

**В.А. БЕЛЕВИТИН, Е.А. ГНАТЫШИНА,
Е.Н. СМИРНОВ, М.Л. ХАСАНОВА**

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ:
НОВЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ
МАТЕРИАЛЫ**

**МИНИСТЕРСТВО ПРОСВЕЩЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Южно-Уральский государственный гуманитарно-
педагогический университет»

**В.А. БЕЛЕВИТИН, Е.А. ГНАТЫШИНА,
Е.Н. СМИРНОВ, М.Л. ХАСАНОВА**

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ:
НЕОВЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ
МАТЕРИАЛЫ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

**Челябинск
2020**

УДК 629.11 (076)
ББК 39.33–082–032я73
Б43

Белевитин, В.А. Материаловедение: новые конструкционные материалы: учебное пособие / В.А. Белевитин, Е.А. Гнатышина, Е.Н. Смирнов, М.Л. Хасанова. – Челябинск: Изд-во Юж.-Урал. гос. гуман.-пед. ун-та, 2019. – 55 с.

ISBN 978-5-907284-29-6

Учебное пособие посвящено описанию новых конструкционных материалов – композиционных материалов (композитов) на металлической и неметаллической основе, включая композиты с наноразмерными наполнителями. Пособие включает общие и специфические сведения о строении и составе композитов, их классификации, свойствах и областях применения. Приводятся примеры, иллюстрирующие виды традиционных и новых композитов, их наполнителей.

Рекомендуется студентам, обучающимся по программе бакалавриата направления Транспорт.

Рецензенты: М.С. Дмитриев, д-р. техн. наук, доцент
К.Н. Семендяев, канд. техн. наук

ISBN 978-5-907284-29-6

- © В.А. Белевитин, Е.А. Гнатышина,
Е.Н. Смирнов, М.Л. Хасанова, 2020
- © Издательство Южно-Уральского
государственного гуманитарно-
педагогического университета, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	8
1.1. Общие сведения, классификация композитов	8
1.2. Традиционные композиционные материалы.....	16
Контрольные вопросы.....	30
ГЛАВА 2. НОВЫЕ КОМПОЗИТЫ.....	31
2.1. Композиты с нанодисперсными наполнителями.....	31
2.2. Полимерные композиционные материалы с углеродными наноразмерными наполнителями.....	39
2.2.1. Углеродные наноструктуры высшего порядка.....	39
2.2.2. Углеродные нанотрубки и нановолокна.....	41
Контрольные вопросы	46
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	48

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение надежности и долговечности современных машин и технологического оборудования возможно при наличии высококвалифицированных кадров инженеров: конструкторов, технологов, материаловедов, в совершенстве владеющих современными достижениями науки и техники в области материаловедения и трибологии, эффективными методами и технологиями модифицирования и поверхностного упрочнения деталей машин и инструментов. В последнее время особое значение приобрела подготовка специалистов в области композиционных материалов, как традиционных, так и новых, с использованием различного вида наполнителей, в том числе наноматериалов.

Композиционные материалы по праву называют материалом будущего, они представляют новую ступень в развитии материаловедения. Сегодня все больше в машиностроительных технологиях применяют новые конструкционные материалы – композиты, сплавы с памятью формы, аморфные металлические сплавы, порошковые сплавы и др.

Композитные материалы в мировом транспортном машиностроении уже успели существенно потеснить привычный металл, причем не только сталь, но и алюминиевые сплавы, которые еще недавно считались венцом инновационности. Ожидается, что в 2020 году объем производства композитных материалов составит 120 млрд руб., а доля экспорта – 10%. Предусмотрено

также принятие к 2020 году более 550 нормативных актов, необходимых для развития данной отрасли.

Прорыв в новые области знаний, технологий, создание изделий с требуемыми свойствами, резкое улучшение экономических показателей, обретение технико-экономической независимости вследствие отказа от использования традиционно приемлемых материалов – все это возможно только благодаря новым полимерным композиционным материалам (ПКМ). Применение ПКМ в машиностроении позволяет резко снизить материалоемкость машин и изделий. Подсчитано, что 1 т полиамидов может заменять 3–4 т стали или 6–7 т бронзы, 1 т стеклопластика – 3 т стального проката, 1 т труб из ПКМ – от 7 т до 15 т металла. Расход энергии на производство 1 т труб из ПКМ также в 3,3 раза меньше, чем стальных труб.

Большая часть композиционных материалов, содержащих неорганические наночастицы, пользуется повышенным коммерческим спросом. По прогнозам, в ближайшие годы потребность в таких композитах в мире возрастет до 600 тыс. т. Особенно неуклонно растет объем применения полимерных нанокompозитных материалов в автомобилестроении, УФ-защитных лакокрасочных материалов, в частности. В ближайшем будущем будут созданы встроенные в наружное полимерное покрытие автомобиля, имеющие в своем составе оптические нанопластины оптические датчики подушек безопасности, передающие сигналы со скоростью света и

экономящие микросекунды времени для спасения жизни пассажиров. Порошки с наночастицами железа сферической формы используют в качестве присадок моторных масел двигателей внутреннего сгорания, устраняющих микродефекты и восстанавливающих детали шатунно-поршневой группы, повышающих компрессию в двигателе в 1,1–1,3 раза, снижающих токсичность и дымность выхлопных газов. Наноразмерные частицы металлов платиновой группы (Pd, Ru) служат высокоэффективными многокомпонентными катализаторами в электрохимических системах с твердым полимерным электролитом.

При использовании новых конструкционных материалов, свойства которых значительно отличаются от свойств традиционных, необходим иной подход ко многим вопросам проектирования изделий: выбору силовой схемы изделия, оформлению сборочных единиц, определению толщины стенок, соединению деталей и т.д.

ГЛАВА 1. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Конструкционные материалы по своей природе подразделяются на металлические, неметаллические и композиционные (композиты), сочетающие положительные свойства первых двух.

1.1. Общие сведения, классификация композитов

Успехи науки в области материаловедения привели к созданию нового класса материалов, так называемых композиционных, уровень свойств которых несравненно выше существующих традиционных сплавов. Композиционные материалы представляют собой сочетание двух и более химически разнородных материалов с четкой границей раздела между ними (рис. 1.1) [1].

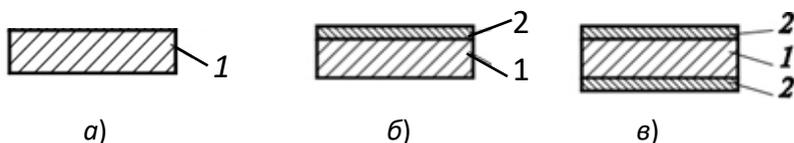


Рис. 1.1. Монометалл (а), двухслойный (б) и трехслойный (в)

Композиционные материалы (композиты) имеют высокие значения прочности, жаропрочности, жесткости, сопротивления, усталости при меньшей их плотности. По структурным признакам композиты являются однородными в макрообъеме материалами и состоят из непрерывной матрицы, в которой равномерно распределены дискретные или непрерывные микрообъемы наполнителя дисперсионно-зернистой (рис. 1.2, а) или волокнистой (рис. 1.2, б, в) формы. Матрица связывает отдельные элементы наполнителя в единый монолит. В качестве наполнителя обычно

используют более прочное вещество, а матрицей должно быть более пластичное вещество [2].

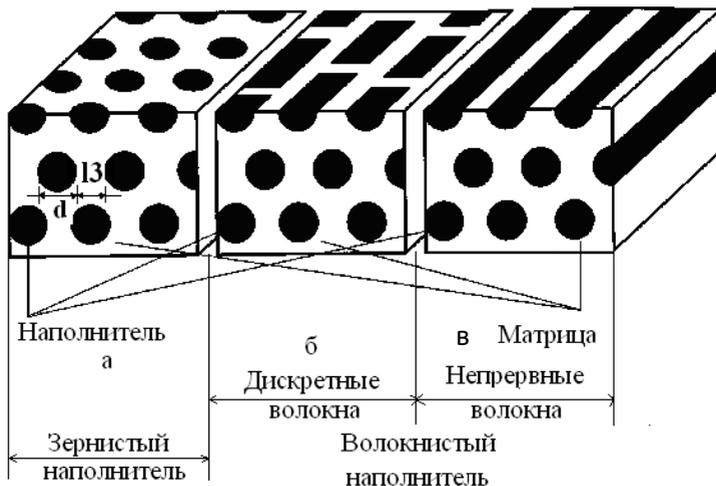


Рис. 1.2. Классификация композиционных материалов по виду наполнителя [2]:

а – с зернистым наполнителем; б – с дискретным волокнистым наполнителем; в – с непрерывным волокнистым наполнителем; d – диаметр зерна; L_{SEP} – межзеренное расстояние

Композиты представляют собой гетерофазные системы, представляющие собой металлические и неметаллические матрицы (основы) с заданным распределением в них двух и более компонентов-упрочнителей (волокон, дисперсных частиц и др.), с сохранением индивидуальности свойств каждого отдельного компонента. При этом индивидуальные свойства составляющих композиции компонентов используются эффективно. Матрицы (или связующие) – компонент, обладающий непрерывностью по всему объему (металлы и сплавы, полимеры, керамика и др.

вещества) [3; 4]. Дискретные элементы структуры компонентов-упрочнителей композитов, представленные химически или физически разнородными веществами, в большинстве случаев имеют размеры до 10 мкм, а в некоторых материалах – не более сотен микрометров [2].

Основное назначение матрицы композитов, в качестве которой используется ряд материалов, имеющих и самостоятельное применение, в том числе конструкционное (рис. 1.3), состоит в связывании дисперсных частиц или более крупных зерен, дискретных или непрерывных волокон наполнителя в сплошное твердое тело, а также в восприятии и равномерном перераспределении внешней нагрузки на элементы наполнителя. Большинство металлов и полимеров вполне удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым к матричному материалу, и получило широкое применение для создания композитов на их основе. Стекло и керамика относятся к хрупким материалам, однако они также находят применение при разработке композитов специального назначения – ситаллов [2].



Рис. 1.3. Классификация композитов по виду матрицы [2]

Создание композитов с использованием металлической матрицы преследует цель устранить такие основные недостатки металлов, препятствующие их эффективному

применению в качестве конструкционного материала, как большая плотность, низкая рабочая температура эксплуатации и низкая вязкость разрушения. При этом в качестве металлической матрицы композитов наиболее широкое применение получили легкие и жаропрочные металлы и сплавы. Легкие металлы и сплавы позволяют получать максимальное значение удельной прочности композитов на их основе, особенно в сочетании с низкоплотными волокнами, что обеспечивает максимальное уменьшение материалоемкости деталей машин, а это особенно важно применительно к транспортным средствам. Армирование сложно легированных никелевых жаропрочных сплавов углеродным волокном позволяет повысить их жаропрочность на 150–200 °С. Наряду с легкими и жаропрочными металлами и сплавами для создания композитов используют металлы и другого назначения [2].

Создание композитов с использованием неметаллической матрицы также преследует цель устранить отдельные недостатки металлов, препятствующие их эффективному применению в качестве конструкционного материала. Наиболее распространены матрицы из фенолформальдегидных и эпоксидных полимеров-реактопластов, значительно (несколько порядков выше) отличающихся от термопластов по вязкости, что обусловило их преимущественное использование в технологии получения композитов с использованием неметаллической матрицы. Для устранения присущих фенолформальдегидным полимерам недостатков (хрупкость, недостаточная химическая стойкость в окислительных средах) их часто совмещают с полимерами других классов. Созданы полимерные композиты на основе полиэтилена, полипропилена, полистирола

с наполнителями в виде асбеста и других волокон [2; 4].

В промышленности используются и смешанные композиты, совмещающие как металлические, так и полимерные составляющие, которые дополняют друг друга по свойствам [4].

Основным требованием при выборе наполнителя, обеспечивающего основные конструктивные и функциональные свойства композита, является соответствие его свойств целевому назначению композита [2; 8].

Наполнителями для производства композитов служат практически все природные и созданные в процессе деятельности человека материалы после придания им определенных форм и размеров. В качестве наполнителей композитов наиболее широкое применение получили порошкообразные и волокнистые материалы естественного и искусственного происхождения (рис. 1.4).



Рис. 1.4. Классификация композиционных материалов по виду наполнителя [2]

Упрочняющее действие наполнителя определяется его геометрической формой, а также размерами и ориентацией дискретных элементов структуры наполнителя в композиционных материалах.

По геометрической форме используемого наполнителя композиционные материалы делят на два класса:

1. Композиционные материалы с дисперсионно-зернистым наполнителем. Наполнитель называют дисперсионно-зернистым при условии

$$lB/d \sim 1. \quad (1.1)$$

2. Композиционные материалы с волокнистым наполнителем. Для волокнистого наполнителя выполняется условие

$$lB/d \gg 1, \quad (1.2)$$

где lB и d – длина и поперечный размер дискретного элемента наполнителя соответственно (см. рис. 1.2 на стр.6).

Механизм упрочняющего действия зернистого наполнителя зависит от размера его зерен. По этому признаку различают [8]:

– Дисперсно-упрочненные композиционные материалы. Дисперсионное упрочнение проявляется при размере зерен $d \leq 0,1$ мкм.

– Порошковые композиционные материалы, содержащие наполнитель с размером зерен $d > 1$ мкм.

Степень упрочнения матрицы композита при введении в ее состав более прочной фазы в виде зерен размером до 0,1 мкм пропорциональна сопротивлению, которое оказывают зерна движению дислокации. Это сопротивление определяется как минимальная энергия E , необходимая для изгиба дислокации вокруг зерна. Следующая дислокация в процессе прохождения взаимодействует не с зерном наполнителя, а с дислокационной петлей вокруг зерна, что по физическому смыслу равнозначно уменьшению эффективного расстояния между зернами (рис. 1.5). Поэтому для прохождения повторной дислокации необходимо прило-

жить большее напряжение. Этим и объясняется деформационное упрочнение дисперсно-упрочненных композитов[8].

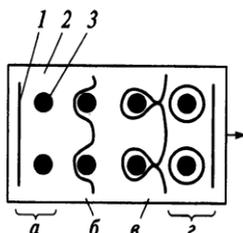


Рис. 1.5. Схема торможения пластической деформации ультрадисперсными зёрнами наполнителя:

а, б, в, г – последовательные стадии прохождения дислокации; *1* – дислокация; *2* – матрица; *3* – ультрадисперсный наполнитель; \blacktriangleright – направление деформации

Интервал расстояний между зёрнами, необходимый для эффективного упрочнения матрицы композита по дислокационному механизму при величине зерна $\leq 0,1$ мкм составляет $0,01 \div 0,3$ мкм, что соответствует объемному содержанию наполнителя в композиционном материале в пределах $1 \div 15$ %.

Механизм упрочняющего действия зернистого наполнителя при введении в матрицу более крупных зерен отличается от рассмотренного. В композите с крупностью зерен более 1 мкм их упрочняющее действие на матрицу проявляется только при объемном содержании наполнителя > 25 %. Зерна наполнителя упрочняют матрицу путем механического стеснения ее деформирования. Жесткая поверхность зерен наполнителя ограничивает деформацию более мягкой матрицы под действием нагрузки.

Среди естественных наполнителей наибольшее распространение имеют мел, каолин, тальк, кварц (SiO_2) и др.

В качестве наполнителей искусственного происхождения используются порошкообразные металлы (рис. 1.6), технический углерод, аэросил, микросферы, технические алмазы, кубический нитрид бора [2; 5–8 и др.].

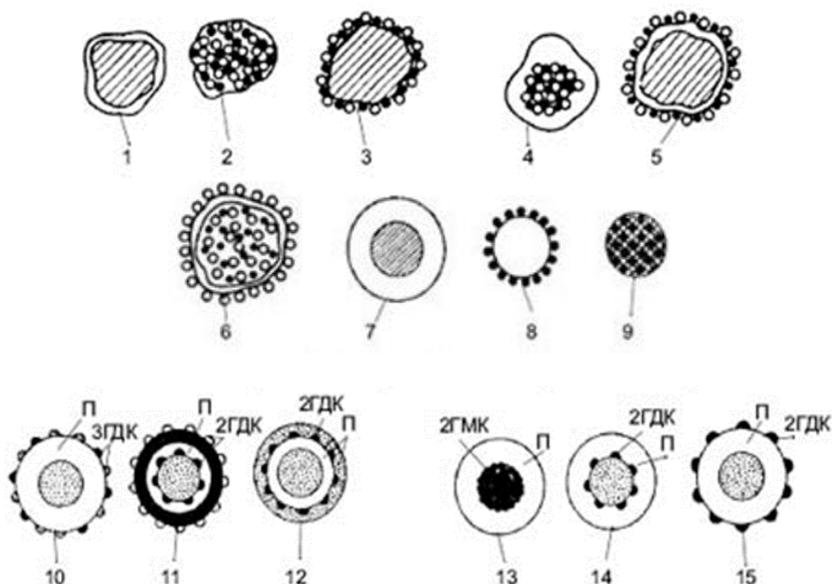


Рис. 1.6. Схемы конструкций порошковых частиц композита [9]:

П – плакирование; 2ГДК, 3ГДК – двух- и трехкомпонентное гетеродисперсное конгломерирование, 2ГМК – двухкомпонентное гомодисперсное конгломерирование. 1, 3, 5, 7 – плакированные; 2, 8, 9 – конгломерированные; 4, 6, 10–15 – смешанные структуры

Порошкообразные металлы широко используют в качестве наполнителей композитов. По гранулометрическому составу все марки порошка производят крупной ($\leq 0,2$ мм), средней ($\leq 0,1$ мм) и мелкой ($\leq 0,05$ мм) фракции. Измельчение вскрывает дефекты строения зерен, вследствие чего измельченные зерна обладают большей прочностью, чем исходный крупнозернистый наполнитель. Поэтому в

качестве наполнителя при изготовлении композиционного материала предпочитают использовать мелкозернистый. Но практически достижимая путем механического измельчения дисперсность имеет определенный предел.

Для получения более мелких зерен наполнителя с соответственно бóльшей прочностью используют принцип фазовой перекристаллизации [8], в т. ч. с наложением ультразвуковых колебаний высокой частоты [10]. Размер и форма частиц, их фракционный состав влияют на технологию производства и свойства композитов и изделий из них. На рис. 1.7 показано, как изменяются свойства композитов при увеличении размеров и содержания наполнителя.

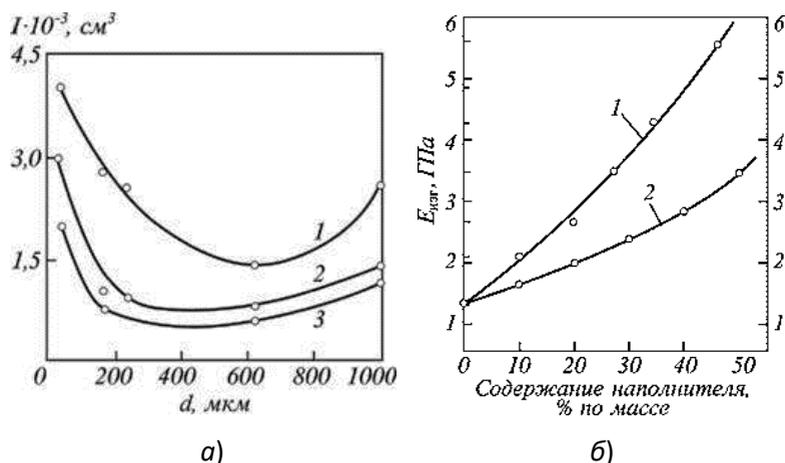


Рис. 1.7. Зависимости износа (I) композиций на основе полиэтилена от размера частиц наполнителя (порошка железа) при его объемном содержании: 1 – 5%; 2 – 10%; 3 – 20% (а) – и влияния содержания талька (1) и мела (2) на модуль упругости при изгибе ($E_{изг}$) полипропилена

1.2. Традиционные композиционные материалы

Композиционные материалы (композиты) – это материалы, состоящие из сильно отличающихся по свойст-

вам друг от друга, взаимно нерастворимых компонентов: из сравнительно пластичного матричного материала, который связывает композицию, и более твердых и прочных веществ, являющихся упрочняющими наполнителями. В зависимости от материала матрицы различают композиционные материалы с металлической матрицей и металлические композиционные материалы (МКМ) с полимерной матрицей – полимерные композиционные материалы (ПКМ), а также металлические композиционные материалы с керамической матрицей – керамические композиционные материалы (ККМ). На рис. 1.8 показаны возможности применения неармированных и армированных МКМ и ПКМ в конструкции современного автомобиля.

Композиты, в которых матрицей служит полимерный материал, являются одним из самых многочисленных и разнообразных видов конструкционных материалов. ПКМ первого поколения – это изотропные материалы, наполненные дисперсными частицами, имеющие более высокий, чем исходный полимер, уровень свойств. Совершенствование таких ПКМ связано с использованием наноразмерных наполнителей, благодаря которым композиции приобретают ценный комплекс эксплуатационных свойств даже при малом объеме наполнителя. ПКМ второго поколения – анизотропные гетерофазные композиции на основе непрерывных армирующих высокопрочных высококомодульных волокон и термореактивных или термопластичных матриц.

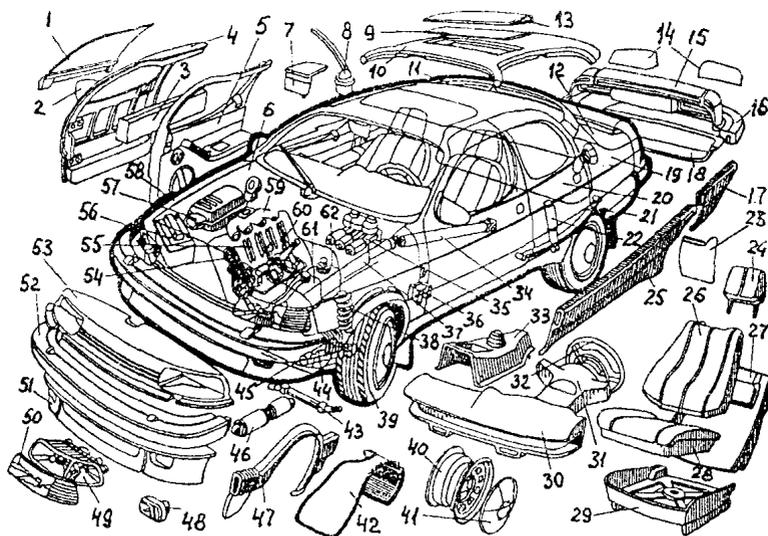


Рис. 1.8. Возможности применения МКМ и ПКМ
в легковом автомобиле среднего класса [15]:

1 - стекло двери; 2 - зеркало наружное; 3 - брус пояса жесткости; 4 - дверь; 5 - внутренняя панель двери; 6 - капот; 7 - внутреннее зеркало; 8 - стеклоочиститель; 9 - прозрачная крышка вентиляционного люка; 10 - крыша; 11, 51 - спойлеры; 12 - крышка багажника; 13 - обтекатель; 14 - задние фонари; 15, 18 - детали задней панели кузова; 16, 52 - бамперы; 17, 25, 47 - противокоррозионные накладки; 19, 58 - крылья; 20 - топливный бак; 21 - рессора подвески; 22 - амортизатор подвески; 23 - грязезащитный фартук; 24 - подголовник; 26 - спинка сиденья; 28 - подушка сиденья; 30 - панель приборов; 31 - кожух рулевой колонки; 32 - рулевое колесо; 33 - кожух тоннеля пола; 34 - труба карданного вала; 35 - цилиндры гидроприводов; 36 - петля двери; 37 - картер сцепления и коробки передач; 38 - пружина подвески; 39 - шина; 40 - диск колеса; 41 - декоративный колпак; 42 - противокоррозионный вкладыш крыла; 43 - вал привода переднего колеса; 44 - рычаг независимой подвески колес; 45 - стабилизатор поперечной устойчивости; 46 - амортизатор бампера; 48 - противотуманная фара; 49 - блок-фара; 50 - рассеиватель блок-фары; 53 - передняя панель кузова; 54 - привод газораспределительного механизма; 55 - толкатели двигателя с нижним распределительным валом; 56 - корпус и крышка аккумулятора; 57 - корпус воздушного фильтра; 59 - впускной коллектор; 60 - шатуны; 61 - расширительный бачок; 62 - бачок омывателя

Интеллектуализация непрерывных армирующих высокопрочных высокомодульных волокон и терморезистивных или термопластичных матриц – основа перехода к ПКМ третьего поколения. Модификация структуры материалов специальными компонентами, разработанными на основе достижений микро- и нанотехнологий, превращает ПКМ в самодиагностирующиеся и адаптирующиеся к внешним воздействиям интеллектуальные ПКМ [11].

Уникальные физико-химические, конструкционные и технологические свойства ПКМ позволяют использовать их в разнообразных областях жизни и деятельности человека. Использование ПКМ в автомобильной технике позволяет повысить ее экономичность. В качестве полимерного связующего в ПКМ практически всегда используют различные низковязкие реактопласты невысокой молекулярной массы (эпоксидные, фенолформальдегидные, кремнийорганические, полиэфирные и др.), которые после формования изделия отверждают химическим путем, а в качестве наполнителей ПКМ используется множество различных веществ: волокна в виде пучков, ровницы или пряжи, различные текстильные материалы, а также вата или путаница из волокна [11–14]. В последнее время все чаще в качестве связующего стали применять и термопласты (полиамид, полипропилен и др.).

Процессы получения изделий из композиций с бесконечно длинными волокнами очень специфичны и зависят не только от вида связующего и наполнителя, но и в значительной степени от конфигурации формируемого изделия. В зависимости от метода изготовления изделий ори-

ентация волокон в нем может быть одноосной, двухосной, слоистой и многоосной. Современное производство элементов конструкций из ПКМ в значительной мере ориентируется на препреговую технологию изготовления изделий. Препреги – это композиты-полуфабрикаты, ткани и волокна, предварительно пропитанные предкатализированной смолой при высокой температуре и давлении. В препрегах смола находится в полутвердом состоянии. Ее полное отверждение происходит при формовании. Применение термопластичных препрегов дает некоторые преимущества. Так, они имеют неограниченный срок годности при хранении; переходят в расплавленное состояние в течение нескольких минут, их свойства при повышенных температурах практически не зависят от влажности.

Стеклопластики

Стеклопластики – это ПКМ, армированные стеклянными волокнами, которые формуют из расплавленного неорганического стекла. В качестве матрицы чаще всего применяют как термореактивные синтетические смолы (фенольные, эпоксидные, полиэфирные и т.д.), так и термопластичные полимеры (полиамиды, полиэтилен, полистирол и т.д.). Эти материалы обладают достаточно высокой прочностью, низкой теплопроводностью, высокими электроизоляционными свойствами. Слоистый материал, в котором в качестве наполнителя применяется ткань, сплетенная из стеклянных волокон, называется стеклотекстолитом. Стеклопластики – достаточно дешевые материалы, их широко используют в автомобилестроении.

В настоящее время выпускают стеклопластики с ориентированным (однонаправленным и перекрестным) и неориентированным (хаотичным) расположением волокон. В первом случае в качестве арматуры используют непрерывные, во втором – дискретные (рубленые или штапельные) волокна. Стекловолокно может иметь круглое или профильное сечение, быть сплошным или полым. Характерный пример однонаправленного стеклопластика – стекловолокнистый анизотропный материал (СВАМ). Наибольшую прочность и жесткость однонаправленные стеклопластики имеют вдоль волокон. Использование высокопрочных стеклянных волокон марок Е и ВМ-1 позволяет получать прочность однонаправленных стеклопластиков в направлении волокон 1 600 – 2 100 МПа с в несколько раз выше удельной прочностью, модуль упругости имеет такую же величину, как у лучших алюминиевых сплавов (табл. 1.1). Но прочность однонаправленных стеклопластиков в направлении, перпендикулярном к осям волокон, очень низка, она определяется в основном свойствами связующего и составляет несколько килограммов сил на квадратный сантиметр. Этого недостатка лишены перекрестноармированные ориентированные стеклопластики.

Изменяя соотношение числа монослоев в различных направлениях, можно в широких пределах регулировать прочность и модуль Юнга стеклопластиков. Механические свойства стеклотекстолитов можно также варьировать, применяя различные марки волокон, идущих на изготовление стеклотканей, а также виды переплетения волокон в ткани (сатиновое, саржевое, полотняное) и соотношение чисел волокон в различных направлениях.

Таблица 1.1.

Физико-механические характеристики
некоторых композитов

Композит	Плотность, г/см ³	Разрушающее напряжение при растяжении σ_p , МПа	Модуль упругости при растяжении E , кгс/мм ²
Однонаправленный стеклопластик на основе:			
– волокна E	2,1	1 600	56 000
– волокна ВМ-1	2,2	2 100	70 000
Ортогонально-перекрестный стеклопластик СВМ (волокно E):			
– 10:1	1,9	950	54 000
– 1:1	1,9	500	35 000
Стеклотекстолит волокна ВМ-1	1,95	860	37 000

Физико-механические свойства некоторых отечественных пресс-волокнитов даны в таблице 1.2.

К новым видам ПКМ относятся стеклопластики, армированные полыми и профильными стеклянными волокнами. Стеклопластики с полыми волокнами меньше весят, у них повышенные удельные прочность и жесткость.

Наполнителем в этих ПКМ служат углеродные волок-

на, которые получают из синтетических и природных волокон на основе целлюлозы, сополимеров акрилонитрила, нефтяных и каменноугольных пеков и т.д.

Таблица 1.2.

Физико-механические свойства некоторых отечественных пресс-волоконитов

Показатели	АГ-4В	З-18В	П-5-2	КМС-9	ТП-170	РТП-200
Плотность, г/см ³	1,7–1,9	1,9	1,7–1,8	1,6–1,9	1,7–1,85	1,75–1,85
Разрушающее напряжение, при:						
– растяжению, МПа	80	130–180	–	15–18	–	–
– изгибе, МПа						
– сжатию, МПа						
Ударная вязкость, кДж/м ²	30	–	–	70	–	80

Термическая обработка углеродного волокна осуществляется в три этапа (окисление – 220 °С, карбонизация – 1 000 ÷ 1 500 °С и графитизация – 1 800 ÷ 3 000 °С) и приводит к образованию волокон, характеризующихся высоким содержанием (до 99,5% по массе) углерода. В зависимости от режима обработки и исходного сырья полученное углеволокно имеет различную структуру. Для изготовления углепластиков чаще всего используются те же матрицы, что и для стеклопластиков – терморезистивные и термопластичные полимеры. Основными преимуществами углепластиков в сравнении со стеклопластиковыми является их низ-

кая плотность (они очень легкие) и более высокий модуль упругости, т.е. углепластики – прочные материалы. Углеродные волокна и углепластики имеют практически нулевой коэффициент линейного расширения. Все углепластики хорошо проводят электричество, но их черный цвет несколько ограничивает области их применения.

На основе углеродных волокон и углеродной матрицы создают наиболее термостойкие композиционные материалы (углепластики) – композиционные углеграфитовые материалы, способные долго выдерживать в инертных или восстановительных средах температуры до 3 000 °С. Существует несколько способов производства подобных материалов. По одному из них углеродные волокна пропитывают фенолформальдегидной смолой, затем подвергают действию высоких температур (2000 °С) с реализацией пиролиза органических веществ, образуя углерод. Чтобы материал был менее пористым и более плотным, операцию повторяют несколько раз. Другой способ получения углеродного материала состоит в прокаливании обычного графита при высоких температурах в атмосфере метана. Мелкодисперсный углерод, образующийся при пиролизе метана, закрывает все поры в структуре графита. Плотность такого материала увеличивается по сравнению с плотностью графита в полтора раза.

УУКМ – углерод-углеродные композиционные материалы – представляют отдельную группу углепластиков, у которых армирующим волокном является углеродное волокно, а матрицей пироуглерод, кокс каменноугольного и нефтяных пеков и стеклоуглерод. Свойства УУКМ анало-

гичны свойствам других углепластиков. Однако их отличает то, что для них характерно некоторое улучшение механических свойств с повышением температуры.

В машиностроении для изготовления подшипников скольжения используются антифрикционные материалы марки НИГРАН и НИГРАН-В, созданные на основе графитов, пропитанных полимерными связующими.

Боропластики

Композиционные материалы, содержащие в качестве наполнителя борные волокна, внедренные в терморезистивную полимерную матрицу, образуют боропластики (бороволокниты). Благодаря большой твердости нитей, получающийся материал обладает высокими механическими свойствами (борные волокна имеют наибольшую прочность при сжатии по сравнению с волокнами из других материалов) и большой стойкостью к агрессивным условиям. Но высокая хрупкость материала затрудняет их обработку и накладывает ограничения на форму изделий из боропластиков, применение которых ограничивается высокой стоимостью производства борных волокон. Замена металлических изделий боропластиковыми позволяет снизить их массу, повысить удельную жесткость, статическую прочность, предел выносливости и вибропрочность.

Карбидопластики

Карбидопластики – это ПКМ, содержащие в качестве наполнителя волокна карбидов. В настоящее время исследуются свойства связующих с волокнами карбида кремния SiC. Карбидопластики имеют несколько меньшую прочность, чем боропластики, но больший модуль Юнга. Это

вызвано тем, что выпускаемые в настоящее время волокна SiC менее прочны при низких температурах, чем борные, но обладают большей жесткостью. Использовать волокна SiC в качестве наполнителя целесообразно для термостойких связующих. Преимущество карбидокремниевых волокон перед борными в их меньшей чувствительности к повышенным температурам, большей высокотемпературной прочности и длительной прочности. Поэтому карбидопластики, вероятнее всего, найдут применение в качестве материалов для изделий высокотемпературного назначения.

Органопластики

Композиты, в которых наполнителями служат органические синтетические, реже – природные волокна в виде жгутов, нитей, тканей, бумаги и пр., являются органопластиками. В терморезистивных органопластиках матрицей в основном служат эпоксидные, полиэфирные и фенольные смолы, а также полиамиды. Материал содержит 40–70 % наполнителя. Содержание наполнителя в органопластиках на основе термопластичных полимеров – полиэтилена, полиуретана и др. – варьируется в значительно больших пределах – от 2 % до 70 %. Органопластики обладают низкой плотностью (они легче стекло- и углепластиков), относительно высокой прочностью при растяжении, высоким сопротивлением удару и динамическим нагрузкам, но в то же время низкой прочностью при сжатии и изгибе.

Органопластики находят широкое применение в авто-, судо-, машиностроении, авиа- и космической технике, радиоэлектронике, химическом машиностроении, производстве спортивного инвентаря и т.д.

Полимеры, наполненные порошками

Известно более 10 000 марок наполненных полимеров. Наполнители используются как для снижения стоимости материала, так и для придания ему специальных свойств. Большую популярность приобрел бакелит – материал, созданный на основе синтеза фенолформальдегидной (бакелитовой) смолы.

Технология приготовления бакелита проста: смесь частично отвержденного полимера и пресс-порошка в качестве наполнителя необратимо затвердевает под давлением в форме, имеющей требуемую конфигурацию изделия. Первое серийное изделие произведено по данной технологии в 1916 г., это – ручка переключателя скоростей автомобиля «Роллс-Ройс».

Наполненные термореактивные полимеры широко используются и сейчас. В настоящее время применяются разнообразные наполнители как термореактивных, так и термопластичных полимеров.

Текстолиты

Текстолиты – слоистые пластики, армированные тканями из различных волокон. Технология получения текстолитов была разработана на основе фенолформальдегидной смолы. Плотна ткани пропитывали смолой, затем прессовали при повышенной температуре, получая текстолитовые пластины. Связующими в текстолитах являются термореактивные и термопластичные полимеры, иногда даже применяются и неорганические связующие, на основе силикатов и фосфатов.

В качестве наполнителя используются ткани из самых разнообразных волокон: хлопковых, синтетических, асбестовых, базальтовых и т.д. Соответственно разнообразны свойства и применение текстолитов.

Керамические композиты

Керамические композиты (ККМ) представляют собой материалы, в которых матрица состоит из керамики, а арматура – из металлических или неметаллических волокнистых наполнителей. Армированные волокнами материалы на основе порошковых комбинированных матриц, в которые входят тугоплавкие неметаллические частицы и металл-связка, условно будем относить также к ККМ.

ККМ характеризуются высокими точками плавления, высокой прочностью на сжатие, сохраняющейся при достаточно высоких температурах, и высокой стойкостью к окислению. В настоящее время требования к керамике как к конструкционному изделию значительно возросли. Наряду с перечисленными свойствами от нее требуется высокая прочность на растяжение и ударная вязкость, стойкость к вибрациям и термоудару. Такими свойствами обладают, например, некоторые металлы.

Сопоставление свойств керамики и металлов привело к попыткам создать ККМ, в которых керамическая матрица сочетается с металлическими включениями в виде порошка. Так появились керметы, которые близки по своему типу к так называемым дисперсионно-упрочненным композиционным материалам (ДУКМ). Объемная доля керамической фазы может составлять 45–60%.

Примером керметов являются ферротитаны или карбидостали, в которых стальная матрица упрочнена частицами карбида титана TiC со средним размером 2–5 мкм. Это высокоизносостойкие материалы, используемые в деталях, подверженных износу трением.

Дальнейшими исследованиями было установлено, что еще больший эффект дает введение в керамическую матрицу волокон металла. Так, чтобы достичь одинаковой с керметом термостойкости, в керамику нужно ввести примерно в 3 раза меньше металла в форме волокон, чем в виде порошка. Аналогичные исследования были затем проведены в области введения в керамическую матрицу керамических волокон.

Характерными керамическими композициями, армирование волокнами которых открывает новые области использования, являются ККМ на основе оксида хрома. Наиболее обширной группой керамических композиционных материалов являются ККМ на основе бескислородной керамики (нитридов и карбидов кремния).

В отдельную группу ККМ можно выделить сверхпроводящую оксидную керамику (СП) на основе систем Y-Ba-Cu-O, Bi-Sr-Ca-Cu- и Bi-Pb-Sr-Ca-Cu-O.

Интересными и перспективными направлениями использования СП-керамики являются магнитные подшипники, допускающие скорость вращения до 100 тыс. об/мин; гистерезисные электродвигатели с удельной мощностью в 5–7 раз выше, чем у обычных двигателей, что обуславливает создание энергоэкономных, экологически безопасных гибридных автомобилей.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что представляют собой композиционные материалы (композиты)?
2. Назовите связующий состав композиционных материалов.
3. Как классифицируются композиционные материалы?
4. Опишите и охарактеризуйте состав основных видов композиционных материалов.
5. Какими свойствами характеризуются композиционные материалы?
6. Назовите виды композиционных материалов с металлической матрицей.
7. Назовите виды композиционных материалов с неметаллической матрицей.
8. В чем состоят особенности применения композиционных материалов в автомобилестроении?
9. Приведите конкретные области применения композиционных материалов в качестве конструкционного материала.
10. Какие виды структуры имеют место у композиционных материалов?
27. Что представляют собой препреги?
28. Назовите компоненты стеклотекстолита.
29. Какие полимеры чаще всего используются для изготовления углепластиков?
30. Назовите основное свойство боропластиков.
31. Какими свойствами обладают органопластики?
32. Что представляют собой керамические композиционные материалы?

ГЛАВА 2. НОВЫЕ КОМПОЗИТЫ

2.1. Композиты с нанодисперсными наполнителями

В традиционных ПКМ фаза наполнителя имеет микронные размеры (диаметр минеральных и углеродных волокон, например, составляет $7\div 15$ мкм). В ПНКМ (ПКМ с нанодисперсными наполнителями) размеры частиц фазы наполнителя составляют < 100 нм. К объектам с наноразмерами обычно относят наночастицы ($1\div 100$ нм), кластеры (1 нм), молекулы (0,5 нм), коллоидные частицы ($3\div 100$ нм), вирусы (100 нм) [11].

Наночастицы обуславливают разнообразные структурные образования: нульмерные (квантовые точки размером до 5 нм), одномерные (квантовые нити, нанотрубки, нановолокна, «усы», линейные полимеры), двумерные (квантовые ямы, графен, пленки Ленгмюра – Блоджетта толщиной в один или несколько атомов, адсорбированных на поверхности, нанопористые пленки, биомембраны), трехмерные (фуллерены, фуллероиды, астралены, пластины наноглины, дендримеры, мицеллы, биоорганические полимеры, композиционные наноматериалы) и всевозможные их комбинации. На рис. 2.1. приведены несколько (из огромного количества) моделей наноразмерных объектов.

Как показали многочисленные исследования последних лет, частицы размером < 100 нм придают сделанным из них материалам новые свойства, а нанобъекты демонстрируют новое физическое и химическое поведение, зависящее от размера частиц (размерные эффекты).

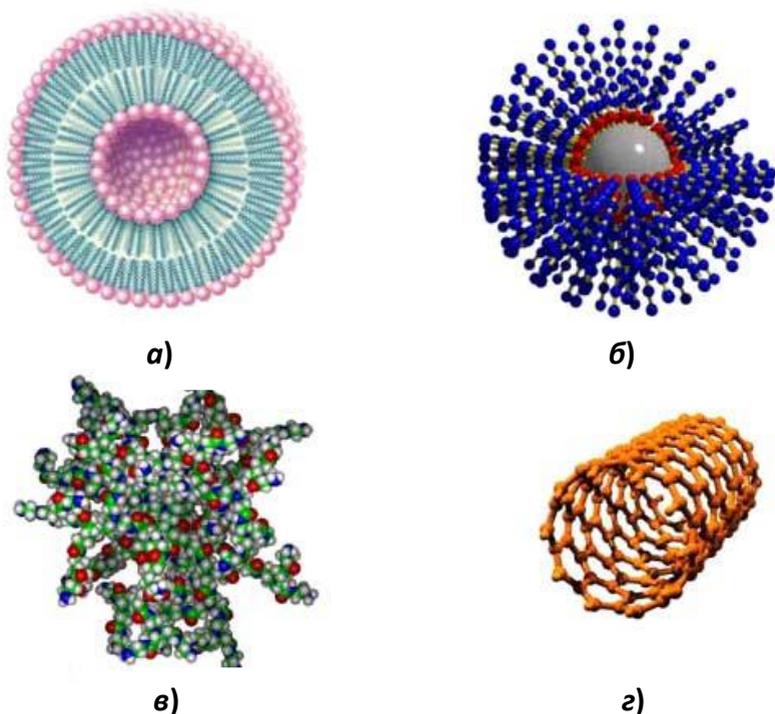


Рис. 2.1. Модели наноразмерных объектов:
а – липосома; *б* – полимерная наноструктура;
в – дендример; *г* – углеродная нанотрубка

Свойства наночастиц и наноструктур определяются не законами классической ньютоновской физики, а квантово-механическими статистическими законами наномира. В рассмотрении таких систем для того используют термин «квантовый», чтобы подчеркнуть, что в области нанометровых масштабов имеется изменение, прежде всего, электронных свойств квантово-механической природы [11].

Применительно к полимерному материаловедению нанотехнология развивается в двух основных направлениях.

Первое направление представляет собой синтез традиционными для химии полимеров способами полимеров с требуемыми свойствами, задаваемыми на молекулярном уровне (макромолекулы имеют наноразмеры). При использовании различных химических реакций получают полимеры различного строения: линейные, разветвленные, гиперразветвленные, сетчатые с различной структурой и плотностью сеток, с боковыми и концевыми группами различного состава и активности, блок-сополимеры, термоустойчивые, огнестойкие, жидкокристаллические, металлоорганических и др.

Второе направление заключается в получении наполненных композиций, состоящих из двух или более фаз с четкой межфазной границей и со средним размером одной из фаз < 100 нм, – полимерных нанокomпозиционных материалов (ПНКМ, нанокomпозитов).

Разработаны и используются композиции с наноразмерными компонентами различной химической природы: углеродными, неорганическими (металлическими, керамическими), органическими. Наноструктурированные материалы содержат следующие, получаемые различными способами наноразмерные компоненты (наполнители):

- углеродные: фуллерены, фуллериты, астралены, однослойные нанотрубки с различной структурой (кресельной (рис. 2.2, а), зигзагообразной, винтовой) графеновых стенок, многослойные нанотрубки (рис. 2.2, б) [16-17], углеродные нановолокна, наносажи, молекулярные алмазы;
- металлические: наночастицы, получаемые путем лазерного испарения атомов с их конденсацией при охлаж-

дении, высокочастотным индукционным нагревом, химическими методами (синтез металлосодержащих полимеро-вионным обменом с использованием олигометиленифениленов, каталитическое восстановление, разложение металлоорганических соединений, их термолиз), импульсными лазерными методами; нанопорошки, получаемые помолотом в наномельницах в жидких средах в присутствии поверхностно-активных веществ; нановолокна; «усы»;

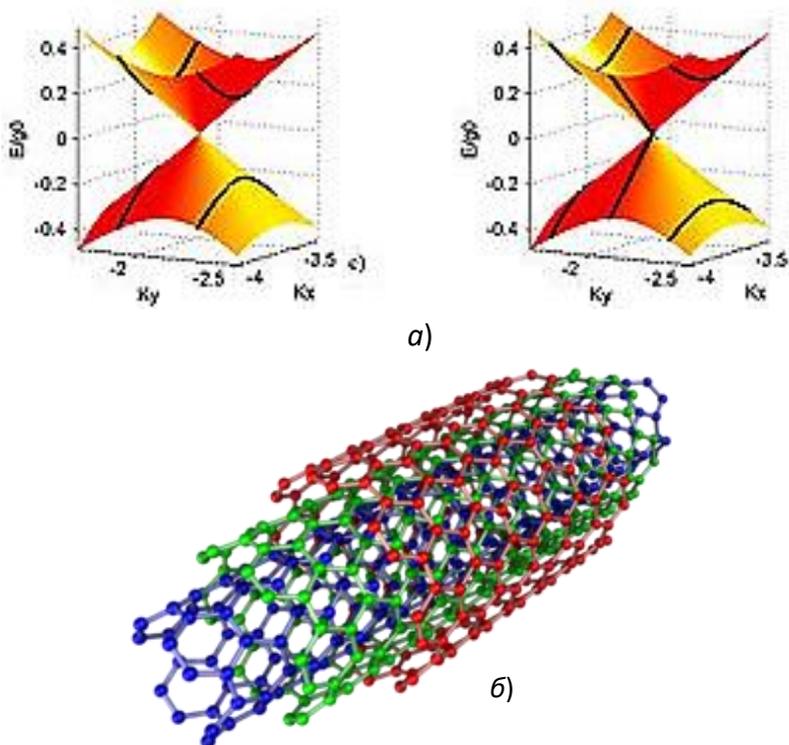


Рис. 2.2. Разрешённые k -состояния полупроводниковой (слева) и металлической (справа) углеродных нанотрубок графена (а). Модель многослойных (multi-walled) нанотрубок (б): структура типа «матрёшки» (russian dolls)

– керамические: стеклянные наночешуйки; хлопья: пластины нанослюды; наночастицы кремниевой кислоты, оксидов кремния, алюминия, цинка, индия, карбида вольфрама; органомодифицированные слоистые силикаты; бентониты со структурой монтмориллонита; «наноглины»; нанотрубки галлуазита и других минералов (рис. 2.3, изображение: Elshad Abdullayev and Yuri Lvov / Journal of Materials Chemistry B, 2013) [18]; оптически прозрачные хлопья толщиной менее 5 нм;

– полимерные: элементоорганические полимеры с ионно-кластерными, ионно-доменными нанофазами размером 1÷100 нм, образующимися в процессе синтеза; разветвленные звездообразные дендримеры, неразветвленные наномолекулы; неорганические нанотрубки [19–21].

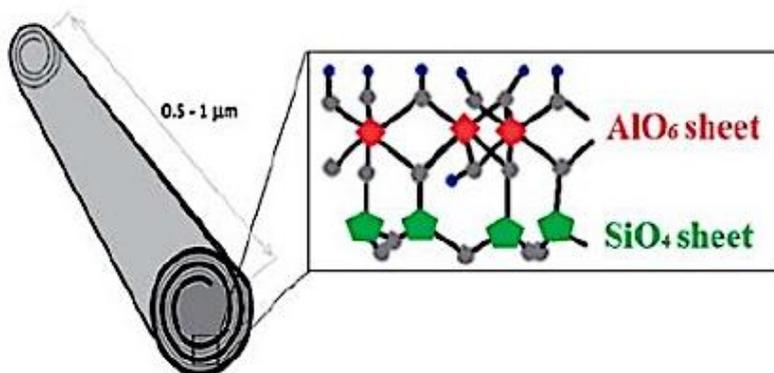


Рис. 2.3. Кристаллическое и химическое строение нанотрубки галлуазита

Галлуазит – единственный известный, имеющий широкий спектр применений по улучшению механических и адгезивных свойств полимеров природный минерал под-

класса слоистых силикатов, почти на 95 % состоящий из свернутых в нанотрубки слоев (закрученных в многослойный «рулет») алюмосиликатной глины (рис. 2.4).

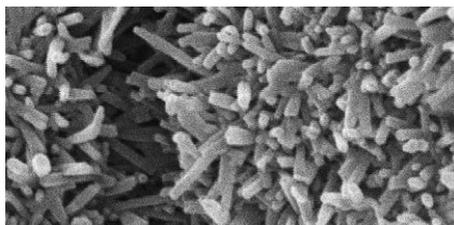


Рис. 2.4. Изображение Wikipedia Commons галлуазитных нанотрубок, полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа

Поверхность нанотрубок галлуазита обладает противоположными химическими свойствами. Их внутренняя поверхность, состоящая из оксида алюминия, преимущественно «притягивает к себе» отрицательно заряженные частицы, в то время как внешняя поверхность, состоящая из оксида кремния, имеет положительный заряд. Это открывает возможности сочетать различные свойства в одном и том же материале. Например, для создания «магнитно-антибактериальных» пластмасс. Нанотрубки галлуазита можно модифицировать различными наполнителями, которые помещают на внутреннюю или внешнюю ее поверхность: металлами, магнетиками, ингибиторами коррозии, антибиотиками, различными солями и другими соединениями. Таким способом возможно создание огнезащитных, антикоррозийных, антибактериальных, лекарственных, электропроводящих и магнитных пластиков.

При добавлении 5÷10 весовых процентов галлуазита в различные полимер-пластмассы с образованием традиционных поликристаллических композиционных материа-

лов (ПКМ) их прочность на растяжение может увеличиваться на 50%, а упругость – почти втрое.

Многочисленные исследования последних лет показали, что наночастицы размером < 100 нм придают сделанным из них полимерным нанокомпозиционным материалам (ПНКМ, нанокомпозитам) новые свойства: ПНКМ демонстрируют новое физическое и химическое поведение, зависящее от размера частиц (размерные эффекты).

Технология получения ПНКМ зависит от типа наночастиц, которые вводят в полимер. При этом специфические свойства наночастиц создают определенные сложности для совмещения их с полимерами. Так, высокая поверхностная энергия наночастиц приводит к их агрегированию, слипанию, а из-за химической активности они при взаимодействии с другими веществами могут утрачивать свои уникальные свойства.

Получить ПНКМ традиционными технологиями наполнения полимеров сложно. ПНКМ получают различными технологическими способами путем совмещения нанодисперсных наполнителей различной химической природы (углеродных, керамических, металлических) с термопластичными или термореактивными связующими, выполняющими роль матриц в ПНКМ. Определенное ухудшение реологических свойств таких композиций (возрастание вязкости расплава) в полной мере компенсируется резким улучшением эксплуатационных свойств при существенно более низком объемном содержании в композиции наноразмерного наполнителя.

Наполнение полимеров наноразмерными наполнителями (даже при их содержании в композиции в количестве 1÷5 % об.) имеет широкое применение:

- повышает упругопрочностные свойства, деформационную теплостойкость, трещиностойкость, стабильность размеров изделий;

- позволяет создавать материалы с требуемыми электрическими, магнитными, оптическими свойствами, с регулируемой скоростью диффузии газов и жидкостей;

- используется при разработке тиксотропных лаков; эмалей; клеев; полимерных пленок; покрытий с высокой твердостью, износостойкостью, электропроводностью, оптической прозрачностью, барьерными свойствами, способностью к самоочищению (наноструктурированные гидрофобные покрытия на основе дендримеров с лотос-эффектом); мембран из полиэлектролитов с пониженной набухаемостью; наномодифицированных гидрофильных и гидрофобных покрытий;

- перспективно для наномодифицирования терморезистивных и термопластичных связующих при разработке нового поколения ПКМ конструкционного и специального назначения.

В настоящее время разработаны ПКМ на основе полипропилена, алифатических и ароматических полиамидов, полиэфиримидов, полиимидов, полисульфонов, полистирола, поликарбоната, полиметилметакрилата, полиакрилонитрила, полиэтиленгликоля, полиуретанов, эпоксидных и других связующих.

2.2. Полимерные композиционные материалы с углеродными наноразмерными наполнителями

2.2.1. Углеродные наноструктуры высшего порядка

В качестве наноразмерных наполнителей ПНКМ используют углеродные наноструктуры высшего порядка с переходными формами углерода: фуллерены, фуллериты (фуллерены в кристаллическом состоянии), астралены (фуллероидные многослойные углеродные наночастицы), одно- и многослойные нанотрубки, нановолокна, наносажи.

Фуллерены – это недавно открытая природная форма углерода, существующая наряду с уже хорошо известными – графитом, алмазом и карбином. Фуллерены представляют собой полые внутри (пустота 20÷26 % объема) кластеры, замкнутая поверхность которых образована правильными многогранниками из атомов углерода. В молекулах фуллеренов атомы углерода расположены в вершинах правильных шести- и пятиугольников, из которых составлена поверхность сферы или эллипсоида.

Самый симметричный и наиболее изученный представитель семейства фуллеренов – фуллерен (C_{60}) (рис. 2.5, а), напоминающий футбольный мяч, только микроскопический, диаметром 0,7 нм, состоящий из 20 шестиугольников и 12 пятиугольников. Следующим по распространенности является фуллерен C_{70} , отличающийся от фуллерена C_{60} вставкой пояса из 10 атомов углерода в экваториальную область C_{60} , из-за чего молекула C_{70} оказывается вытянутой и напоминает своей формой мяч для игры в регби.

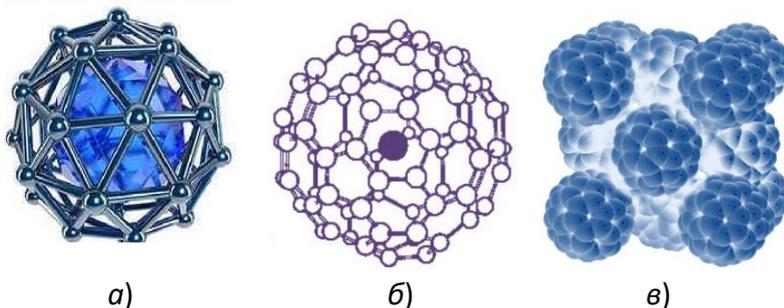


Рис. 2.5. Фуллерен C_{60} (а), эндофуллерен (б) и фуллерит (в)

Самое интересное в фуллеренах не форма, содержание. Та самая пустота, которая остается в середине «футбольного мяча», потому что в эту пустоту можно при желании поместить все, что угодно. Эндофуллерены – молекулы, в которых внутри молекулы фуллерена размещен один или несколько неуглеродных атомов (рис. 2.5, б).

Фуллерены в твердом состоянии образуют молекулярные кристаллы – *фуллериты*, в узлах решетки которых находятся молекулы фуллерена (рис. 2.5, в). Фуллерит состоит из фуллеренов C_{60} (90%), C_{70} (10%) и небольшого количества высших фуллеренов (до 3%). Крупнейшим потребителем стала сфера энергетики (использование как основы для батарей, топливных элементов, в качестве присадки для топлива и др.).

Основные области применения фуллеренов:

- новые классы сверх- и полупроводников, магнетиков, сегнетоэлектриков, нелинейных оптических материалов;
- новые фуллереновые технологии синтеза алмазов и алмазоподобных соединений сверхвысокой твердости;

- новые классы полимеров с заданными механическими, оптическими, магнитными, электрическими свойствами для записи и хранения информации;
- новые типы катализаторов и сенсоров для определения состава жидких и газовых сред;
- новые типы антифрикционных покрытий и смазок, в т. ч. на основе фторсодержащих соединений фуллеренов;
- новые виды топлив и добавок к топливам;
- капсулы для безопасного захоронения радиоактивных отходов;
- новые классы соединений для фармакологии и медицины, в том числе противовирусные и нейротропные препараты, сорбенты для гемосорбции.

2.2.2. Углеродные нанотрубки и нановолокна

Углеродные нанотрубки (турбулены) – это протяженные цилиндрические структуры диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной до нескольких сантиметров, состоящие из одной или нескольких свернутых в трубку гексагональных графитовых плоскостей и заканчивающиеся обычно полусферической головкой, которая может рассматриваться как половина молекулы фуллерена (рис. 2.6) [22].

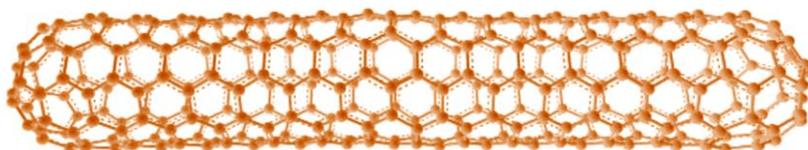


Рис. 2.6. Углеродная нанотрубка (турбулен) [22]

Взаимная ориентация гексагональной сетки графита и продольной оси нанотрубки определяет очень важную структурную характеристику нанотрубки, которая получила название хиральности. Хиральность характеризуется двумя целыми числами (m, n) , которые указывают местонахождение того шестиугольника сетки, который в результате свертывания должен совпасть с шестиугольником, находящимся в начале координат. Имеется много вариантов свертывания нанотрубок, но среди них выделяются те, в результате реализации которых не происходит искажения структуры гексагональной сетки (рис. 2.7).

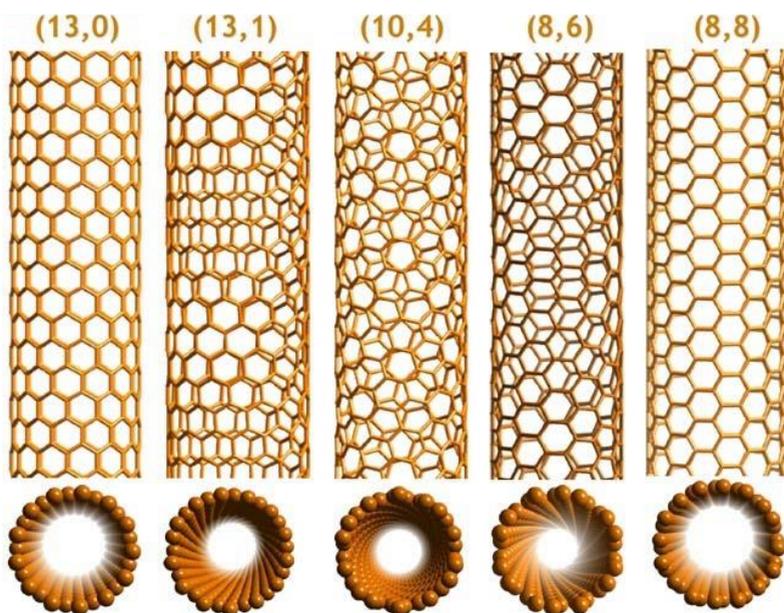


Рис. 2.7. Углеродные нанотрубки с различной хиральностью

Наиболее распространены углеродные нанотрубки с кресельной, зигзагообразной и винтовой структурой (хи-

ральностью). Тип строения трубки влияет на ее химические, электронные и механические свойства. Однослойные трубки содержат меньше дефектов, а после высокотемпературного отжига в инертной атмосфере можно получить и бездефектные трубки.

Многослойные нанотрубки (рис. 2.8) отличаются от представленных на рис. 2.7 однослойных значительно более широким разнообразием форм и конфигураций. Разнообразие структур проявляется как в продольном, так и в поперечном направлении. Структура типа «русской матрешки» представляет собой совокупность коаксиально вложенных друг в друга цилиндрических трубок. Другая разновидность этой структуры представляет собой совокупность вложенных друг в друга коаксиальных призм.



Рис. 2.8. Возможные структуры многослойных нанотрубок:
а) «русская матрешка»; б) шестигранная призма;
в) свиток [22]

Углеродные нанотрубки обладают уникальными упругопрочностными, теплофизическими и электрическими свойствами. Из углеродных нанотрубок, формирующихся перпендикулярно к кремниевой подложке, вытягивают несколько метров (с площади 1 см^2) нановолокон, состоящих из сотен тысяч нанотрубок. Из пучков нановолокон

сплетают нити (при диаметре 20 мкм прочность нитей в 5 раз больше прочности нитей Kevlar такого же диаметра).

Электропроводная прозрачная ткань из углеродных нанонитей при толщине 50 мкм имеет массу одного квадратного метра, равную 30 мг, и удельную прочность более высокую, чем у стали. Значение модуля упругости эпоксидного нанокompозита, содержащего лишь 5% об. углеродных нанотрубок, повышается на 20%, а модуля упругости при сжатии – на 25%. Значение прочности при растяжении полистирола с 1% объема нанотрубок повышается на 25%. Наполнение полимеров углеродными наночастицами (наносажи, трубки) резко повышает электропроводность ПНКМ, причем концентрационный порог (K_p) протекания перколяции (переноса электронов) достигается при введении в полимер уже около 1% объема наночастиц, тогда как при использовании технического углерода K_p переноса электронов достигается лишь при степени наполнения им полимера не ниже 20% объема [11].

Углеродные нанотрубки (другие углеродные наноструктуры) используются в качестве наполнителей термо- и реактопластов в полимерных композиционных наноматериалах. Объемы применения полимерных нанокompозитов растут от 18% до 25% в год (автомобилестроение, упаковочные материалы, наноэлектроника).

Углеродные наноструктуры используют для получения конструкционных, электропроводящих, антистатических, радиоэкранирующих полимерных нанокompозитов, для модификации традиционных полимерных композиционных материалов (углепластиков), элементной базы на-

ноэлектроники. Наносажа марки Esoгах в количестве 5% объема используется для модификации резин. ПНК-материалы компании Nanocyl (Бельгия) используются в автомобилестроении (токопроводящие лаки и эмали, упрощающие сушку покрытий, антистатические покрытия топливных трубопроводов, уплотнительные кольца, прокладки). По данным фирмы Hyperion Catalysis, более чем в 60% автомобилей, изготавливаемых в США, используются материалы, содержащие углеродные нанотрубки.

Широкое применение фуллеренов, астраленов, углеродных нанотрубок в качестве наполнителей ПНКМ сдерживается их высокой стоимостью. Поэтому экономически более приемлемо использование углеродных наноструктур в качестве модификаторов традиционных ПКМ, например углепластиков. Наномодификаторы выполняют в углепластиках роль «стопперов», так называемых замедлителей роста трещин, генерируя разветвленную систему мезотрещин – каналов рассеяния энергии нагружения – и повышая значение показателя трещиностойкости на 35%.

Порошки с наночастицами железа сферической формы используют в качестве присадок моторных масел двигателей внутреннего сгорания, устраняющих микродефекты и восстанавливающих детали шатунно-поршневой группы, повышающих компрессию в двигателе в $1,1 \div 1,3$ раза, снижающих токсичность и дымность выхлопных газов благодаря образованию на поверхности деталей тонких (толщиной менее 1 мкм) слоев нанопористого катализатора. Наноразмерные (размер $2 \div 17$ нм, удельная поверхность $40 \div 100$ м²/г) частицы металлов платиновой группы (Pd, Ru)

служат высокоэффективными многокомпонентными катализаторами в электрохимических системах с твердым полимерным электролитом.

При использовании новых конструкционных материалов, свойства которых значительно отличаются от свойств традиционных, необходим иной подход ко многим вопросам проектирования изделий: выбору силовой схемы изделия, оформлению сборочных единиц, определению толщины стенок, соединению деталей и т.д.

В связи с многообразием конструктивно-технологических решений, существенной разницей их стоимости решение о выборе того или иного варианта конструкции должно базироваться на объективной количественной оценке. Для оценки возможных вариантов и наилучшего выбора в настоящее время широко используются методы исследований операций. При этом предусмотрен системный подход к решению задачи, получивший довольно широкое распространение. Его главная положительная особенность и состоит в том, что решения частных задач увязываются с решениями более общих [23–50].

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В чем заключаются различия традиционных композитов и композитов с нанодисперсными наполнителями?
2. Что обычно относят к объектам с наноразмерами?
3. Что обуславливают наночастицы композитов с нанодисперсными наполнителями? Опишите состав основных видов пластмасс и охарактеризуйте их.

4. Опишите состав структурных образования композитов с нанодисперсными наполнителями.

5. Какими свойствами характеризуются композиты с нанодисперсными наполнителями?

6. Приведите конкретные области применения пластмасс в качестве конструкционного материала.

7. Какими законами определяются свойства наночастиц и наноструктур у композитов с нанодисперсными наполнителями?

8. В чем состоят особенности применения композитов с нанодисперсными наполнителями в автомобилестроении?

9. В каких направлениях применительно к полимерному материаловедению развивается нанотехнология?

10. Какое зависящее от размера наночастиц поведение демонстрируют нанообъекты? Приведите примеры.

11. Какие связующие выполняют роль матриц у композитов с нанодисперсными наполнителями?

12. Назовите особенности композитов с углеродными наноразмерными наполнителями.

13. В чем заключаются преимущества многослойных углеродных трубок у композитов с углеродными наноразмерными наполнителями?

14. Назовите сферы применения композитов с углеродными наноразмерными наполнителями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Биметаллы и способы их получения. – URL. <https://znaytovar.ru/s/Bimetically-i-sposoby-ix-poluchen.html>.

2. Шабурова, Н.А. Материаловедение: часть II: Неметаллические материалы: учеб. пособие / Н.А. Шабурова. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – 82 с.

3. Корягин, С.И. Способы обработки материалов: учеб. пособие / С.И. Корягин, И.В. Пименов, В.К. Худяков. – Калининград, 2000. – 448 с. – ISBN 5-88874-152-3.

4. Композиционные материалы, виды и назначение. – URL. <https://infopedia.su/12x5298.html>.

5. Белевитин, В.А. Материаловедение: неметаллические материалы: учеб. пособие / В.А. Белевитин. – Челябинск: Изд-во Юж.-Урал. гос. гуман.-пед. ун-та, 2017. – 109 с. – ISBN 978-5-906908-64-3.

6. Винник, П.Г. Материаловедение: учеб.-метод. пособие / П.Г. Винник, О.Н. Морозова, А.Н. Копыл. – Ростов н/Д: ИПО ПИ ЮФУ, 2007. – 220 с.

7. Белевитин, В.А. Материаловедение: свойства металлов и сплавов: учеб. пособие / В.А. Белевитин. – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та, 2012. – 236 с. – ISBN 978-5-85716-917-9.

8. Волков, Г.М. Зернистый наполнитель композиционных материалов: метод. указания / Г.М. Волков. – М.: Ун-т машиностроения, 2015. – 22 с.

9. Белевитин, В.А. Упрочнение и восстановление деталей машин: справоч. пособие / В.А. Белевитин, А.В. Суворов – Челябинск: Изд-во Челяб. гос. пед. ун-та, 2015. – 251 с.: ил. – ISBN 978-5-906777-38-6.

10. Бражников, А.И. Об ультразвуковом контроле скорости потока жидкости без расстыковки трубопровода по методу Н.И. Бражникова / А.И. Бражников, В.А. Белевитин, Ф.И. Бражников и [др.] // Инженерно-физический журнал. 2006. – Т. 79. – № 2. – С. 131–138. – ISSN: 0021-0285.

11. Технология производства изделий из композиционных полимерных материалов. – URL. http://www.elar.urfu.ru/bitstream/10995/3568/12/1358540_lectures_ch_2.pdf.

12. Полимерные композиционные материалы: основные типы. URL.: <http://plastinfo.ru/information/articles/110>.

13. Полимерные композиционные материалы. – URL.: <http://www.studfiles.ru/preview/5056143/page:22/>.

14. Особенности проектирования узлов и деталей из полимерных композиционных материалов автомобильных конструкций. – URL.: <http://loganrenault.ru/html/osobennosti-polimer.html>.

15. Применение полимерных материалов в автомобилестроении. URL.: <http://loganrenault.ru/html/polimery.html>.

16. Фуллерены и углеродные нанотрубки: свойства и применение. – URL.: <http://labs.vt.tpu.ru/nano/nanotubes.htm>.

17. Структура нанотрубок. – URL. <https://ru.wikipedia.org/wiki/>.

18. Российские химики придумали пластик с глиняными нанотрубками. – URL. <https://nplus1.ru/news/2015/10/27/halloysite>.

19. Нанокompозиты на основе полимеров. – URL. <http://www.polymerbranch.com/publ/view/33.html>.

20. Нанополимерные суперконцентраты. – URL. <https://plastinfo.ru/information/articles/277/>.

21. Гапеев, С. А. Нанокompозитные пластмассы: технологии, стратегии, тенденции / С. А. Гапеев, А. В. Свирский, Л. И. Мельник // Збірка тездоповідей II Міжнародної (IV Всеукраїнської) конференції студентів, аспірантів та молодих вчених з хімії та хімічної технології (22-24 квітня 2009 р., м. Київ) [Электронный ресурс]. – Київ. – 2009. – URL. <http://srv.xtf.kpi.ua/z/tnr/caf/konferens/last/tezi2009>.

22. Нанокompозитные материалы. – URL. <https://present5.com/nanokompозитnye-materialy-kirichenko-yana-221-gr-ekonomicheskij-fakultet/>.

23. Минаев, А.А. Расчет параметров пластического формoизменения сортовых заготовок / А.А. Минаев, В.А. Белевитин, Е.Н. Смирнов // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1990. – № 12. – С. 26–28. – ISSN: 0368-0797 eISSN: 2410-2091.

24. Воронцов, В.К. К постановке и решению объемной задачи пластического течения методами экспериментальной механики / В.К. Воронцов, П.И. Полухин, В.А. Белевитин, В.В. Бринза // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1976. – № 4. – С. 75–80. – ISSN: 0368-0797 eISSN: 2410-2091.

25. Воронцов, В.К. К решению объемной задачи стационарного пластического течения металла методом координатной сетки / В.К. Воронцов, П.И. Полухин, В.А. Белевитин, В.В. Бринза // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1976. – № 9. – С. 77–80. – ISSN: 0368-0797 eISSN: 2410-2091.

26. Бражников, А.И. Ультразвуковой спектральный метод технологического контроля концентрации электролита Н.И. Бражникова / А.И. Бражников, В.А. Белевитин, Ф.И. Бражников и [др.] // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2005. – № 3. – С. 54–56. – ISSN: 2073-0004.

27. Голубчик, Р.М. О выборе оптимального соотношения диаметров валков и заготовки для винтовой прокатки / Р.М. Голубчик, В.К. Воронцов, В.А. Белевитин // Сталь. – 1982. – № 8. – С. 64–66. – ISSN: 0038-920X.

28. Бражников, Н.И. Ультразвуковой контроль и регулирование технологических процессов / Н.И. Бражников, В.А. Белевитин и [др.]. – М.: 2008. – ISBN: 5-98457-056-4.

29. Belevitin V.A. The Study of Three-Dimensional Flow of Metal under Free Forming / V.A. Belevitin, V.F. Obesnyuk, E.R. Logunova // Металлы. 2003. – № 1. – С. 26–32.

30. Карпенко, А.Г. Автомобильные эксплуатационные материалы: сб-к лаб. работ / А.Г. Карпенко, К.В. Глемба, В.А. Белевитин // Челябинск, 2014. ISBN 978-5-906777-00-3.

31. Белевитин, В.А. Актуализация значимости преподавательской в преподавании иностранного языка / В.А. Белевитин, Е.С. Савина, В.Г. Ульянова // В сб-ке науч. тр. Инновационные технологии в подготовке современных профессиональных кадров: опыт, проблемы. 2017. – С. 18–23.

32. Белевитин, В.А. Квалиметрическая оценка профессиональных и личных качеств педагогов профессиональных организаций / В.А. Белевитин, А.И. Тюнин, В.Г. Ульянова // В сб-ке науч. тр. Институциональная перезагрузка образовательной системы. Костанай, 2018. – С. 64–68.

33. Руднев, В.В. Моделирование ресурсов повышения экологической безопасности крупных городов: монография / В.В. Руднев, М.Л. Хасанова, В.А. Белевитин. – Челябинск: Изд-во Юж.-Урал. гос. гуман.-пед. ун-та, 2017. – 88 с.: ил. – ISBN 978-5-906908-38-4.

34. Белевитин, В.А. Операционно-зачетные работы по общеслесарной производственной практике: сб-к лаб. работ / В.А. Белевитин, А.В. Суворов, Е.П. Меркулов // ЧГПУ. – Челябинск, 2015. – ISBN 978-5-85716-998-8.

35. Воронцов, В.К. Исследование полей перемещений при прокатке квадратной полосы в овальном калибре / В.К. Воронцов, Ю.С. Атеф, В.В. Бринза и [др.] // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 1977. – № 5. – С. 101–105. – ISSN: 0368-0797 eISSN: 2410-2091.

36. Бражников, А.И. Бесконтактный одноканальный времяимпульсный расходомер жидкости / А.И. Бражников, В.А. Белевитин, Е.В. Бражникова, Е.Л. Иванов // Метрология. – 2004. – № 11. – С. 16. – ISSN: 0132-4713.

37. Белевитин, В.А. Ультразвуковой контроль качества кованых валов / В.А. Белевитин, Н.И. Бражников // Сталь. – 2000. – № 4. – С. 47–48. – ISSN: 0038-920X.

38. Гнатышина, Е.А. Профессионально-педагогическое образование на рубеже веков / Е.А. Гнатышина, Г.А. Герцог, А.В. Савченков, Л.П. Алексеева, Н.В. Уварина, Е.В. Гнатышина, Н.Ю. Корнеева, В.А. Белевитин: коллективная монография // Челябинск, 2014. – ISBN 978-5-9905576-6-6.

39. Карпенко, А.Г. Материаловедение. Расходные материалы автотранспортной техники: учебное пособие / А.Г. Карпенко, В.А. Белевитин // ЧГПУ. – Челябинск, 2013. –

ISBN 978-5-85716-959-9.

40. Smyrnov, Y.N. Physical and Computer modeling of new soft reduction Process of continuously cast blooms / Y.N. Smyrnov, V.A. Belevitin, et all. // Journal of Chemical Technology and Metallurgy, 2015. – 50. – № 6. – P. 12–17. – ISSN: 1314-7471 eISSN: 1314-7978.

41. Belevitin, V.A. Simulation of the macrostructure influence of forging ingots on the potential capabilities of obtaining high-quality forgings / V.A. Belevitin, Y.N. Smyrnov, S.Y. Kovalenko, A.V. Suvorov // Metallurgical and Mining Industry, Ukrmetallurginform “Scientific and Technical Agency”. Ltd., – 2016. № 7. P.18–23. ISSN: 2076-0507 eISSN: 2078-8312.

42. Smyrnov, Y.N. Defect Healing in the Axial Zone of Continuous-Cast Billet / Y.N. Smyrnov, V.A. Skliar, V.A. Belevitin, R.A. Shmyglya, O.Y. Smyrnov // Steel in Transiation, Allerton Press. 2016. – Vol. 46. – Nr . 5. – P. 325–328. – ISSN: 0967-0912 eISSN: 1935-0988.

43. Белевитин, В.А. Химические понятия и определения в обслуживании автомобильной техники: справ. пособие // В.А. Белевитин, Л.Ф. Манжукова, Л.Ф. Шарова. – Челябинск: 2017. – 131 с. – ISBN 978-5-906908-43-8.

44. Богатенков, С.А. Компетентностно-ориентированное управление подготовкой кадров в условиях электронного обучения: коллект. монография // С.А. Богатенков, Е.А. Гнатышина, В. А. Белевитин. – Челябинск : 2017. – 155 с. – ISBN 978-5-906908-39-1.

45. Серов, А.И. Промышленные испытания мелющих шаров повышенной твердости при измельчении железистых кварцитов // А.И. Серов, Е.Н. Смирнов, В.А. Скляр [и др.] // Обо-

гащение руд. – Москва: Издательский дом "Руда и металлы", 2017. – С. 15–20. – ISSN: 0202-3776.

46. Смирнов, Е.Н. Вопросы использования непрерывнолитой заготовки для производства сортового проката из конструкционных сталей / А.Н. Смирнов, Е.Н. Смирнов, В.А. Скляр и [др.] // Сталь. – М.: Изд-во: ООО "Интермет Инжиниринг", 2018. – № 4 (369). – С. 7-12. – ISSN: 0038-920X.

46. Belevitina, I.P. An Ultrasound Method for Controlling the Quality of Shaped Forgings / I.P. Belevitina, N.I. Brashnikov, V.A. Belevitin // Metallurgist : Изд-во: Springer New York Consultants Bureau, 1996. – Т. 39. № 10. – С. 198. – ISSN: 0026-0894 eISSN: 1573-8892.

48. Белевитин, В.А. Влияние тернарности представления учебной информации на повышение креативности обучающихся / В.А. Белевитин, Е.А. Гафарова, Ю.В. Корчемкина и [др.] // European Social Science Journal. – Москва: Изд-во: Автономная некоммерческая организация "Междун. иссл. институт", 2017. – № 6. С. 194-200. – ISSN: 2079-5513.

49. Белевитин, В.А. Магистерская диссертация: рекомендации по подготовке к защите. учеб. пособие / В.А. Белевитин, Е.А. Гнатышина, И.Г. Черновол. – Челябинск : 2016. – 158 с. – ISBN: 978-5-906777-87-4.

50. Смирнов, Е.Н. Исследование формоизменения и напряженно-деформированного состояния непрерывнолитой заготовки с дефектом формы «ромбичность» в процессе прокатки в прямоугольных калибрах / Е.Н. Смирнов, В.А. Скляр, С.А. Снитко и [др.] // Современные проблемы горнометаллургического комплекса: наука и производство. – Старый Оскол : 2016. – С. 147–152.

Учебное издание

**Белевитин Владимир Анатольевич, Гнатышина Елена Александровна,
Смирнов Евгений Николаевич, Хасанова Марина Леонидовна**

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ:
НОВЫЕ КОНСТРУКЦИОННЫЕ
МАТЕРИАЛЫ**

Учебное пособие

ISBN 978-5-907284-29-6

Работа рекомендована РИСом университета

Протокол № (пункт) от 2020 г.

Издательство ЮУрГГПУ

454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69

Редактор Л. Н. Корнилова

Компьютерный набор В.А. Белевитин

Эксперт М.С. Дмитриев

Подписано в печать _____

Формат 60x841/16 Объем _____ уч.-изд. л.

Бумага типографская Тираж 100 экз. Заказ №

Отпечатано с готового оригинал-макета

в типографии ЮУрГГПУ

454080, г. Челябинск, пр. Ленина, 69