

Казанский национальный исследовательский технический  
университет им. А.Н. Туполева – КАИ

Институт механики и машиностроения – обособленное структурное  
подразделение ФИЦ КазНЦ РАН

Научно-исследовательский институт конструкционных материалов  
на основе графита (НИИграфит)

## **СИНТАКТИЧЕСКИЕ УГЛЕРОДНЫЕ ПЕНЫ**

---

**ПОЛУЧЕНИЕ, СТРУКТУРА, СВОЙСТВА,  
ПРИМЕНЕНИЕ**

**КОЛЛЕКТИВНАЯ МОНОГРАФИЯ**

Казань, 2022

**Галимов Э.Р., Федяев В.Л., Абдуллин А.Л., Галимова Н.Я., Шарафутдинова Э.Э., Самойлов В.М., Данилов Е.А.** Синтактические углеродные пены: получение, структура, свойства, применение: коллективная монография / Э.Р. Галимов и др. – Казань: Изд-во Академии наук РТ, 2022. – 324 с.

**ISBN 978-5-9690-0974-5**

Приводятся сведения о строении, структуре, свойствах, технологии получения и применении материалов пенистой структуры, в том числе синтактических углеродных пен. Разработаны технологические маршруты и лабораторные технологии получения теплоизолирующих и теплопроводных углеродных пен. Представлены результаты экспериментальных исследований по определению оптимальных режимных параметров, обеспечивающих получение углеродных пен с заданной структурой и регулируемым комплексом эксплуатационных свойств. Исследовано влияние природы, состава, соотношения, сочетания и природы исходных компонентов на изменение теплофизических и физико-механических свойств углеродных пен. Проведено математическое описание отдельных стадий технологий получения пен, разработаны теоретические модели зависимостей свойств от параметров процессов получения и структуры пен. Предложена интегрированная технология, позволяющая получать широкий спектр сверхвысокотемпературных пористых материалов упорядоченной структуры для эксплуатации в экстремальных условиях.

Монография рекомендуется для бакалавров, магистров, научных, инженерно-технических работников, занимающихся вопросами разработки, технологий получения и применения углеродных материалов.

**Рецензенты:**

доктор технических наук, профессор **В.А. Петров:**  
Казанский национальный исследовательский технологический университет

доктор технических наук, профессор **С.Я. Алибеков:**  
Поволжский государственный технический университет (г. Йошкар-Ола)

**ISBN 978-5-9690-0974-5**

© Коллектив авторов, 2022

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Обозначения и сокращения</b> .....	6
<b>Введение</b> .....	7
<b>Глава 1 Углеродные пены</b> .....	10
1.1 Классификация и строение пен.....	10
1.2 Структура углеродных пен.....	16
1.3 Свойства углеродных пен.....	19
<b>Глава 2 Исходные материалы для получения углеродных пен</b> ..	23
2.1 Фенолоформальдегидные смолы.....	23
2.2 Уретановые полимеры.....	25
2.3 Меламиноформальдегидные смолы. Вспененный меламин.....	27
2.4 Пеки.....	27
2.5 Микросферы.....	31
<b>Глава 3 Технологии получения углеродных пен</b> .....	35
3.1 Получение пен карбонизацией наполненных микросферами полимеров.....	36
3.2 Вспенивание органических веществ с высоким выходом углеродистого остатка с их последующей карбонизацией.....	41
3.2.1 Непосредственное вспенивание углеродсодержащих веществ.....	42
3.2.2 Вспенивание углеродсодержащих веществ в присутствии порообразователей.....	47
3.3 Темплатная карбонизация органических веществ и полимеров.....	50
3.4 Прессование терморасширенного графита.....	52
3.5 Самосборка углеродных наночастиц.....	53
3.6 Способы, основанные на использовании коллоидных систем....	56
3.7 Способы, основанные на карбонизации природного сырья.....	57
3.8 Другие способы получения углеродных пен.....	60
3.9 Модифицированные углеродные пены.....	62
3.9.1 Модификация поверхности углеродных пен.....	62
3.9.2 Модификация углеродными и керамическими частицами.....	66
<b>Глава 4 Теплоизолирующие синтактические углеродные пены на основе стеклоуглерода</b> .....	70

4.1 Технологический маршрут получения пен с использованием углеродных микросфер.....	71
4.2 Технологический маршрут получения пен темплатной карбонизацией.....	74
4.3 Лабораторные технологии получения теплоизолирующих пен..	77
4.3.1 Получение пен на основе фенольных микросфер.....	84
4.3.2 Получение пен темплатной карбонизацией.....	88
<b>Глава 5 Теплопроводные синтактические углеродные пены на основе графитирующихся материалов.....</b>	<b>93</b>
5.1 Технология получения пен на основе углеродных микросфер и пеков.....	93
5.2 Лабораторная технология получения пен методом карбонизации пеков под давлением.....	97
5.3 Лабораторная технология получения пен методом карбонизации с летучим порообразователем.....	102
<b>Глава 6 Гибридные технологии получения синтактических углеродных пен.....</b>	<b>108</b>
<b>Глава 7 Примеры разработки технологий получения заготовок изделий из углеродных пен.....</b>	<b>119</b>
7.1 Технология получения заготовок изделий сложной формы.....	119
7.2 Технология получения заготовок изделий из углерод-углеродного композиционного материала.....	125
<b>Глава 8 Математическое описание отдельных стадий технологий получения синтактических углеродных пен.....</b>	<b>131</b>
8.1 Слипание, слияние материала покрытия закапсулированных полых микросфер.....	132
8.2 Сплавление связующего материала покрытия закапсулированных микросфер.....	136
<b>Глава 9 Методики исследования свойств и структуры пен.....</b>	<b>149</b>
9.1 Материалы и оборудование для проведения испытаний.....	150
9.2 Методики определения характеристик пен.....	151
9.3 Методика исследования структуры пен методом сканирующей электронной микроскопии.....	158
<b>Глава 10 Структура углеродных пен.....</b>	<b>159</b>

10.1 Синтактические пены, полученные на основе углеродных микросфер и фенолоформальдегидной смолы.....	159
10.2 Пены, полученные темплатной карбонизацией.....	161
10.3 Пены, полученные на основе углеродных микросфер и каменноугольного пека.....	163
10.4 Пены, полученные карбонизацией пеков под давлением.....	165
10.5 Пены, полученные методом карбонизации с использованием летучего порообразователя.....	174
<b>Глава 11 Свойства синтактических углеродных пен.....</b>	<b>178</b>
11.1 Пены на основе фенольных микросфер и фенолоформальдегидной смолы.....	178
11.2 Пены, полученные темплатной карбонизацией.....	200
11.3 Пены на основе углеродных микросфер и пеков.....	207
11.4 Пены, полученные методом карбонизации пеков под давлением.....	211
11.5 Пены, полученные методом карбонизации с летучим порообразователем.....	214
<b>Глава 12 Применение методов математического моделирования для описания свойств синтактических углеродных пен....</b>	<b>226</b>
12.1 Моделирование пористых материалов.....	228
12.2 Классификация пористых сред. Основные свойства.....	229
12.3 Механические свойства пористых тел.....	245
12.4 Определение теплофизических параметров пен.....	261
12.5 Зависимость электрофизических свойств пен от технологических параметров их получения и структуры .....	265
<b>Глава 13 Применение углеродных пен.....</b>	<b>274</b>
13.1 Совершенствование теплообменного оборудования, систем защиты объектов от воздействия внешних факторов.....	274
13.2 Применение углеродных пен для создания источников тока, в качестве носителей катализаторов, сорбентов.....	288
13.3 Применение углеродных пен в медицине.....	294
<b>Заключение.....</b>	<b>298</b>
<b>Список использованных источников.....</b>	<b>300</b>