *Izv. AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela*. 1985. № 6. S. 145–160. (rus.)

[17] **Tarnopolskiy Yu.M., Portnov G.G.**, Izmeneniye usiliya natyazheniya pri namotke izdeliy iz stekloplastika, *Mekhanika polimerov*. 1966. № 2. S. 278–284. (rus.)

[18] **Beyl A.I., Mansurov A.R., Portnov G.G., Trincer V.K.**, Modeli dlya silovogo analiza namotki kompozitov, *Mekhanika kompozitnykh materialov*. 1983. № 2. S. 303–313. (rus.)

THE AUTHORS

ELAKOV Aleksandr B. – JSC «Kompozit»

E-mail: e_zann@mail.ru

TURUSOV Robert A. – *Semenov Institute of Chemical Physics Russian academy of sciences*

E-mail: 79167505593@yandex.ru

BOGACHEV Evgenii A. – JSC «Kompozit»

E-mail: eug-bogatchev@mail.ru

SERGEEV Andreii Yu. – JSC «Kompozit»

E-mail: Sergeevandrey89@gmail.com

Received: 25.05.2018