

Научная статья

УДК 67.02

EDN STJKVX

<https://doi.org/10.34216/2587-6147-2024-4-66-47-54>

**Илья Владимирович Магнитский<sup>1</sup>**

**Мария Владимировна Магнитская<sup>2</sup>**

**Дмитрий Алексеевич Цветков<sup>3</sup>**

**Михаил Алексеевич Любченко<sup>4</sup>**

**Сергей Владимирович Палочкин<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3</sup> Акционерное общество «Композит», г. Королев, Россия

<sup>4,5</sup> Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия

<sup>1</sup> [masshka1@gmail.com](mailto:masshka1@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0006-1347-2674>

<sup>2</sup> [soleylju@gmail.com](mailto:soleylju@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0001-6956-4347>

<sup>3</sup> [cvetolom@yandex.ru](mailto:cvetolom@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0007-4890-8252>

<sup>4</sup> [ma.ljubchenko@yandex.ru](mailto:ma.ljubchenko@yandex.ru), <https://orcid.org/0009-0005-9917-3976>

<sup>5</sup> [palnigs@mail.ru](mailto:palnigs@mail.ru), <https://orcid.org/0009-0005-6192-0243>

## МОДЕЛЬ ВНУТРЕННИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ЗАГОТОВКАХ УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ИГЛОПРОБИВНЫХ КАРКАСОВ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ НАМОТКИ ТКАНИ

Работа выполнена в рамках соглашения от 04.12.2023 №41/12-23 о предоставлении гранта  
Правительства Московской области в сферах науки, технологии и инноваций

**Аннотация.** В данной работе приводятся результаты построения модели внутренних остаточных напряжений, возникающих при изготовлении заготовок углерод-углеродных композиционных материалов на основе иглопробивных осесимметричных армирующих каркасов, полученных методом намотки ткани с одновременным иглопробитием, уплотненных пироуглеродной матрицей термодиффузионным способом. Проведены расчеты изменения напряженно-деформационного состояния заготовки материала, возникающего в процессе ее изготовления при нагреве и охлаждении. Получены основные зависимости уровня напряжений от технологических параметров изготовления заготовок, оценены величина и опасность с точки зрения возникновения дефектов различных напряжений. Результат проведенных расчетов показывает, что радиальные напряжения прямо пропорциональны перепаду температур при охлаждении заготовки. Показано, что чем больше толщина заготовки материала, тем выше в ней радиальные напряжения. Полученные результаты могут быть полезны при оптимизации параметров технологии изготовления данного класса материалов.

**Ключевые слова:** углерод-углеродный композиционный материал, углеродная ткань, намотка, пироуглерод, внутренние напряжения, дефекты, иглопробивной каркас

**Для цитирования.** Модель внутренних напряжений в заготовках углерод-углеродных композиционных материалов на основе иглопробивных каркасов, изготовленных методом намотки ткани / И. В. Магнитский, М. В. Магнитская, Д. А. Цветков, М. А. Любченко, С. В. Палочкин // Технологии и качество. 2024. № 4(66). С. 47–54. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2024-4-66-47-54>.

Original article

**Ilya V. Magnitsky<sup>1</sup>**

**Maria V. Magnitskaya<sup>2</sup>**

**Dmitry A. Tsvetkov<sup>3</sup>**

**Mikhail A. Lyubchenko<sup>4</sup>**

**Sergey V. Palochkin<sup>5</sup>**

<sup>1,2,3</sup> Joint-Stock Company “Kompozit”, Korolev, Russia

<sup>4,5</sup> Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

## MODEL OF INTERNAL STRESS IN BLANKS OF CARBON-CARBON COMPOSITE MATERIALS BASED ON NEEDLE-PUNCHED FRAMEWORKS MANUFACTURED BY THE FABRIC WINDING METHOD

**Abstract.** *This paper presents the results of constructing a model of internal residual stresses arising during the manufacture of blanks of carbon-carbon composite materials based on needle-punched axisymmetric reinforcing frames, obtained by the method of winding fabric with simultaneous needle-punching, compacted with a pyrolytic carbon matrix using a thermogradient method. Calculations were carried out for changes in the stress-strain state of a material workpiece that arise during its manufacture during heating and cooling. The main dependencies of the stress level on the technological parameters of blank manufacturing are obtained, the magnitude and danger from the point of view of occurrence of defects of various stresses are estimated. The main dependencies of the stress level on the technological parameters of blank manufacturing are obtained, the magnitude and danger from the point of view of occurrence of defects of various stresses are estimated. The result of the calculations shows that radial stresses are directly proportional to the temperature difference during cooling of the blank. It is shown that the greater the thickness of the material blank, the higher the radial stresses in it. The results obtained can be useful in optimizing the parameters of the manufacturing technology of this class of materials.*

**Keywords:** *carbon-carbon composite material, carbon fabric, winding, pyrolytic carbon, internal stresses, defects, needle-punched frame*

**For citation:** Magnitsky I. V., Magnitskaya M. V., Tsvetkov D. A., Lyubchenko M. A., Palochkin S. V. Model of internal stress in blanks of carbon-carbon composite materials based on needle-punched frameworks manufactured by the fabric winding method. *Technologies & Quality*. 2024. No 4(66). P. 47–54. (In Russ.). <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2024-4-66-47-54>.

Углерод-углеродные композиционные материалы (УУКМ) все шире используются в современной технике в областях химического и энергетического машиностроения, легкой промышленности. Это объясняется их уникальной стойкостью к воздействию высоких температур и химической инертностью при нормальных условиях [1–3]. Такое расширение сферы применения приводит к увеличению как объемов выпуска, так и номенклатуры различных материалов, относящихся к этому классу. Данный процесс требует повышения стабильности характеристик УУКМ и снижения количества производственного брака, а также уменьшения издержек, связанных с разработкой и постановкой на производство вновь создаваемых материалов. Этим целям можно достичь только путем внедрения в практику не только моделей поведения УУКМ при эксплуатации изделий из них, но и моделей как производственного процесса в целом, так и отдельных его стадий, формируя таким образом цифровой двойник производства [4].

Одним из наиболее перспективных классов УУКМ являются материалы на основе иглопробивных армирующих каркасов, например, с цилиндрической симметрией свойств, полученных методом намотки ткани, уплотненные пироуглеродной матрицей [5]. Последняя образуется путем осаждения углерода из природного газа на нагретом до высокой температуры кар-

касе. Равномерная плотность материала формируется за счет применения термоградиентного метода, при реализации которого в заготовке материала образуется неоднородное температурное поле, позволяющее проводить осаждение матрицы в ограниченном объеме, нагретом до температуры разложения компонентов природного газа. Со временем этот объем смещается путем изменения температур, тем самым делая процесс уплотнения постепенным [2, 6]. Изготавливаемые таким образом УУКМ обладают высокими теплоизоляционными и прочностными характеристиками, а также сравнительно низкой стоимостью и коротким производственным циклом, что позволяет их применять в различных отраслях народного хозяйства.

Одним из основных факторов, приводящих к снижению прочностных характеристик УУКМ и возникновению в них внутренних дефектов в виде трещин и расслоений, являются внутренние напряжения, возникающие из-за разницы температур при формировании углеродной матрицы и при обработке, транспортировке, хранении и эксплуатации изделий из этих материалов [7–9]. В заготовках композиционных материалов с цилиндрической симметрией свойств такие напряжения образуются при изменении температуры даже в условиях однородного температурного поля в объеме заготовки.

Основной целью настоящей работы является построение модели распределения внут-

ренных напряжений в заготовке УУКМ с осесимметричной схемой армирования, возникающих во время уплотнения ее пироуглеродной матрицей. Возможность с достаточной точностью определять эти напряжения необходима для обоснованного выбора значений технологических параметров процесса уплотнения.

Рассмотрим процесс уплотнения заготовок УУКМ методом TG-CVI, детально описанным в литературе [2, 6]. При этом в качестве пористой среды используется иглопробивной каркас, полученный путем намотки мультиаксиальной ткани, а в качестве центрального стержня устанавливается графитовый трубчатый нагреватель, покрытый слоем графитовой фольги для удобства монтажа. Расчетная схема и применяемая в дальнейшем система координат приведены на рисунке 1.

При проведении технологического процесса уплотнения заготовок пироуглеродом согласно [2, 6] реализуется следующий температурный режим. В начале процесса внутренняя поверхность каркасов нагревается до температуры осаждения матрицы. Затем осуществляется рост температуры, сдвигающий фронт реакции на один заранее установленный шаг в радиальном направлении (см. рис. 1). После этого температура стабилизируется на время, достаточное для заполнения матрицей пористости в тонком слое, образованном этим шагом. Далее температура снова скачкообразно повышается, реализуя уплотнение следующего тонкого слоя. Этот цикл повторяется до тех пор, пока уплотненные слои не достигнут наружной поверхности заготовки, после чего садка охлаждается до комнатной температуры.

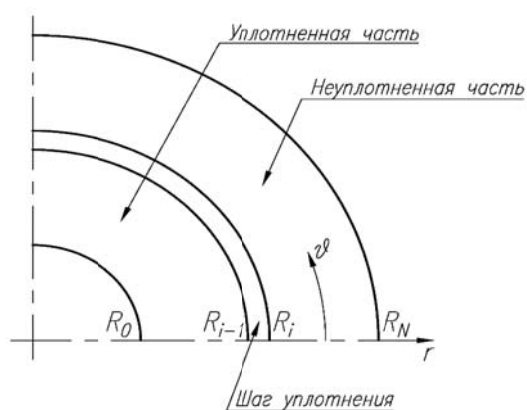


Рис. 1. Расчетная схема

Задача описания нестационарных процессов, происходящих в это время в материале, включающих химические, теплофизические и термомеханические явления, весьма сложна и требует значительного количества исходных

данных, не поддающихся определению с достаточной точностью. Однако ее решение в общем виде для описания характера распределения в заготовках внутренних напряжений нецелесообразно. Для упрощения этой задачи введем ряд упрощений и допущений.

Так, будем считать задачу плоской и осесимметричной, что обеспечивается формой заготовок и характером симметрии их свойств, определяющихся схемой армирования каркасов.

При решении тепловой задачи допустим, что нагрев заготовок имеет пассивный характер, а джоулево тепло выделяется только на графитовом нагревателе. При описании теплового состояния системы пренебрежем влиянием на него слоя графитовой фольги ввиду малости его толщины.

Также будем рассматривать только стационарные тепловые состояния садки, соответствующие моментам времени, непосредственно предшествующим началу нагрева для сдвига зоны уплотнения. Таким образом, весь процесс насыщения матрицей будет описываться конечным набором таких состояний.

Изменения теплопроводностей как армирующего каркаса, так и УУКМ, с температурой будем считать пренебрежимо малыми.

При термомеханических расчетах допустим, что за счет наличия слоя сравнительно податливой графитовой фольги напряженные состояния нагревателя и заготовок взаимно независимы, а следовательно, заготовки в ходе процесса уплотнения нагружены только внутренними термонапряжениями, образующимися за счет изменения ее температуры. При этом само осаждение пироуглерода в объеме текущей зоны уплотнения не создает дополнительных напряжений.

Ввиду значительной податливости неуплотненного каркаса по сравнению с УУКМ при термомеханических расчетах областью, в которой не произошло уплотнение, пренебрежем.

Поведение УУКМ будем считать линейно упругим, следовательно, напряжения, возникающие в нем на различных стадиях уплотнения, – подверженными действию принципа суперпозиции.

Таким образом, для определения внутренних напряжений в объеме заготовок рассматриваемого УУКМ необходимо:

- определить стационарные температурные поля в моменты, непосредственно предшествующие началу нагрева для сдвига зоны уплотнения;
- определить поля компонентов тензора напряжений в заготовке, образующиеся за счет изменений температурного поля между этими моментами;

– определить поля компонентов тензора напряжений в заготовке, образующиеся при финальном охлаждении ее до комнатной температуры.

Для определения температурного поля в частично уплотненной заготовке УУКМ по рисунку 1 необходимо решить стационарное дифференциальное уравнение теплопроводности:

$$r \frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{dT}{dr} = 0, \quad (1)$$

где  $T$  – температура.

Вид этого уравнения одинаков для уплотненной, находящейся в состоянии УУКМ, и неуплотненной, представляющей собой армирующий каркас, частей заготовки. Для получения частного решения необходимо дополнить его граничными условиями и условиями стыковки на границе между этими частями. Далее индексы «1» и «2» относят величину к насыщенной и ненасыщенной частям заготовки соответственно. На внутренней поверхности заготовки зададим граничные условия второго рода в виде

$$q_0 = -\lambda_1 \left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=R_0}, \quad (2)$$

где  $q_0$  – плотность теплового потока через внутреннюю поверхность заготовки;

$\lambda_1$  – теплопроводность в радиальном направлении.

На наружной поверхности заготовки зададим граничные условия четвертого рода:

$$\sigma_0 \varepsilon_0 \left( T_2^4 \Big|_{r=R_N} - \Theta^4 \right) = -\lambda_2 \left. \frac{dT_2}{dr} \right|_{r=R_N}, \quad (3)$$

где  $\sigma_0$  – постоянная Стефана – Больцмана;

$\varepsilon_0$  – интегральная степень черноты поверхности заготовки;

$\Theta$  – температура поверхности реактора.

Также сформулируем условия стыковки частей заготовки. Они сводятся к непрерывности на поверхности раздела последних как температуры, так и плотности теплового потока. Тогда можно записать:

$$T_1 \Big|_{r=R_i} = T_2 \Big|_{r=R_i} \quad (4)$$

и

$$-\lambda_1 \left. \frac{dT_1}{dr} \right|_{r=R_i} = -\lambda_2 \left. \frac{dT_2}{dr} \right|_{r=R_i}. \quad (5)$$

Здесь индекс  $i$  обозначает номер шага нагрева.

Дифференциальное уравнение (1) и условия (2)–(5) полностью формируют тепловую задачу. Решив ее, можно получить следующие зависимости температуры от радиальной координаты в обеих частях заготовки для  $i$ -го шага:

$$\begin{cases} T_{1i} = \frac{q_{0i} R_0}{\lambda_1} \ln \frac{R_i}{r} + \frac{q_{0i} R_0}{\lambda_2} \ln \frac{R_N}{R_i} + 4 \sqrt{\frac{q_{0i} R_0}{\sigma_0 \varepsilon_0 R_N}} + \Theta^4; \\ T_{2i} = \frac{q_{0i} R_0}{\lambda_2} \ln \frac{R_N}{r} + 4 \sqrt{\frac{q_{0i} R_0}{\sigma_0 \varepsilon_0 R_N}} + \Theta^4. \end{cases} \quad (6)$$

Неизвестную априори плотность теплового потока  $q_{0i}$ , соответствующую  $i$ -му шагу, можно найти из условия

$$T_1 \Big|_{r=R_i} = t, \quad (7)$$

где  $t$  – температура, при которой происходит осаждение пироуглерода.

С целью определения напряженного состояния заготовки УУКМ сформулируем задачу теории упругости. Ее основу составляет дифференциальное уравнение равновесия, в цилиндрических координатах для осесимметричной задачи имеющее вид

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\vartheta}{r} = 0, \quad (8)$$

где  $\sigma$  – напряжения, а индексы  $r$  и  $\vartheta$  здесь и далее относят величину к радиальному и окружному направлениям соответственно.

Уравнение (8) дополняют соотношения Дюамеля – Неймана:

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{\sigma_r}{E_r} - \frac{\nu_{\vartheta r} \sigma_\vartheta}{E_\vartheta} + \varepsilon_{Tr}; \\ \varepsilon_\vartheta = -\frac{\nu_{\vartheta r} \sigma_r}{E_\vartheta} + \frac{\sigma_\vartheta}{E_\vartheta} + \varepsilon_{T\vartheta}. \end{cases} \quad (9)$$

Здесь  $\varepsilon$  – относительные деформации;

$\varepsilon_T$  – относительные деформации, возникающие за счет теплового расширения;

$E$  и  $\nu$  – модули упругости и коэффициенты Пуассона материала.

Кроме того, в цилиндрических координатах справедливы соотношения между радиальными перемещениями  $u$  и деформациями:

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{du}{dr}; \\ \varepsilon_\vartheta = \frac{u}{r}. \end{cases} \quad (10)$$

Из равенств (8)–(10) можно получить дифференциальное уравнение относительно перемещений  $u$  вида

$$\beta \frac{d^2 u}{dr^2} + \frac{\beta}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} - \beta \frac{d\varepsilon_{Tr}}{dr} - \frac{\beta}{r} (1 - \nu_{9r}) \varepsilon_{Tr} - \beta \nu_{9r} \frac{d\varepsilon_{T9}}{dr} - \frac{\beta \nu_{9r}}{r} \varepsilon_{T9} + \frac{\varepsilon_{T9}}{r} = 0. \quad (11)$$

Здесь введено обозначение

$$\beta = \frac{E_r}{E_9}. \quad (12)$$

Поскольку согласно принятым допущениям и наружная, и внутренняя поверхности уплотненной части заготовки не испытывают внешней нагрузки, для  $i$ -го шага нагрева граничные условия можно записать в виде

$$\begin{cases} \sigma_r|_{r=R_0} = 0; \\ \sigma_r|_{r=R_i} = 0. \end{cases} \quad (13)$$

Решение уравнения (11) с граничными условиями (13) позволяет определить поля напряжений  $\sigma_r$  и  $\sigma_9$  по формулам:

$$\sigma_r = \frac{E_9 \beta}{1 - \nu_{9r}^2 \beta} \left( \frac{du}{dr} + \frac{\nu_{9r} u}{r} - \varepsilon_{Tr} - \nu_{9r} \varepsilon_{T9} \right) \quad (14)$$

и

$$\sigma_9 = \frac{E_9 \beta}{1 - \nu_{9r}^2 \beta} \left( \nu_{9r} \beta \frac{du}{dr} + \frac{u}{r} - \varepsilon_{T9} - \nu_{9r} \beta \varepsilon_{Tr} \right). \quad (15)$$

Зависимости  $\varepsilon_r(r)$  определяются двумя факторами: распределениями температуры по радиусу заготовки (6) для конкретного шага нагрева и дилатометрическими кривыми материала, приведенными ниже.

Поскольку слои уплотненного материала формируются последовательно, при каждом очередном шаге нагрева во всех уже осажденных слоях возникают термические напряжения

(14) и (15). Также они возникают и при окончательном охлаждении заготовки после завершения технологического процесса. Действующие значения этих напряжений в каждый момент времени равны сумме их значений, возникших на всех предыдущих этапах процесса, поскольку, как было отмечено выше, для системы выполняется принцип суперпозиции.

Ввиду значительной громоздкости итоговых соотношений, в настоящей статье мы их опустим.

К исходным данным, необходимым для проведения расчетов по изложенному методу, относятся значения теплофизических и физико-механических характеристик как готового УУКМ, так и армирующего каркаса, используемого при его изготовлении, а также размеры заготовок и ряд параметров, описывающих технологический процесс уплотнения. При этом следует заметить, что значения свойств целесообразно принять типовыми для данного класса материалов, поскольку диапазон их изменения сравнительно невелик. В то же время для размеров заготовок и технологических параметров правильнее рассмотреть некоторые диапазоны значений, чтобы выявить действующие в процессе зависимости внутренних напряжений в заготовках от них.

Типовые значения характеристик УУКМ приведены в таблице. Заметим, что их зависимость от температуры, как правило, незначительна, и ею можно пренебречь.

Примем необходимую для расчета температурных полей радиальную теплопроводность неуплотненного каркаса  $\lambda_2 = 0,2$  Вт/(м·К).

Температуру поверхности реактора можно принять равной  $\Theta = 323$  К, а комнатную температуру, до которой окончательно охлаждается заготовка,  $t_0 = 293$  К. Значения температуры осаждения пироуглерода  $t$  рассмотрим в диапазоне от 1073 до 1473 К.

Значения внешнего и внутреннего радиусов заготовки пусть варьируются в пределах от первых миллиметров до 100 мм.

Т а б л и ц а

Типовые значения характеристик УУКМ

Характеристика	Значение
Теплопроводность в радиальном направлении $\lambda_1$ , Вт/(м·К)	20
Модуль упругости в радиальном направлении $E_r$ , ГПа	5
Модуль упругости в окружном направлении $E_9$ , ГПа	30
Коэффициент Пуассона $\nu_{9r}$	0,3
Уравнение дилатометрической кривой в радиальном направлении $\varepsilon_{Tr}(T)$	$8 \cdot 10^{-10} T^2 + 5 \cdot 10^{-6} T - 0,002$
Уравнение дилатометрической кривой в кольцевом направлении $\varepsilon_{T9}(T)$	$2 \cdot 10^{-9} T^2 - 2 \cdot 10^{-6} T + 0,0012$
Предел прочности при растяжении в радиальном направлении $\sigma_{gr}$ , МПа	20
Предел прочности при растяжении в кольцевом направлении $\sigma_{g9}$ , МПа	80

Типовые распределения окружных напряжений в заготовке представлены на рисунке 2. Видно, что в конце процесса уплотнения перед началом охлаждения внутренняя часть заготовки испытывает сжимающие напряжения, а наружная – растягивающие. Напряжения, возникающие при охлаждении заготовки, имеют обратный характер зависимости от радиуса, при этом по абсолютному значению превосходя уровень напряжений, действующих в конце уплотнения. Поэтому после завершения охлаждения напряжения внутри заготовки растягивающие, а снаружи – сжимающие. Величина напряжений составляет около 10 % от типового предела прочности материала, что представляется незначительным.

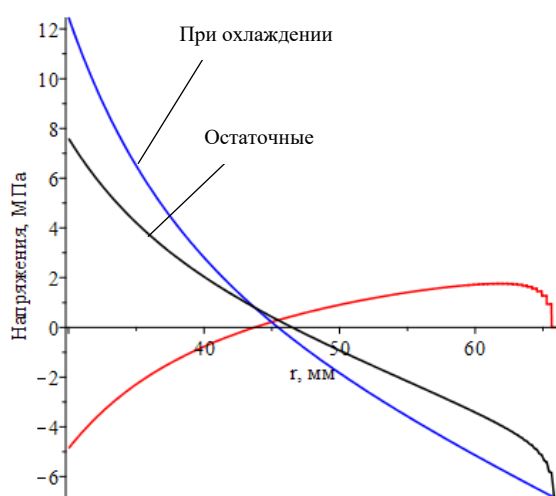


Рис. 2. Окружные напряжения

Графики аналогичных зависимостей радиальных напряжений приведены на рисунке 3.

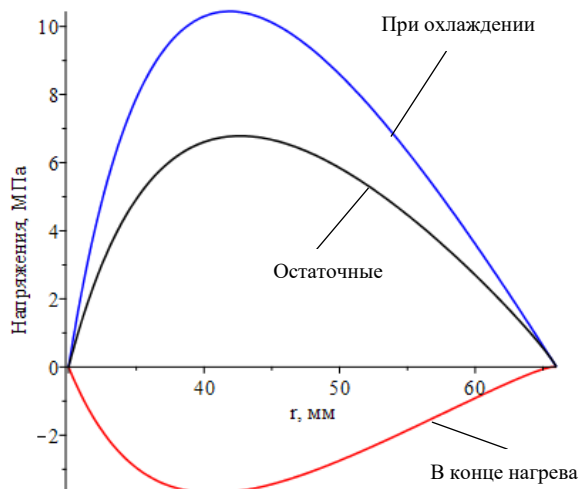


Рис. 3. Радиальные напряжения

В ходе уплотнения в заготовке возникают сжимающие напряжения, а при охлаждении – растягивающие. При этом остаточные напряжения носят именно растягивающий характер, причем их величина сравнима с пределом прочности материала при растяжении, что создает опасность возникновения расслоений. Таким образом, с точки зрения оптимизации технологических параметров уплотнения УУКМ наибольший интерес представляют именно радиальные напряжения. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Точка достижения максимума радиальных напряжений зависит только от размеров заготовки. Для удобства описания введем величину отношения наружного и внутреннего радиусов заготовки:

$$q = \frac{R_0}{R_N} \quad (16)$$

и относительную радиальную координату в виде

$$\rho = \frac{r - R_0}{R_N - R_0} \quad (17)$$

График зависимости  $\rho_m(q)$ , где  $\rho_m$  – координата максимума радиальных напряжений, имеет вид, показанный на рисунке 4. Наличие данной зависимости позволяет проводить идентификацию термических напряжений как причины возникновения расслоений в заготовках по локализации последних.

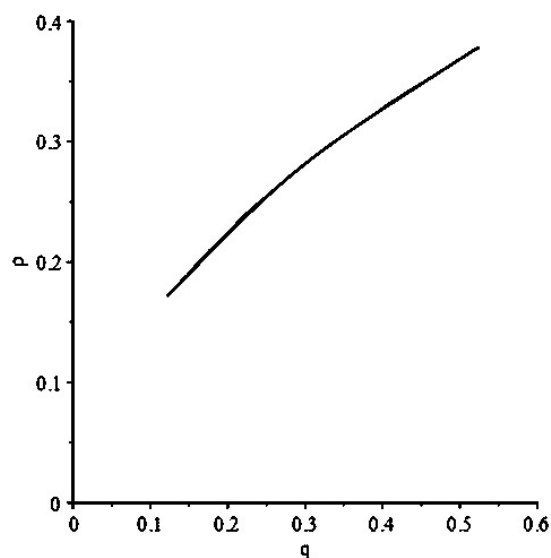


Рис. 4. Зависимость  $\rho_m(q)$

Зависимости максимальных значений радиальных напряжений  $\sigma_{rm}$  от величины  $q$  для различных температур осаждения пироуглерода  $t$

показаны на рисунке 5. Из приведенных данных ясно, что напряжения растут с ростом этой температуры. При этом чем выше значение  $q$ , тем напряжения  $\sigma_{rm}$  ниже.

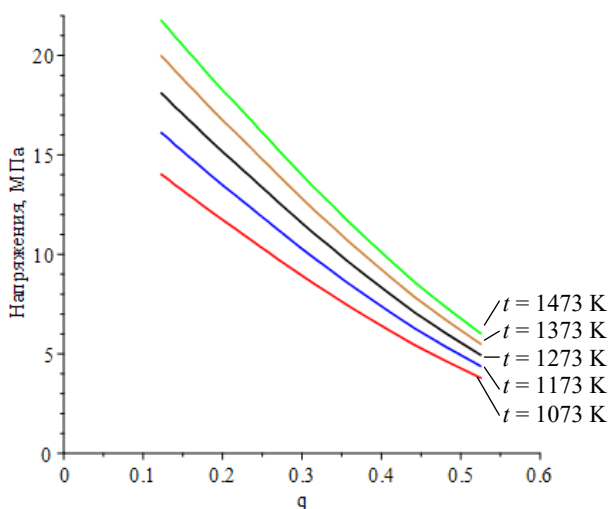


Рис. 5. Зависимость максимальных значений радиальных напряжений  $\sigma_{rm}$  от величины  $q$

Таким образом, если известны допускаемые радиальные напряжения при растяжении для изготавливаемого УУКМ, можно наложить обоснованные ограничения на комплекс вели-

чин ( $q$ ,  $\sigma_{rm}$ ), обеспечивающие отсутствие расслоений в заготовках.

Таким образом, разработанная в настоящей статье модель возникновения внутренних напряжений в заготовках УУКМ с осесимметричными схемами армирования может быть использована для оценки распределений температуры, радиальных и окружных напряжений в их объеме.

Проведенные расчеты показывают, что основную опасность представляют собой радиальные напряжения, формирующиеся на стадии охлаждения заготовок до комнатной температуры. Их уровень может быть сравним с соответствующим пределом прочности материала, что приводит к опасности возникновения в заготовках таких дефектов, как расслоения и трещины. Применением разработанной модели можно сформировать ограничения на технологические параметры изготовления УУКМ таким образом, чтобы они гарантировали безопасный уровень внутренних напряжений.

Результаты, полученные в настоящей работе, могут быть полезны при разработке цифровых двойников реальных производств УУКМ, анализе причин возникновения брака на них, разработке соответствующих предупреждающих и корректирующих мероприятий.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Фиалков А. С. Углерод, межслоевые соединения и композиты на его основе. М. : АспектПресс, 1997. 718 с.
2. Щурик А. Г. Искусственные углеродные материалы. Пермь, 2009. 342 с.
3. Morgan P. Carbon Fibers and their Composites. BocaRaton: CRC Press, 2005. 1131 p.
4. Кельтон В., Лоу А. Имитационное моделирование. Классика CS. 3-е изд. СПб. : Питер ; Киев : BHV, 2004. 847 с.
5. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites / A. P. Mouritz, M. K. Bannister, P. J. Falzon, K. H. Leong // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 1999. Vol. 30, No 12. P. 1445–1461.
6. Бушуев В. М., Мусин Р. К., Синани И. Л. Закономерности пироуплотнения тканопрошивных углеродных каркасов в термоградиентном режиме для изготовления герметичных конструкций // Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 1. С. 125–130.
7. Dimitrienko Yu. I. Modelling of carbon-carbon composite manufacturing processes // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. 1999. Vol. 30, No 3. P. 221–230.
8. Cowley K. D., Beaumont P. W. R. The measurement and prediction of residual stresses in carbon fibre/polymer composites // Composites Science and Technology. 1997. Vol. 57, No 11. P. 1445–1455.
9. Jiang T., Guan Z., Li Z. Process modelling of precursor impregnation and pyrolysis used in manufacturing ceramic-matrix composites // Ceramics International. 2021. Vol. 47, No 5. P. 7195–7206.

#### REFERENCES

1. Fialkov A. S. Carbon, interlayer compounds and composites based on it. Moscow, AspektPress Publ., 1997. 718 p. (In Russ.)
2. Shchurik A. G. Artificial carbon materials. Perm', 2009. 342 p. (In Russ.)
3. Morgan P. Carbon Fibers and their Composites. Boca Raton, CRC Press, 2005. 1131 p.
4. Kelton V., Lowe A. Simulation Modeling. CS Classics. 3 ed. Saint Petersburg, Piter Publ. ; Kiev, BHV Publ., 2004. 847 p. (In Russ.)

5. Mouritz A. P., Bannister M. K., Falzon P. J., Leong K. H.. Review of applications for advanced three-dimensional fibre textile composites // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1999;30,12:1445–1461.
6. Bushuev V. M., Musin R. K., Sinani I. L. The regularities of pyrocompaction tissue-sewed carbon framework in the gradient of temperature mode for production hermetic construction. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya* [Scientific and technical Bulletin of the Volga region]. 2012;1:125–130. (In Russ.)
7. Dimitrienko Yu. I. Modelling of carbon-carbon composite manufacturing processes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 1999;30,3:221–230.
8. Cowley K. D., Beaumont P. W. R. The measurement and prediction of residual stresses in carbon fibre/polymer composites. *Composites Science and Technology*. 1997;57,11:1445–1455.
9. Jiang T., Guan Z., Li Z. Process modelling of precursor impregnation and pyrolysis used in manufacturing ceramic-matrix composites. *Ceramics International*. 2021;47,5:7195–7206.

Статья поступила в редакцию 25.10.2024  
Принята к публикации 30.10.2024