

*65-летию Института и его сотрудникам,  
ушедшим и ныне работающим, посвящается*

В.И. Иржак

# **ЭПОКСИДНЫЕ ПОЛИМЕРЫ И НАНОКОМПОЗИТЫ**

Черноголовка

УДК 629.7.015.3  
ББК 22.253.3  
К 21

**В.И. ИРЖАК. ЭПОКСИДНЫЕ ПОЛИМЕРЫ И НАНОКОМПОЗИТЫ**  
– Черногловка: «Редакционно-издательский отдел ИПХФ РАН»,  
2021. – 319 с. 98 илл., 37 табл., библи. 736.

Монография состоит из двух частей. В первой части изложены номенклатура, структура и свойства эпоксидных олигомеров, методы и кинетика синтеза, структура и свойства эпоксидных полимеров. Во второй части обсуждаются вопросы образования, структуры и свойств наночастиц, проблема их влияния на кинетику формирования, структуру и свойства эпоксидных полимеров. Книга предназначена для студентов старших курсов, магистрантов, аспирантов, научно-педагогических и производственных работников, обучающихся и работающих в области физикохимии и технологии полимеров и полимерных композиционных материалов.

УДК 629.7.015.3  
ББК 22.253.3

**ISBN 978-5-91845-079-6**

© ИПХФ РАН, 2021  
© Иржак В. И., 2021

## Оглавление

Предисловие .....	6
<b>ЧАСТЬ I</b>	
<b>ЭПОКСИДНЫЕ ПОЛИМЕРЫ .....</b>	<b>9</b>
Введение .....	10
<b>Глава 1. Эпоксидные смолы .....</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Номенклатура эпоксидных смол .....</b>	<b>11</b>
<b>1.2 Физикохимические особенности строения     и свойств эпоксидных олигомеров .....</b>	<b>18</b>
1.2.1 Ассоциатная структура .....	18
1.2.2. Реологические и релаксационные свойства.....	21
<b>1.3 Агенты отверждения эпоксидных смол .....</b>	<b>27</b>
<b>Глава 2. Кинетика процессов отверждения .....</b>	<b>30</b>
<b>2.1. Аминное отверждение .....</b>	<b>30</b>
2.1.1. Эффект замещения .....	32
2.1.2. Поздняя стадия.....	37
2.1.3. Неизотермическое отверждение.....	40
<b>2.2. Ангидридное отверждение .....</b>	<b>46</b>
<b>2.3. Ионная полимеризация .....</b>	<b>52</b>
<b>2.4. Гель-точка .....</b>	<b>57</b>
2.4.1. Поликонденсация.....	57
2.4.2. Полимеризация .....	69
<b>Глава 3. Структура и свойства эпоксидных полимеров.....</b>	<b>75</b>
<b>3.1. Механические свойства .....</b>	<b>75</b>
<b>3.2. Релаксационные свойства .....</b>	<b>84</b>
Заключение .....	106
Список литературы .....	107

## ЧАСТЬ II

<b>ЭПОКСИДНЫЕ НАНОКОМПОЗИТЫ</b> .....	117
Введение .....	118
<b>Глава 1. Нанонаполнители</b> .....	119
<b>1.1. Углеродные наполнители</b> .....	120
1.1.1. Нанотрубки .....	120
1.1.1.1. Общая характеристика УНТ.....	120
1.1.1.2. Пространственное распределение УНТ ..	126
1.1.2. Графит и графен .....	130
1.1.3. Фуллерены, наноалмазы и квантовые точки ..	136
<b>1.2. Минеральные наполнители</b> .....	140
1.2.1. Монтмориллонит .....	141
1.2.2. Галлуазитные нанотрубки.....	145
<b>1.3. Металлсодержащие наполнители</b> .....	148
1.3.1. Окислы и соли металлов.....	148
1.3.2. Синтез металлических наночастиц .....	151
1.3.2.1. Зарождение МНЧ. Критический зародыш ..	151
1.3.2.2. Вторичные реакции металлических наночастиц .....	162
1.3.2.2.1. Коалесценция .....	162
1.3.2.2.2. Оствальдовское созревание.....	167
1.3.2.2.3. Дижестивное созревание .....	169
1.3.2.2.4. Влияние адсорбатов на механизм форми- рования металлических наночастиц .....	179
<b>Глава 2. Синтез нанокompозитов</b> .....	183
<b>2.1. Влияние углеродных наполнителей     на процесс синтеза</b> .....	183
2.1.1. Углеродные нанотрубки .....	183
2.1.2. Графен и графит .....	188
2.1.3. Фуллерены, наноалмазы, квантовые точки....	192
<b>2.2. Минеральные наполнители</b> .....	194

2.3. Окислы металлов и кремния .....	199
2.4. Металлсодержащие наночастицы, синтезируемые <i>in situ</i> .....	201
<b>Глава 3. Структура и свойства нанокомпозитов .....</b>	<b>207</b>
<b>3.1. Структура нанокомпозитов .....</b>	<b>207</b>
3.1.1. Межфазный слой.....	207
3.1.1.1. Одномерные наночастицы .....	210
3.1.1.2. Двумерные наночастицы.....	216
3.1.1.3. Трехмерные наночастицы.....	217
3.1.2. Порог перколяции .....	219
3.1.2.1. Теория исключенного объема .....	221
3.1.2.2. Аналитическая теория .....	224
<b>3.2. Свойства нанокомпозитов .....</b>	<b>231</b>
3.2.1. Механические свойства .....	231
3.2.1.1. Одномерные наночастицы .....	232
3.2.1.2. Двумерные наночастицы.....	240
3.2.1.3. Нуль- и трехмерные наночастицы.....	249
3.2.1.4. Композиты с наполнителями двух типов: синергетический эффект. ....	258
3.2.2. Электрофизические свойства .....	260
3.2.2.1. Композиты с углеродными наночастицами	260
3.2.2.2. Композиты с металлсодержащими наночастицами .....	267
3.2.3. Магнитные свойства .....	277
3.2.4. Термические свойства .....	280
3.2.5. Трибологические свойства .....	283
Заключение .....	289
Список литературы .....	291