Министерство образования и науки Российской Федерации
Институт структурной макрокинетики РАН
CIRIMAT (Центр межуниверситетских исследований материалов, г. Тулуза, Франция)
Международный центр материаловедения Карагандинского государственного технического университета
Восточно-Казахстанский государственный технический университет (г. Усть-Каменогорск)
Комитет по образованию и делам молодежи администрации Алтайского края
Алтайское отделение Международной Академии наук высшей школы
Сибирское отделение Академия инженерных наук им. А.М. Прохорова
УНПЦ "Композит" АлтГТУ
Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова

ТРУДЫ XIV МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ-КОНФЕРЕНЦИИ «ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ И ПРИКЛАДНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»

Изд-во АлтГТУ
Барнаул ● 2017

УДК 620.22-419.8

Труды XIV Международной научной школы-конференции "Фундаментальное и прикладное материаловедение" / под ред. В. Б. Маркина; Алт. гос. тех. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2017. – 176 с.; ил.

ISBN 978-5-7568-1240-4

Представлены избранные статьи участников XIV Международной научной школы-конференции "Фундаментальное и прикладное материаловедение", прошедшей в Алтайском государственном техническом университете им И.И. Ползунова в сентябре 2017 г. Выпуск сборника и его редакция проведены в соответствии с решением оргкомитета конференции.

Редактор сборника: доктор технических наук, профессор Маркин В.Б. – председатель оргкомитета конференции.

ISBN 978-5-7568-1240-4

© Алтайский государственный технический университет
им. И. И. Ползунова, 2017

Уважаемые читатели!

В этом сборнике представлены труды XIV международной школы-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение», проводимой по плану Министерства образования и науки Российской Федерации в Алтайском государственном техническом университете имени И.И. Ползунова.

Одним из перспективных направлений науки и техники XXI в. по праву считается сфера высоких технологий, базирующаяся на современном материаловедении. Нельзя представить технический прогресс без расширения класса конструкционных материалов, которые, как правило, появляются в результате исследований, проводимых учеными-материаловедами на различных уровнях: макро-, микро-, мезо-, и нано. Совокупность фундаментальных и прикладных исследований позволяет решать сложные материаловедческие проблемы, приводить их на уровень разработки и инновационного внедрения технологических решений. В последние годы интересы ученых направлены на передний край высокотехнологичных приоритетных направлений, к которым относятся развитие нанотехнологий и наноматериалов, формирование и развитие инфраструктуры наноиндустрии. Результатом таких исследований можно считать новые рецептуры высококачественных сталей, новые технологии создания композиционных материалов и покрытий, успехи медицинской техники, электроники и компьютерной техники.

Этому направлению соответствует и деятельность научных школ Алтайского государственного технического университета, признанного центра материаловедения не только в нашей стране, но и за рубежом. Синтез фундаментальной и прикладной направленности материаловедения отражен в статьях, опубликованных в этом сборнике.

Хотелось, чтобы разработки, представленные молодыми и маститыми учеными на нашей конференции, прошли по пути от научной до «потребительской» реализации идеи, что особенно важно сейчас, когда решен вопрос о коммерциализации вузовской науки и страна ждет от всех нас инновационного развития при создании новых материалов, изделий и образцов современной техники.

Желаю творческих успехов руководителям научных школ и авторам представленных в сборнике публикаций.

Доктор технических наук,
профессор ***В.Б. Маркин***

УДК 620.22–419.8:621.642.17

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МАТЕРИАЛЫ СОВРЕМЕННОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

В. Б. Маркин

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

Аннотация: *Одним из перспективных направлений применения композиционных материалов является современное машиностроение, для которого снижение материалоемкости и металлоемкости изделий представляет важную задачу. Особенно это касается таких отраслей машиностроения как авиастроение, ракетно-космическая техника, автомобилестроение, определяющих уровень технологического развития государства. Нельзя представить технический прогресс без расширения класса конструкционных материалов, которые, как правило, появляются в результате исследований, проводимых учеными-материаловедами на различных уровнях: макро-, микро-, мезо-, и нано.*

Ключевые слова: *композиционный материал, авиастроение, баллон давления, прочность, намотка.*

Основной текст: Одним из перспективных направлений науки и техники XXI века по праву считается сфера высоких технологий, базирующаяся на современном материаловедении. Нельзя представить технический прогресс без расширения класса конструкционных материалов, которые, как правило, появляются в результате исследований, проводимых учеными-материаловедами на различных уровнях: макро-, микро-, мезо-, и нано.

Совокупность фундаментальных и прикладных исследований позволяет решать сложные материаловедческие проблемы, приводить их на уровень разработки и инновационного внедрения технологических решений.

В последние годы интересы ученых направлены на передний край высокотехнологичных приоритетных направлений, к которым относятся развитие нанотехнологий и наноматериалов, формирование и развитие инфраструктуры наноиндустрии. Результатом таких исследований можно считать новые рецептуры высококачественных сталей, новые технологии создания композиционных материалов и покрытий, успехи медицинской техники, электроники и компьютерной техники.

Особенно хотелось бы остановиться на проблемах материаловедения, возникающих при подготовке новой техники, поскольку значимость этого направления особенно явно проявилась в авиационной, ракетной и ракетно-космической отраслях промышленности. Как выяснилось, перечень требований, предъявляемых здесь к конструкционным материалам, оказался достаточно широк, поэтому большин-

ство традиционных материалов, известных в 50-60-е годы, могли им соответствовать только частично.

Самыми «модными» становились удельные характеристики, т.е. отнесенные к значениям плотности. Это было связано с необходимостью снижения веса конструкции при сохранении необходимых прочностных характеристик и жесткости.

Успешные исследования в области металлургии способствовали появлению высокопрочных и жестких алюминиевых и титановых сплавов, позволивших значительно сократить применение более тяжелых сталей. Свыше двадцати лет эти материалы «царствовали» при создании новых самолетов и вертолетов, ракет-носителей на жидком топливе, космических аппаратов различного назначения.

В это время были разработаны новые технологические приемы изготовления изделий и их элементов (литье под давлением, высокоточная прокатка, сварка в нейтральных средах и др.), появилось совершенное оборудование, высококвалифицированные специалисты и металловеды. Трудно недооценить их вклад в развитие материаловедения, но есть упрямые факты, которые свидетельствуют о том, что за последние 50 лет прочность традиционных материалов выросла только на 10-15 процентов, в то время как модуль упругости – на 15-20 процентов [1]. При этом скорость наращивания приобретенных свойств со временем существенно снижалась. Это требовало разработки нового класса материалов, которые могли бы оказать существенную конкуренцию традиционным по основным механическим параметрам, а по удельным характеристикам, набору свойств и технологичности существенно бы их превосходили.

И такие материалы появились. Они получили название композиционных, т.е. сложных, материалов. Сложных потому, что состоят как минимум из двух компонентов или фаз, имеющих явно выраженную границу раздела, но получающие при этом свойства, отличающие их от свойств составляющих материалов.

Приоритет в создании таких материалов принадлежит природе, мы всегда удивлялись прочности пустотелых стеблей злаков, бамбука, прочности и гибкости древесины, необыкновенным свойствам коконов тутового шелкопряда и т.д.

Человек еще в далекой древности начал использовать способы упрочнения материалов с помощью волокон и частиц (знаменитые японские лаковые статуэтки, саманные кирпичи и др.), но, наука о композиционных материалах (или композитах, как их часто называют) в том виде, в котором она существует, появилась только благодаря применению их в ракетной технике.

В настоящее время композитные материалы используют в производстве авиационной и ракетно-космической техники, автомобилей, бытовых и спортивных това-

ров, различного оборудования [2, 5].

Объем производства композитов в промышленно развитых странах увеличивается с каждым годом и многие ученые считают, что XXI век станет веком композитных материалов. Появление таких материалов как углепластики, органопластики и боропластики существенно расширило объемы применения композитов в летательных аппаратах, стеклопластиковые конструкции получили существенный задел в «приземленных» областях техники.

Для отечественной практики использование композитов в авиастроении имеет важное значения, а результаты можно считать впечатляющими. Например, на самолете-гиганте «Руслан» были установлены детали и элементы конструкций из композитов общей массой 5,5 тонн, что позволило снизить массу летательного аппарата на 1,5 тонны и сэкономить в период эксплуатации не менее 18000 тонн горючего. Широко представлены композиционные материалы в самолетах нового поколения «ИЛ-96», «ТУ-204» и SSJ-100, МС-21.

В силовых конструкциях современных вертолетов на долю композитов приходится до 55 процентов общей массы. Это способствует не только снижению массы аппарата, но и увеличению ресурса работы в 2-3 раза при снижении трудоемкости их изготовления в 1,5-2 раза. Особенно заметен вклад композиционных материалов в авиастроении в последние годы (рисунок 1).

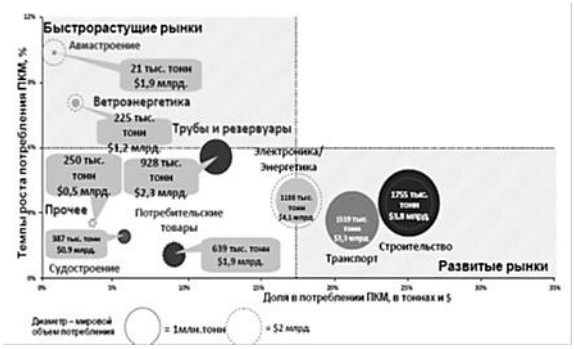


Рисунок 1 – Рынок потребления композиционных материалов

В концепции пятого технологического уклада отмечается, что не только технологии, но и материалы, используемые в них, должны соответствовать существенному снижению материало- и металлоемкости изделий и конструкций. На рисунке 2 приведены данные по применению композиционных материалов в планерах современных гражданских самолетов.

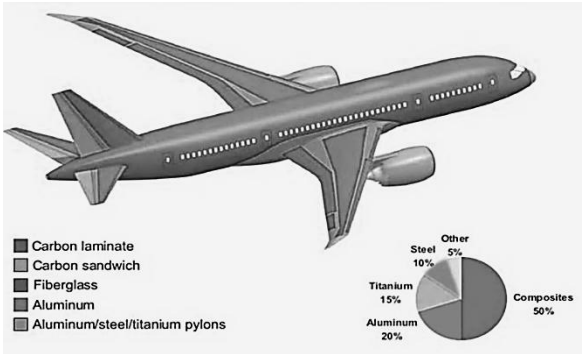


Рисунок 2 – Конструкционные материалы в планере современного самолёта Boing-787

Получение композиционных материалов с заданными физико-механическими характеристиками имеет ряд особенностей. Свойства материала формируются в процессе

производства конкретной конструкции. Процесс прое-ктирования изделия начинается с конструирования самого материала – выбора его компонентов и оптимизации режимов изготовления. Без учета особенностей технологии производства нельзя правильно назначить требования к композиционному материалу как к конструкционному.

Главная особенность создания конструкций из композитов, в отличие от традиционных материалов, заключается в том, что конструирования материала, разработка технологического процесса изготовления и проектирования самой конструкции – это единый взаимосвязанный процесс, в котором каждая из составляющих не исключает, а дополняет и определяет другую. Как говорят, триада материал – конструкция – технология неразделима [3].

Современные технологии изготовления изделий из композиционных материалов имеют высокую степень автоматизации, применяют самые совершенные программные средства. На рисунке 3 представлен процесс выкладки углепластика на оправку крыла российского самолёта МС-21.

Параметром, определяющим характер разрушения композиционных материалов при превышении предела прочности, можно считать коэффициент структурной безопасности, устанавливающий соотношение между отношением прочностных и упругих характеристик матрицы и армирующего волокна.

В результате в стеклопластиках и органопластиках происходит вначале разрушение матрицы, а затем разрушаются предоставленные самим себе волокна. Для углепластиков характерно хрупкое разрушение, при котором вначале разрушается волокно, а после этого – матрица [4].

Рисунок 3 – Автоматизированная система выкладки углеродной ленты на оправку «черного крыла» самолета МС-21

Нормализация коэффициента структурной безопасности и приближение его значения к единице возможно при использовании двухосновных связующих, либо при модификации поверхности армирующих волокон, в результате которой можно ожидать не только увеличение активности взаимодействия на поверхности раздела фаз, но и появления условий для релаксации напряжений. Этими вопросами занимаются ученые Алтайского государственного технического университета, разработавшие большое количество методов модификации поверхности слабоактивных по отношению к матричным материалам

углеродных и ряда органических волокон.

Одним из современных способов модификации прочностных характеристик полимерных композиционных материалов можно отметить элементы нанотехнологии - влияние наноразмерных частиц на процессы структурирования полимерной матрицы при отверждении. Исследования, проведенные в этом направлении с использованием наноразмерных детонационных алмазов, показали значительное повышение ударной вязкости композитов и стойкости к образованию трещин. В этом случае наночастица при структурировании матрицы является существенным фактором изменяющим ход магистральной трещины при достижении напряжения разрушения (рисунок 4).

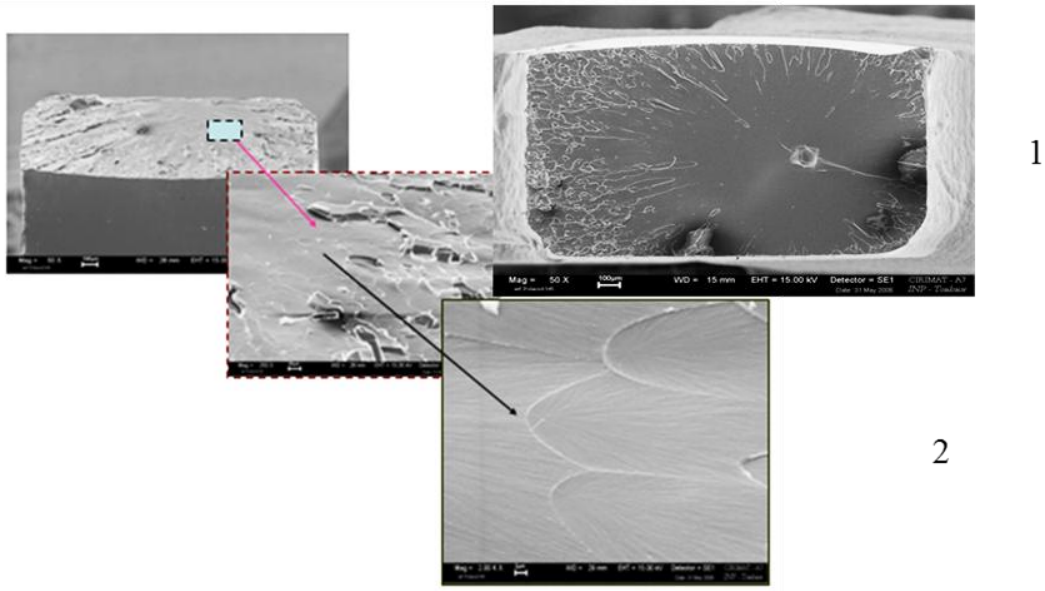


Рисунок 4 – Характер разрушения при действии ударной нагрузки образца эпоксидной матрицы, модифицированной наноразмерными алмазами, где 1 – поверхность разрушения, проходящая через наночастицу; 2 – последовательное увеличение зоны разрушения до проявления «охранного» свойства наночастицы по отношению к магистральной трещине [5]

Одной из приоритетных задач развития транспортной инфраструктуры России является так называемая «газомоторная революция», сущность которой заключается в переводе автомобильного транспорта с жидкого на газомоторное топливо. Предполагается к 2020 году перевести на газ половину общественного и коммунального транспорта городов-миллионников. Причинами, способствующими активному внедрению газомоторного топлива, являются следующие его преимущества:

- уменьшение количество вредных выбросов в выхлопных газах в 10–15 раз (выбросы парниковых газов снижаются более чем на 25 %);
- сокращение затрат на моторное

топливо, по сравнению с нефтепродуктами на 30–60 %, в зависимости от вида топлива;
- повышение безопасности (газ легче воздуха, и в случае утечки он тут же улетучивается, что значительно снижает риск возгорания)
- увеличение ресурса работы двигателя в 1,5–2,0 раза;
- положительный мировой опыт использования.

Реализация этого проекта невозможна без разработки и производства баллонов высокого давления, которые служат емкостями для хранения и транспортировки сжатых или сжиженных газов [6].

Баллон давления должен обеспечивать безопасную эксплуатацию и удовлетворять требуемым прочностным характеристикам. При выборе материала и технологии изготовления таких изделий необходимо руководствоваться принципом оптимальности, в котором целевой функцией выступает минимизация массы баллона. Малый вес баллона позволяет увеличить грузоподъемность транспортного средства, сократить затраты на его транспортировку и экономить топливо непосредственно при его эксплуатации. Кроме того, применение природного или сжиженного газа даёт серьёзный экологический эффект: уменьшается количество вредных выбросов автомобилей. При изготовлении баллона наиболее предпочтительно использование композиционных материалов, в частности стеклопластиков и углепластиков, однако максимально эффективным материалом для изготовления сверхлегких баллонов может быть органопластик. Это особенно важно, когда баллоны высокого давления применяются в различных областях современной техники как в качестве емкостей для хранения и транспортировки газов и жидкостей, так и в качестве систем пожаротушения и жизнеобеспечения аквалангистов и спасателей [7].

Исходя из условий работы, к конструкции баллона давления предъявляется ряд требований:

1. обеспечение безопасной эксплуатации;

2. удовлетворение прочностных характеристик;

3. обеспечение оптимальности, направленной на минимизацию массы баллона;

4. технологичность конструкции, которая подразумевает взаимосвязь и взаимообусловленность изделия, технологии производства, условий хранения и эксплуатации.

Баллоны давления для хранения сжатого природного газа можно изготавливать как из традиционных, так и из композиционных материалов, удельные характеристики которых представлены на рисунке 5.

Определение удельных характеристик для различных материалов позволяет оценить степень их соответствия условию оптимальности и подобрать максимально эффективный материал для изготовления баллона давления.

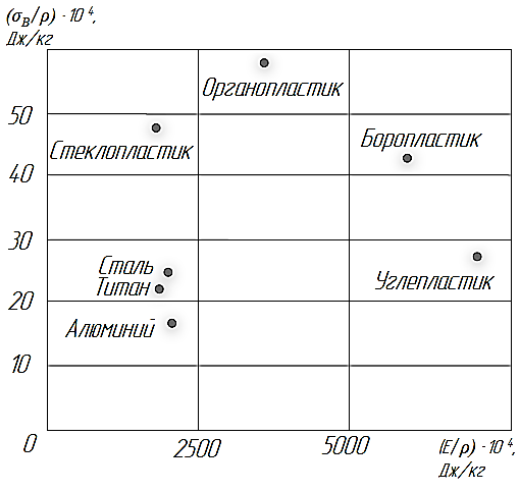


Рисунок 5 – Зависимость удельных характеристик конструкционных материалов, где $\sigma_в/\rho$ – удельная прочность, E/ρ – удельная жесткость

Как видно из рисунка, композиционные материалы обдают более высокими значениями удельной прочности и удельной жесткости, по сравнению с металлами и сплавами. Это свидетельствует о том, что масса готового изделия, выполненного из композита, будет меньше в 2–5 раз, чем масса аналогичного металлического баллона.

В результате проведенного анализа наиболее эффективным материалом для изготовления баллона, нагруженного внутренним давлением сжатого газа, оказывается органопластик. Для получения высокопрочных органопластиков применяют волокна на основе ароматических полиамидов (арамидов), механические свойства которых представлены в таблице 1.

Следует понимать, что использование высокопрочных армирующих волокон само по себе не дает гарантии достижения требуемых характеристик баллона.

Таблица 1 – Механические свойства арамидных волокон

Арамидное волокно, страна производитель	**Плотность ρ, кг/м^3**	**Предел прочности на растяжение σ$^+$, ГПа**	**Модуль упругости E, ГПа**	**Предельная деформация ε, %**
Русар-С, Россия	1450	5,5–6,0	155–165	2,5–3,0
Армос, Россия	1440	3,8–4,2	125–140	3,0–4,0
СВМ, Россия	1430	2,9–3,7	120–135	2,7–3,2
Кевлар 129, США	1450	3,0–3,6	70–80	3,3–3,9
Кевлар 29, США	1450	2,7–3,1	55–65	3,7–4,1
Технора, Япония	1430	2,8–3,2	70–80	3,8–4,0
Тварон, Нидерланды	1440	2,7–2,9	70–90	4,3–4,7

Важной характеристикой является степень реализации прочностных свойств армирующих волокон в композите, определяемая свойствами применяемой матрицы (отверждённого связующего), которая придает материалу монолитность, способствует равномерному распределению нагрузки между волокнами и перераспределению ее в случае утраты несущей способности части волокон, защищает волокна от химических, атмосферных и других внешних воздействий, а также воспринимает часть усилий, развивающихся в материале при работе под нагрузкой. Поэтому выбор связующего является одним из

определяющих факторов при проектировании и оптимизации производства баллона давления.

Технологический процесс изготовления баллона давления заключается в намотке армирующего наполнителя, пропитанного полимерным связующим, на оправку (лейнер), обеспечивающую герметичность баллона, представлен на рисунке 6.

После термического отверждения и контроля качества изготовления получаем баллоны высокого давления, разрушение которых происходит при внутреннем давлении около 80 МПа (800 атм.), рассчитанных на давление эксплуатации 29 МПа.

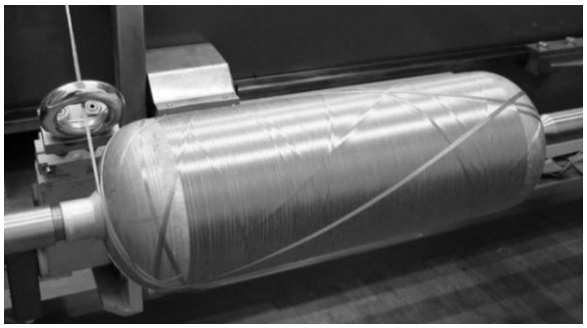
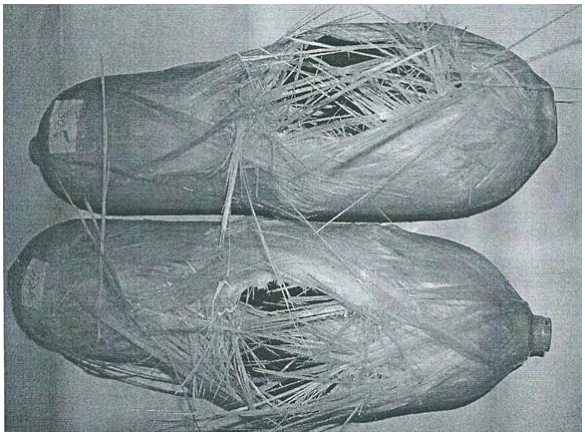


Рисунок 6 – Технологический процесс спиральной намотки баллона давления

На рисунке 7 показаны стеклопластиковые баллоны давления, полученные методом непрерывной намотки.

Масса стеклопластиковых баллонов с металлическим лейнером не превышает 3 кг. При использовании в качестве силовой оболочки углепластика масса баллона снижается до 1,5 кг при том же рабочем давлении 29 МПа. Применение арамидных армирующих волокон позволит снизить массу баллона еще на 20 %.

а



б

Рисунок 7 – Стеклопластиковые баллоны с металлическим лейнером до испытания (а) и после испытания внутренним давлением 80 МПа (б)

Таким образом, полимерные композиционные материалы находят все большее применение в современном машиностроении, способствуют значительному снижению металлоемкости и материалоемкости изделий и конструкций. Можно считать эти материалы материалами XXI века, соответствующими уровню пятого технологического уклада.

Список литературы:

1. Братухин А.Г., Сироткин О.С., Сабодаш П.Ф. Материалы будущего и их удивительные свойства. – М.: Машиностроение, 1995. – 128 с.

2. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 516 с.

3. Воробей В.В. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций: монография / В.В. Воробей В.Б. Маркин. – Новосибирск: Наука, 2006. – 190 с.

4. Маркин В.Б. Механика разрушения композитов с углеродным волокнистым наполнителем / В.Б. Маркин // Динамика стационарных трибосистем / под ред. А. А. Максименко. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1995. – С.19-24.

5. Ананьева Е.С., Маркин В.Б., Федорова Е.Н., Окаб Д. Дефектность и особенность разрушения полимерного материала, модифицированного ультрадисперсными углеродными частицами // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2009. Т. 6. – № 4. – С. 52-57.

6. Воробей В.В., Маркин В.Б. Основы технологии и проектирование корпусов ракетных двигателей: монография / В.В. Воробей, В.Б. Маркин. – Новосибирск: Наука, 2003. – 164 с.

7. Воробей В.В. Основы проектирование и технология сверхлегких композитных баллонов высокого давления: монография / В.В. Воробей, В.Б. Маркин. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. – 166 с.

© Маркин В.Б., 2017

МОРФОЛОГИЯ СЛЕДОВ СДВИГА В ГЦК-МОНОКРИСТАЛЛАХ И СПЛАВАХ

***Е. А. Алфёрова*[1], *Д. В. Лычагин*[1,2]**

[1]*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия*

[2]*Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

Аннотация: *В работе проведена количественная оценка деформационного рельефа, представленного следами скольжения и пачками следов в ГЦК-металлах и сплавах с использованием двух- и трехмерных параметров шероховатости. Установлено различие в морфологии и количественных характеристиках деформационного рельефа, сформированного в ГЦК-монокристаллах (Al, Ni), а также в упорядоченном и разупорядоченном сплавах Ni3Fe.*

Ключевые слова: *ГЦК-монокристалл, упорядоченный и разупорядоченный сплав, пластическая деформация, морфология поверхности, деформационный рельеф, количественная оценка.*

Введение. При пластической деформации металлических материалов на поверхности наблюдается деформационный рельеф, который является результатом внутренних процессов. Его индивидуальные особенности связаны с физико-механическими свойствами материала. В частности, с энергией дефекта упаковки (ЭДУ).

Механизм деформации, связанный с перемещением дефектов кристаллической решетки (дислокаций, дисклинаций, вакансий) является одним из несомненных. Элементарным структурным элементом деформационного рельефа (СЭДР), сформированным этим механизмом является след скольжения. При оптическом увеличении мы можем наблюдать следы сдвига, которые сформированы пачкой следов скольжения, а также другие более сложные СЭДР [1–6]. Одним из способов самоорганизации следов сдвига при деформации ГЦК-металлов и сплавов является формирование пачек следов сдвига. Настоящая работа посвящена количественной оценке и выявлению морфологических особенностей деформационного рельефа, представленного следами скольжения и пачками следов в ГЦК-металлах и сплавах.

Материал и методики. Экспериментальные результаты получены при сжатии монокристаллов чистых металлов никеля, алюминия и сплава Ni_3Fe с ближним (БП) и дальним (ДП) порядком. Картину рельефа исследовали на оптическом микроскопе Leica DM 2500P и конфокальном лазерном сканирующем микроскопе Olympus LEXT OLS4100. Были определены двух и трехмерные параметры шероховатости по ГОСТ Р ИСО 4287–2014 и

ГОСТ Р ИСО 25178-2-2014, соответственно (таблица). Значения параметров шероховатости оценивали с помощью программного комплекса Gwyddion.

Ra – среднеарифметическое отклонение профиля, Rq – среднее квадратическое отклонение профиля. Sa – арифметическое среднее высоты поверхности ограниченного масштаба. Sq – среднее квадратичное значение высоты поверхности ограниченного масштаба.

Экспериментальные результаты. На рис. 1 приведены профили поверхностей, занятых следами сдвига (рис. 1, *а*) и пачками следов (рис. 1, *б-г*).

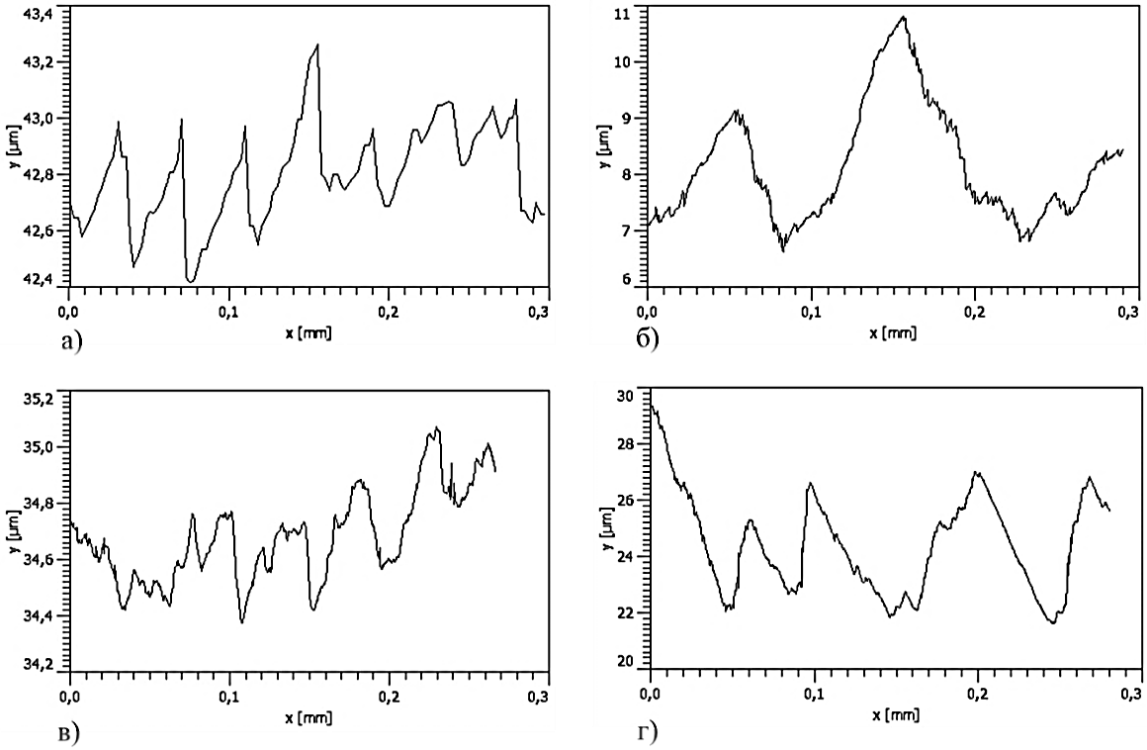


Рисунок 1 – Профиль поверхности: алюминий, e=27% (а), никель, e=20% (б), Ni3Fe ДП, e=16% (в), Ni3Fe БП, e=20% (г)

Видно, что наиболее широкие пачки (50…80 мкм) характерны для никеля, затем выделяются пачки следов в Ni_3Fe ближним порядком (30…50 мкм). Также можно отметить разную морфологию профиля поверхности.

В рассматриваемом случае для монокристалла алюминия не отмечалось формирования пачек. Ранее авторами на основе собственных исследований и анализа литературных данных было установлено, что величина сдвига для монокристаллов алюминия составляет порядка 15 нм, никеля – 130 нм, Ni_3Fe ДП – 50 нм, Ni_3Fe БП – 80 нм, для указанных выше степеней деформации [7].

Следовательно, с увеличением ЭДУ наблюдается рост величины сдвига. Была проведена количественная оценка деформационного рельефа с использованием пара-

метров шероховатости (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры деформационного рельефа

Параметр шероховатости	Ni_3Fe БП	Ni_3Fe ДП	Al	Ni
Ra, мкм	1,33±0,03	0,12±0,005	0,28±0,03	0,83±0,01
Rq, мкм	1,53±0,03	0,14±0,03	0,34±0,04	0,99±0,01
Sa, мкм	1,5	0,12	1,64	0,89
Sq, мкм	1,83	0,16	2,03	1,05

Благодаря полученным результатам была количественно показана разница в картине скольжения в монокристаллах и упорядоченном сплаве Ni_3Fe. Более грубые следы скольжения характерны для разупорядоченных сплавов по сравнению упорядоченными и монокристаллами. Значения параметров шероховатости отличаются на порядок.

Благодарим к.т.н., м.н.с. А.В. Филиппова за помощь в получении экспериментальных результатов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке *РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-60007 мол_а_дк*

Список литературы:

1. Girardin G. et al. Correlation between dislocation organization and slip bands: TEM and AFM investigations in hydrogen-containing nickel and nickel-chromium // Acta Mater. Acta Materialia Inc., 2015. Vol. 91. P. 141–151.

2. Ha S., Kim K. Heterogeneous deformation of Al single crystal: Experiments and finite element analysis // Math. Mech. Solids. 2011. Vol. 16, № 6. P. 652–661.

3. Kramer D.E., Savage M.F., Levine L.E. AFM observations of slip band development in Al single crystals // Acta Mater. 2005. Vol. 53, № 17. P. 4655–4664.

4. Alferova E.A., Lychagin D.V. Characterization of deformation pattern structure elements generated in uniaxial compression of nickel single crystals // Appl. Mech. Mater. 2013. Vol. 379. P. 66–70.

5. Лычагин Д.В. и др. Неоднородность деформации в монокристаллах никеля с разной иерархией структурных элементов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2007. Т. 4, № 2. – С. 26–35.

6. Лычагин, Д.В. Алферова, Е.А. Голосова, Т.Н. Лычагин, А.Д. Старенченко В.А. Роль октаэдрического скольжения в организации деформации ГЦК-монокристаллов // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2010. Т. 7, № 1. С. 106–111.

7. Лычагин, Д.В. Алфёрова, Е.А. Соколов А.П. Наноразмерные сдвиги на поверхности ГЦК-металлических материалов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. Т. 57, № 9–3. – С. 147–151.

© Алфёрова Е.А., Лычагин Д.В., 2017

СОЗДАНИЕ АВТОРСКОЙ ОТЛИВКИ С ПОМОЩЬЮ ЛИТЬЯ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМОЙ МОДЕЛИ

А. М. Достаева, Ж. С. Аманкелдина

Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Казахстан

Аннотация: *Представлено создание авторской отливки с помощью литья по газифицируемой модели, рассмотрены достоинства и недостатки данного способа литья.*

Введение. Для изготовления газифицируемой модели применяется пенополистирол, поэтому процесс также называется методом литья по пенополистирольным моделям. Литье по газифицируемым моделям (ЛГМ) было впервые запатентовано в 1958 г. в США как метод изготовления художественных отливок. Одной из первых таких отливок была бронзовая скульптура Пегаса, изготовленная в Массачусетском технологическом институте (США), массой 150 кг [1, с. 126].

Достоинствами этого способа являются:

- отсутствие разъема у модели любой сложности;
- исключение операции извлечения модели из формы, что значительно упрощает процесс изготовления модели и формы (нет дефектов по разъему, формовочных уклонов и др.);
- отсутствие отдельно изготовляемых и проставляемых стержней;
- процесс изготовления авторских образцов проще, чем при их изготовлении из глины, воска, пластилина;
- при формовке можно применять сыпучий материал без связующего, т. е. отпадает необходимость в приготовлении формовочных и стержневых смесей.

Модельные материалы. Материалом для изготовления модели служит пенополистирол, основную часть объема, которого занимает – воздух (более 99,8 %), и незначительную полимер-полистирол.

С учетом спецификации процесса к пенополистиролу предъявляются следующие требования:

- пенополистирол при минимальной плотности должен обладать достаточной прочностью, для того чтобы сохранять конфигурацию моделей в процессе их изготовления, хранения и формовки;
- модели должны иметь качественную поверхность;
- противопригарные краски должны полностью смачивать поверхность моделей и после высыхания сохранять хорошее с ней сцепление;

•температура газификации пенополистирола должна быть ниже температуры заливаемого металла;

Противопригарное покрытие. Противопригарное покрытие наносится на модель. Оно выполняет две функции: предохраняет отливку от пригара (при заливке чугуна и медных сплавов) и от образования грубой поверхности из-за неравномерного уплотнения смеси [2, с. 161].

Требования к противопригарным покрытиям:

- высокая газопроницаемость;
- хорошая адгезия к материалу модели;
- быстрое высыхание и упрочнение на воздухе;
- высокая прочность.

Основные этапы данного вида литья.

Изготовление моделей. Для художественных отливок модель изготавливается из готовых плит вспененного пенополистирола с помощью быстроходных фрез или приспособления с нагретой нихромовой проволокой, через которую пропускают электроток с напряжением 12 В. Отдельные части модели можно склеивать легковыгораемыми материалами.

Монтаж модельных блоков. Для литья по газифицируемым моделям применяется сифонная литниковая система, желательно с выпорами. Элементы литниковых систем изготавливаются из пенополистирола. Если литниковая система имеет большие размеры, то ее рекомендуется делать полой. Сборка модельных блоков производится склеиванием или сваркой.

Окрашивание моделей. Окрашивание моделей производится для предохранения их поверхностей от пригара и всей модели от деформирования. Противопригарное покрытие наносится кистью или методом погружения.

Формовка модели. При формовке сухим наполнителем без связующего используются перфорированные опоки с дном. На дно насыпается слой песка толщиной 10-30 мм и устанавливается модельный блок. Затем засыпается песок с постукиванием по стенкам опоки для его лучшего уплотнения.

Заливка металла. Заливка имеет решающее значение для качества поверхности отливки. Скорость заливки не должна быть повышенной или слишком медленной [3].

Учитывая возможности литья по газифицируемым моделям, нами был разработан эскиз будущей отливки. На данном эскизе изображен самолет.

Затем была создана модель отливки (рисунок 1). В данном случае

части модели и литниковой системы вырезались вручную при помощи канцелярского ножа, а отдельные детали склеивались клеем для пенополистирола.

После чего, производилась формовка модели. На дно опоки насыпался слой песка, затем устанавливались, так называемые, холодильники (рисунок 2).

Устанавливалась модель, проводилось формовка модели в сухом песке, постукивая опоку (рисунок 3).

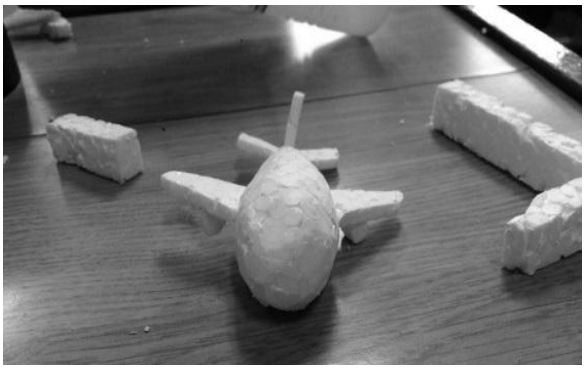


Рисунок 1 – Модель отливки

Рисунок 2 –Установление холодильников

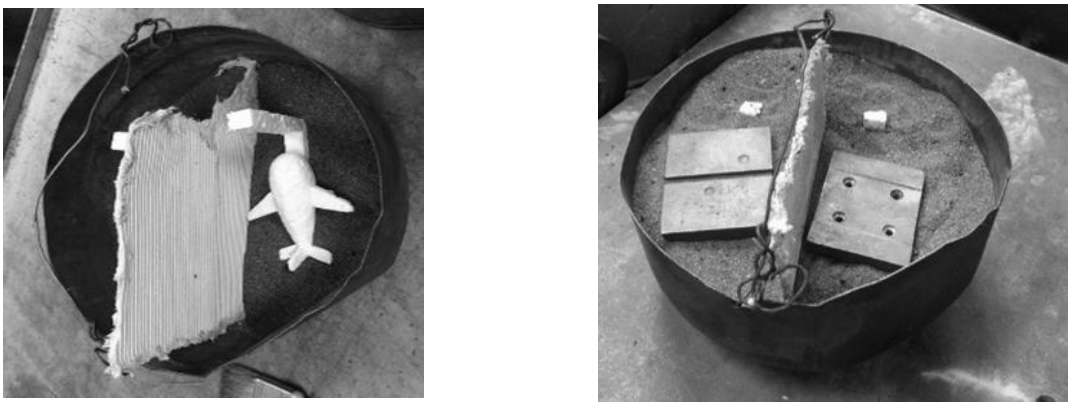


Рисунок 3 – Формовка модели

Следующим шагом было заливка металла в форму (рисунок 4). В качестве применяемого металла используется силумин, стандартная температура заливки, которого 850 ºС. Далее извлекается отливка (рисунок 5), происходит охлаждение, удаляются части литниковой системы. Полученная отливка (рисунок 6) обрабатывается с помощью шлифовальных инструментов.

Рисунок 4 – Заливка металла

Рисунок 5 – Полученная отливка

Рисунок 6 – Готовая отливка

В полученной отливке имеются деффекты, а именно неровность поверхности, чтобы не допустить такого деффекта при изготовлении модели рекомендуется выровнить поверхность модели.

Список литературы:

1. Исагулов А.З., Куликов В.Ю., Ковалёва Т.В., Щербакова Е.П. О реологических свойствах песчано-смоляных форм // Литейное производство. – 2015. – № 2. – С. 15-17.

2. Исагулов А.З., Куликов В.Ю. Вывод уравнения прессования песчано-смоляных смесей и их реологические модели // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2007. – № 6. – С. 52-56.

© Достаева А.М., Аманкелдина Ж.С., 2017

САМОРАСПРОСТРАНЯЮЩИЙСЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЙ СИНТЕЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ MAX-ФАЗ NB_2ALC И NB_4ALC_3

Н. И. Афанасьев, О. К. Лепакова, А. М. Шульпеков

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Томский научный центр Сибирского отделения Российской Академии Наук

Аннотация: *Представлены результаты исследования микроструктуры и фазового состава СВС-материалов на основе MAX-фаз Nb2AlC и Nb4AlC3 и электропроводящих свойств плёночных образцов на их основе.*

Ключевые слова: MAX-фаза, электропроводящие свойства

Благодаря особенностям строения кристаллических решёток, MAX-фазы характеризуются уникальным сочетанием физико-химико-механических свойств, что открывает широкие перспективы использования их при создании материалов, обладающих повышенными физико-механическими, эксплуатационными и функциональными свойствами [1 – 3]. В последнее время ведутся исследования по разработке и изготовлению плёночных нагревательных элементов. Возможность получения материалов с электропроводностью, изменяющейся в широких пределах, позволяющих использовать композиции в качестве токопроводящих материалов, обеспечивает всё возрастающее применение таких материалов в электротехнике. Сложный комплекс требований, предъявляемых к композиционным материалам с электропроводящими свойствами, в значительной степени можно удовлетворить выбором и оптимизацией характеристик применяемых материалов. Так, ранее было показано, что карбосилицид титана (Ti_3SiC_2), характеризующийся высокими значениями тепло- и электропроводности, может быть использован в качестве токопроводящего материала при создании плёночных нагревателей. [4]

В данной работе были синтезированы СВС-методом композиты на основе Nb_2AlC и Nb_4AlC_3, изучен фазовый состав, микроструктура и электропроводящие свойства пленочных образцов на основе указанных фаз с целью дальнейшей оптимизации физико-технологических, в частности, электропроводящих характеристик.

Проведён анализ продуктов СВ-синтеза в системе Nb-Al-C. Смеси порошков Nb, Al, C, рассчитанные на получение продуктов стехиометрических составов Nb_2AlC и NB_4AlC_3 являются малоэкзотермичными. Горение смесей порошков указанных составов проходит в спиновом режиме. По данным рентгено-фазового анализа в обоих случаях основными фазами являются MAX-фазы Nb_2AlC и Nb_4AlC_3. В продуктах синтеза также присутствуют карбид ниобия и в

небольшом количестве Al_2Nb_3C (рисунок 1).

В работе были изучены электропроводящие свойства компаундов, в которых в качестве токопроводящих наполнителей использовали измельченные продукты СВ-синтеза на основе Nb_2AlC и Nb_4AlC_3. В качестве связующего в полимерных компаундах использовали полиметилфенилсилоксан (ПФМС) и его смесь с эпоксидной смолой ЭДП.

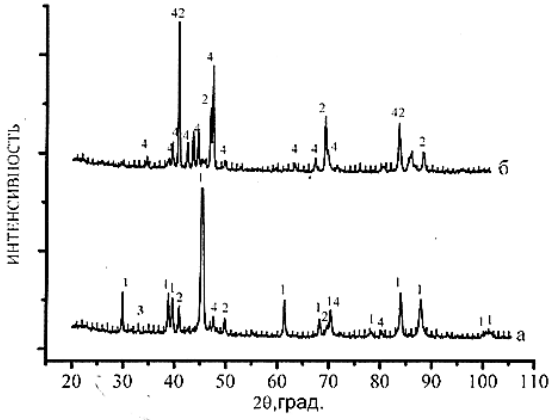


Рисунок 1 – Дифрактограммы СВС-композитов на основе Nb2AlC (а) и Nb4AlC3(б). Фазы: 1-Nb2AlC, 2-NbC, 3-Al2Nb3C, 4-Nb4AlC3

Из анализа полученных данных (рисунок 2) видно, что наилучшей электропроводностью обладают образцы, в которых в качестве связующего использовали смесь полиметилфенилсилоксана (ПФМС) с эпоксидной смолой (ЭДП).

Это, по-видимому, обусловлено химическими реакциями при повышении температуры между связкой и наполнителем.

При термолизе ПФМС при высоких температурах образуется пленка, состоящая в основном из оксида кремния, обладающего электроизоляционными свойствами. Пиролиз эпоксидной композиции приводит к образованию графитоподобных структур с высокой электропроводностью на поверхности частиц и в местах их контактов, что и объясняет улучшение электропроводности композиции в целом.

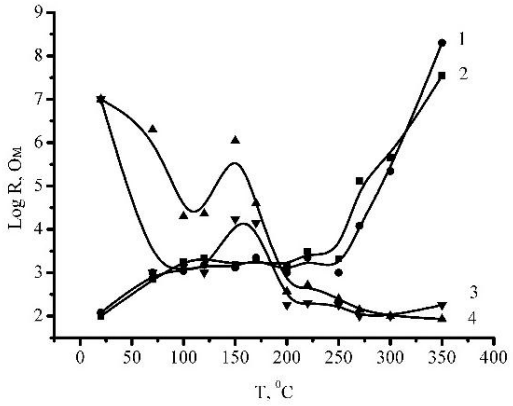
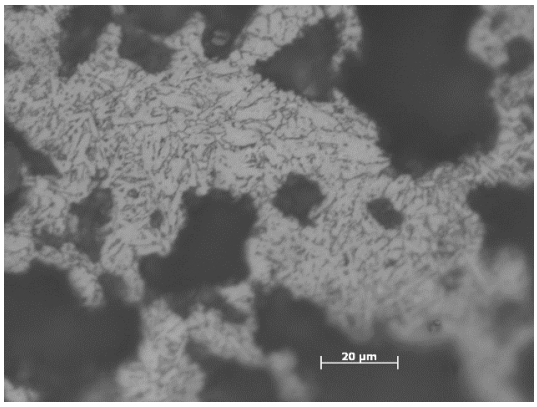


Рисунок 2 – Электрическое сопротивление покрытия при термообработке. Наполнитель: 1, 3 продукт на основе Nb4AlC3, 2, 4-на основе Nb2AlC, связующее: 1, 2 - ПФМС, 3, 4 -ПФМС+ЭДП

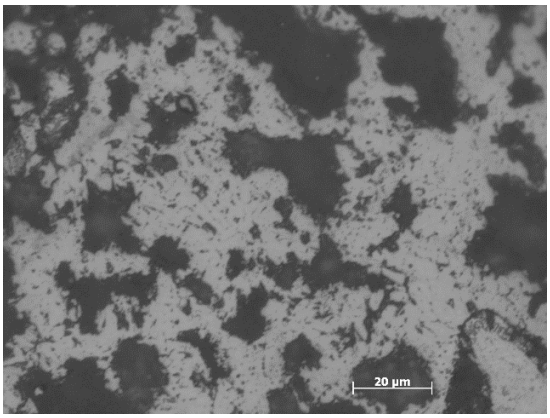
Сравнительный анализ электропроводящих свойств покрытий на основе Nb_2AlC и Nb_4AlC_3 с покрытиями на основе карбида и карбосилицида титана показал, что электрическое сопротивление последних во много раз меньше.

С целью улучшения электропроводящих характеристик исследованных материалов были начаты исследования по отработке составов наполнителей на основе Nb_2AlC и Nb_4AlC_3. Были проведены исследования влияния введения добавки олова на фазовый состав и микроструктуру продуктов СВ-синтеза системы Nb-Al-C. Анализировали

смеси составов: 2Nb + (0,8Al +0,2Sn) + C и 90%(4Nb+1,2Al+2,7C) + 10%Sn.



а)



б)

Рисунок 3 – Микроструктуры СВС-продуктов составов: а – 2Nb – (0,8Al +0,2Sn) – C, б – 90%(4Nb+1,2Al+2,7C) + 10%Sn.

Поскольку температура плавления олова 239,1 ^{o}C, то предполагалось, что введение олова в указанную систему будет интенсифицировать процесс горения в системе Nb-Al-C, с одной стороны, а с другой, приводить к получению продуктов с большим содержанием соединений с наноламинатной структурой составов Nb_2AlC и Nb_4AlC_3. По данным рентгенофазового и микроструктурного анализов введение Sn в систему Nb-Al-C привело к незначительному увеличению в продуктах СВ-синтеза фаз Nb_2AlC и Nb_4AlC_3 (рисунок 3).

Считаем целесообразным проведение дальнейших экспериментальных исследований по оптимизации составов на основе соединений системы NB –Al – C для получения полимерных покрытий с низкой электропроводностью.

Список литературы:

1. **Basoum, M.W.** The M_{n+1AXn} phases: A new class of solids. Thermodinamically Stable nanolaminates //Prog. Solid St. Chem.–2000. – №28. – P. 201 – 281.

2. **Basoum, M.W.** Ti_3SiC_2: a layered machinable ductile carbide. /M.W. Basoum, T. El-Raghy, M. Radovic //Interceram. –2000. – v.49. – №4. – P. 226 – 233.

3. Патент №2341839 Российская Федерация, МПК^{51} HO1C 7/00. Электропроводящий композиционный материал, шихта для его получения и электропроводящая композиция /Лепакова О.К., Голобоков Н.Н., Китлер В.Д., Шульпеков А.М., Максимов Ю.М. (РФ), заявитель Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Томский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук. – 2007140364/09; заявлено 31,10,2007, опубликовано 20,12,2008.

© Афанасьев Н.И., Лепакова О.К., Шульпеков А.М., 2017

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОНОННОГО СПЕКТРА $BeGeAs_2$

Ю. М. Басалаев, А. В. Копытов, И. С. Рябчиков

Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия

Аннотация: *В данной работе проведен расчет фононного спектра в наиболее симметричных точках и направлениях зоны Бриллюэна и плотности колебательных состояний в модели Китинга для $BeGeAs_2$ с решеткой халькопирита. Проанализированы парциальные вклады колебаний подрешеток. Расчеты проводились в феноменологической модели Китинга путем оптимизации рассчитанных частот и данных первопринципных расчетов.*

Ключевые слова: *фононный спектр, динамика решетки, плотность состояний, подрешетки, халькопирит.*

Тройные алмазоподобные полупроводники типа $A^2B^4C_2^5$ с решеткой халькопирита широко используются в качестве электрооптических материалов и материалов квантовой электроники. Динамика решетки этих соединений достаточно хорошо изучена как экспериментально, так и теоретически. Среди таких кристаллов есть большая группа гипотетических соединений с катионом Be, для которой проведены лишь теоретические исследования. В работе [1] проводились первопринципные расчеты структуры, химической связи, электронных и колебательных свойств в рамках теории функционала плотности, в том числе для $BeSiP_2$ и $BeSiAs_2$. Целью данной работы является исследование фононного спектра кристалла $BeGeAs_2$.

Расчёты проводились в модели Китинга, которая успешно используется для описания динамики решетки сложных полупроводниковых соединений с тетраэдрической координацией атомов. Подобные исследования проводились в работах [2-3]. Общее число параметров в модели для халькопиритов – шесть, из которых четыре константы короткодействия – две константы центрального взаимодействия α_1 и α_2, две угловые константы β_1 и β_2; кулоновское взаимодействие описывается двумя эффективными зарядами q_1 и q_2 в единицах заряда электрона (таблица 1). Параметры модели были определены путем оптимизации при сопоставлении теоретических данных и первопринципных расчетов, полученных в рамках теории функционала плотности с использованием кода CRYSTAL [4], гибридного обменно-корреляционного функционала B3LYP и равновесных параметров кристаллической структуры, полученных в результате полной оптимизации геометрии каждого кристалла.

Количественные значения частот и вклады колебаний подрешеток представлены в табл. 2.

Таблица 1 – Параметры модели

α_1, (10^3дин/см)	α_2, (10^3дин/см)	β_1, (10^3дин/см)	β_2, (10^3дин/см)	$q_1(e_0)$	$q_2(e_0)$
19,19	44,06	8,22	9,21	0,43	0,46

Анализ этой таблицы позволяет выявить влияние, как массового эффекта, так и сил связывания на поведение частот.

Следует отметить, что оптические частоты симметрии Γ_1 и Γ_2 связаны исключительно с колебаниями анионных подрешеток, поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать лишь оптические частоты с симметрией Γ_3, Γ_4 и Γ_5. Самые верхние оптические частоты отвечают колебаниям катионной Be подрешетки. Для следующей группы оптических частот характер колебаний существенно меняется и определяется уже колебанием катионной Ge и анионной As подрешеток, как и для самых нижних частот, однако в последнем случае парциальный вклад колебаний анионной подрешетки увеличивается.

Массы катиона IV группы и аниона мало отличаются (M_{Ge}=72,59, M_{As}=74,92), тогда как масса катиона II группы более чем в семь раз меньше (M_{Be}=9,01). В связи с этим «оптическая» (по происхождению из сфалеритного аналога) связка частот отделена от «акустической» (акустическая и нижняя оптическая связки) узкой запрещенной зоной (рисунок 1).

Также верхняя «оптическая» связка состоит их двух связок частот, отделенных друг от друга запрещенной зоной.

Таблица 2 – Значения частот и вклады колебаний подрешеток для $BeGeAs_2$

Симметрия		ω, $см^{-1}$	ω, $см^{-1}$	Вклады, %		
D_{2d}^{12}	T_d^2	(CRYSTAL)	(KEATING)	Be	Ge	As
Γ_1	W_1	206	211	0	0	100
Γ_2	W_1	241	238	0	0	100
	X_1	207	184	0	0	100
Γ_3	W_2	510	496	99	1	0
	X_3	279	261	0	69	31
	W_2	151	146	1	30	69
Γ_4 (TO/LO)	Γ_{15}	489/508	468/484	93	0	7
	W_2	285/287	291/291	2	54	44
	W_2	165/167	151/151	2	14	84
Γ_5 (LO/TO)	Γ_{15}	483/498	492/503	97	0	3
	W_4	440/441	461/465	96	0	4
	X_5	286/289	287/290	1	55	44
	W_3	272/272	265/266	0	66	34
	W_4	169/170	151/151	1	6	93
	X_5	116/116	140/140	0	41	59

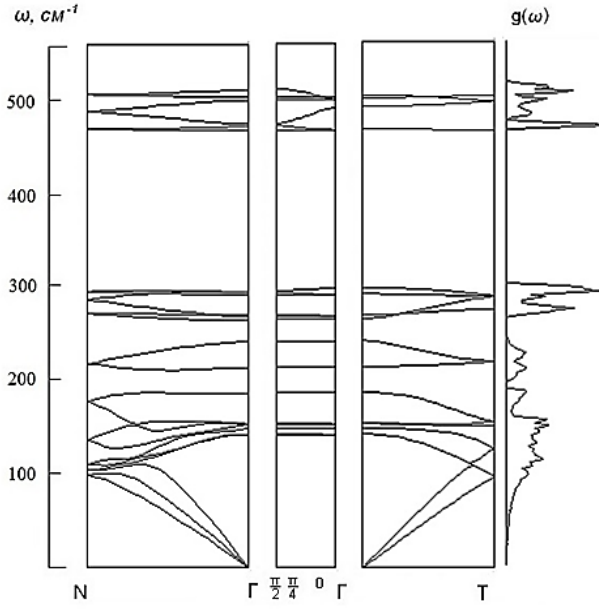


Рисунок 1 – Фононный спектр и плотность состояний кристалла BeGeAs2

В акустической связке представляет интерес анионная полоса, которая состоит из частоты Γ_1 и одна из частот Γ_2 (происходящих из частот симметрии W_1 сфалеритного аналога), и которая отделена от других фононных ветвей.

Эта закономерность связана с большой разницей в массе катиона и аниона.

Например, в работе [5] для соединений $BeSiX_2$ (X=P, As, Sb) подобная же группа также отделяется от остальных акустических ветвей, и её форма и расположение зависят от соотношения масс аниона и катионов.

Список литературы:

1. S. Fahad, G. Murtaza, T. Ouahrani, R. Khenata, M. Yousaf, S.B. Omran, S. Mohammad, Structural, elastic, electronic, bonding, and optical properties of $BeAZ_2$ (A= Si, Ge, Sn; Z=P, As) chalcopyrites // Journal of Alloys and Compounds, V. 646, 2015, P. 211–222.

2. Копытов А.В., Поплавной А.С., Рябчиков И.С. Исследование колебательных спектров кристаллов XSiP2 (X= Mg, Zn, Cd) // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2015. – № 12. – С. 450-452.

3. Копытов А.В., Поплавной А.С., Рябчиков И.С. Особенности колебательных спектров кристаллов $XGeP_2$ (X= Mg, Zn, Cd) // Труды XII Международной школы-конференции “Фундаментальное и прикладное материаловедение”, Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2015. – С. 24-27.

4. Dovesi R., Orlando R., Civalleri B., Roetti C., Saunders V.R., Zicovich-Wilson C.M. // Zeit. Kristallogr. – 2005. – V. 220, N 5-6. – P. 571.

5. Копытов, А.В. Зависимость фононных спектров кристаллов $BeSiP_2$ (X=P, As, Sb) от состава анионной подрешетки / А.В. Копытов, И.С. Рябчиков // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2016. – Т.13, № 4. – С.427-429.

© Копытов А.В., Поплавной А.С., Рябчиков И.С., 2015

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

С. А. Белякович, Е. А. Головина

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

Аннотация: *Радиационная стойкость – способность материала сохранять структуру и свойства во время и после воздействия радиационного излучения. Существенное влияние на радиационную стойкость оказывает вид излучение, размер дозы излучения, характеристик окружающей среды, свойств испытуемого материала и т.д.*

Ключевые слова: *радиационная стойкость, радиационное излучение, полимеры, ароматические кольца, антирады-стабилизаторы.*

Воздействие радиационного излучения. Под действием радиационного излучения в полимерах происходят реакции, приводящие к процессам старения материала.

Принципом действия радиационного излучения является первичная ионизация атомов и молекул, в результате чего происходит потеря электронов. Такое излучение неоднородно по своему составу и в электрическом поле расщепляется на α-(поток положительно заряженных ядер гелия), ß-(поток электронов), γ-излучение (электромагнитное излучение с крайне малой длиной волны).

Процессы старения под действием излучения обуславливаются возникновением дефектов в кристаллической решетке, ядерными реакциями и т.д. Радиационные дефекты представляют собой точечные дефекты, возникающие при облучении быстрыми частицами. При этом частице необходимо предать энергию Е, большую пороговой энергии смещения атома E_d, представляющую собой минимальную кинетическую энергию, необходимую атому для выхода в междоузельное пространство (E_d=4D, где D энергия отдельной связи). При наличии достаточного количества энергии у получившейся устойчивой пары Френкеля происходит волна дальнейших смещений, до тех пор, пока энергия смещённых атомов не достигает отношения $E<E_d$. Наибольшее влияние из множества элементарных частиц оказывают быстрые нейтроны.

Влияние на свойства материала при воздействии излучения также оказывают процессы, возникающее при столкновении ядер или элементарных частиц с ними – ядерные реакции. Процессы сопровождаются изменением квантового состояния и неуклонного состава исходного ядра, а также образованием новых частиц в продуктах реакции.

Реакция различных по структуре полимеров на радиационное воздействие. Воздействие излучения приводит к изменению физических свойств полимера, причём, в отличие от других твёрдых тел, где воздействие приводит к разрушению, в случае с полимерами физические свойства повы-

шаются. Как правило, облученный полимер обладает большей прочностью, большим модулем упругости, меньшей газопроницаемостью, имеет повышенную термическую и химическую стойкость.

Однако в каждом частном случае поведение полимера при облучении определяется его химическим строением. Наиболее стойкими являются ароматические соединения (арены), наименее стойкие - алифатические углеводороды. Высокая стойкость ароматических соединений обуславливается высокой энергией связи, энергия облучения для таких структур абсорбируется и рассеивается. Диссипация (т.е. рассеивание) происходящая в ароматических углеводородах объясняется наличием большого числа энергетических уровней в ядрах таких соединений, что обеспечивает рассеивание в короткие сроки и без проявления нежелательных эффектов. Помимо этого, полученная в результате облучения энергия не сосредотачивается на отдельных связях в полимере, а распределяется по всей системе. Исследование воздействия облучения на ароматические соединения были проведены в работах Болта, где органические соединения были подвергнуты воздействию потока тепловых нейтронов 1,41–1,63 $\cdot 10^{18}$ нейтрон/см^2, при температуре около 70 градусов.

Данные, приведённые в таблице, говорят о том, что на стойкость полимеров оказывают влияние боковые заместители. Это связано с обеспечением боковыми заместителями более простого проникновения излучения в кольцо и последующего распределения.

Таблица 1 – Зависимость стойкости полимеров от наличия боковых цепей

Соединение	**Ароматичность, %**	**Класс стойкости**
1-Метилнафталин	91	1
9-n-Додецилантрацен	54	2
Додецилнафталин	45	3
Октадецилнафталин	36	4
9-(-2-Фенил-этил)гептадекан	24	5
Октадецил-1,2,3,4-терагидронафталин	21	6
n-Гептадекан	0	7
9-(2-Циклогексилэтил) гептадекан	0	8
9-(3-циклопентилпропил) гептадекан	0	9

Помимо этого, на процесс сшивания полимера оказывает влияние расположение двойных связей относительно концов молекулы, окружающая среда (для некоторых полимеров на воздухе сшивание происходит значительно медленнее, по сравнению с вакуумом), а также добавки, введённые в полимер.

Полномерная оценка радиационной стойкости полимерного материала невозможна без учета фактора фазового состояния. При рассмотрении становится ясно, что вязкотекучие полимеры наиболее отзывчивы на радиационное воз-

действие, когда же полимеры в стеклообразном состоянии подвержены ему наименее. Также аморфная фаза легче поддаётся радиационному воздействию, и превращения в ней происходят легче, нежели в кристаллической фазе.

Поведение полимерного композиционного материала под воздействием радиационного излучения зависит от числа и характера дефектов в соединении до влияния на него.

Помимо прочего, условия окружающей среды непосредственно влияют на радиационные превращения. Скорость таких превращений возрастает при повышенных температурах, что особенно заметно при прохождении через температуры фазовых превращений. Влияние давления так же ярко выражено, значительное его повышение снижает скорость деструкции полимеров. Неотъемлемым фактором условий является дневной свет, представляющий собой совокупность видимого излучения, ИК излучения и УФ излучения. Совместное воздействие нескольких видом излучения приводит к еще более быстрым и глубоким изменениям в структуре полимеров.

В совокупности, приведённые выше факторы, значительно варьируют стойкость полимеров к радиационному излучению от нестойких к очень стойким полимерам. Данные, приведённые в таблице ниже, могут наглядно продемонстрировать радиационную возможность различных классов полимеров. В таблице 2 представлены дозы излучения, при которых прочность соединения уменьшается вдвое.

Таблица 2 – Дозы радиационного излучения, приводящие к понижению свойств полимерных материалов в 2 раза

Полимер	D, МГр	Полимер	D, МГр
Политетрафторэтилен	0,01	ПЭНД	3
Политрифторхлорэтилен	0,03	Полиуретаны	3
Полиметилметакрилат	0,3	Меламиноформальдегидная смола	4
Поликапролактам	0,6	Поликарбонаты	5
Полипропилен	1	Полистирол	5
ПЭВД	1	Эпоксидная смола ЭД-10	15
Поливинилхлорид	1,5	ЭТЗ-10	30
Полиэтилентерефталат	2	КМУ-1Л	30
Полиэфирная смола		КМУ-4Л	30
ТГМ-3	2	Полиамиды	100

Радиационная стойкость арамидных волокон. Как было сказано ранее, введение ароматических ядер в структуру полимера значительно повышает его радиационную стойкость. При рассмотрении арамидов в ряду от жирноароматических полиамидов до ароматических стойкость так же увеличивается. К примеру, при облучении поли-*п*-ксилиленсебацинамида дозой 100 МРад его термомеханические свойства подверглись резкому изменению, однако полностью ароматические полиамиды сохранили первоначальные свойства до дозы практически равной 1000 Мрад. Наилучшим образом показал себя ароматический

политерефталамид, сохранивший исходные свойства до дозы облучения равной 1200 МРад.

При испытаниях изменения прочностных и деформационных характеристик волокон Кевлар под действием радиации были получены данные, представленные на рисунке 1.

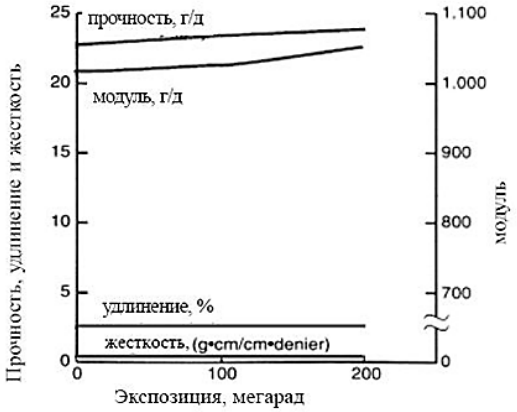


Рисунок 1 – Влияние радиации на механические характеристики волокна Кевлар

При дозе облучения равной 200 МРад прочность и модуль упругости волокон возрастают. Исходя из этого, можно предположить, что доза 200 МРад является пороговой, ниже которой в полимере преобладают деструкционные процессы, а выше – сшивание по амидным группам. Достаточно высокий пороговый уровень Кевлара достигается за счет защитного действия фенильных колец. При замене метильных групп на фенильные энергия, требуемая для образования поперечных связей, значительно увеличивается, что требует воздействия больших доз облучения на волокно для сшивания.

Модификация полимеров, с целью увеличения радиационной стойкости. В качестве способа повышения радиационной стойкости полимера путём устранения дефектов используется отжиг. Для воздействия на каждый дефект ему необходимо передать определённое количество энергии E_a – энергия активации отжига. Зависимость накопления нужного количества энергии E_a от температуры обуславливает использование нагрева как основного условия отжига. Для радиационных дефектов возможно применение как изотермического отжига (выдержка при неизменной температуре в течение долгого времени), так и изохронного отжига (выдержка возрастающих температур в течение одинакового отрезка времени). Первый вид отжига нецелесообразен при большой энергии активации отжига, т.е. большой энергии связи комплекса дефектов, т.к. в таком случае дефекты находятся в большом температурном диапазоне.

При изохронном отжиге дефектов можно выделить пять стадий процесса.

Дефекты в структуре, являются центрами рассеивания носителей заряда, поэтому р находится в прямой зависимости от их количества.

В течение первой стадии происходит рекомбинация близко расположенных пар Френкеля, за счёт движения атомов в междоузлиях.

Во второй стадии происходит распределение атомов из междоузлий.

Во время роста температуры в третьей стадии отжига начинается процесс распада кластеров, например, распады комплексов междоузельных атомов и примесных атомов.

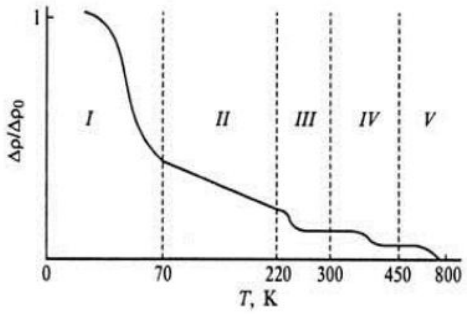


Рисунок 2 – Стадии процесса при изохронном отжиге дефектов, где Δр - удельное сопротивление

На завершающих четвёртой и пятой стадиях происходят конечные процессы миграции вакансий и рекристаллизации, с интенсивным выходом дефектов на поверхность.

Радиационная стойкость некоторых высокомолекулярных соединений, таких как полиолефины, может быть повышена путём введения ароматических соединений, однако в большинстве случаев эффективность этого метода мала. Большую эффективность показывают антирады-стабилизаторы, тормозящие старение полимеров под действием радиационного излучения. В качестве антирадов применят ароматические соединения с конденсированными кольцами и стабильные радикалы.

Для улучшения стойкости применим метод сшивки – закрепление расположения макромолекул в полимере за счёт прочных ковалентных связей. Однако, в связи с уменьшением гибкости полимера, он повышенную жёсткость и хрупкость, пониженную прочность при истирании.

Для защиты уже готовых изделий от радиационного воздействия применимы многослойные покрытия, наносимые с помощью клеевой основы на наружную поверхность изделия. Преимущественно используется для радиационных космических объектов. В качестве подслоя в таких покрытиях используется раствор полибутилтитаната или раствор элементоорганических соединений. В слое покрытия в качестве матрицы используется кремнийорганический полимер, а в качестве неорганического наполнителя слой материала, содержащего порошки тяжелых металлов и структурирующий агент на основе смеси эфира ортокремниевой кислоты и продуктов его гидролиза.

Подводя итоги, можно еще раз отметить, что наиболее радиационно-стойкими соединениями являются ароматические соединения, за счет высоких энергий связей, обеспеченных циклическим строением. И т.к. основное воздействие излучения основано на образовании точечных дефектов, то наиболее применимым методом устранения влияния является отжиг полимеров.

Список литературы:

1. Дубинин, Г.Н., Авраамов Ю.С. Конструкционные, проводниковые и магнитные материалы. – М.: Машиностроение, 1973. – 374 с.

2. Нейман, М.Б. Старение и стабилизация полимеров. – М.: Наука, 1964.

3. Пакшвер, А.Б. Физико-химические основы технологии химических волокн. – М.: Химия, 1972. – 48 с.

4. Любин, Дж. Справочник по композиционным материалам. – М.: Машиностроение, 1988. – 7 с.

5. Шустова, О.А. Полимеризационные пленкообразователи. – М.: Химия, 1971. – 132 с.

© Белякович С.А., Головина Е.А., 2017

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЛИМЕРА ПОСРЕДСТВОМ ХОЛОДНОЙ ВЫТЯЖКИ

С. А. Белякович, Е. А. Головина

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

Аннотация: *Ориентационная вытяжка – это распространенный технологический прием, при котором зажатый с двух концов полимерный материал растягивается в 10-100 раз. Внутри растягиваемого материала идут процессы перестроения как цепных молекул, так и надмолекулярных структур. Под действием растягивающих усилий межмолекулярные связи разрушаются, а конформации макромолекул расправляются вдоль оси вытяжки. Это возможно при достаточной гибкости макромолекул, когда полимер находится в высокоэластическом состоянии. В соответствии с сеточной моделью полимера, ориентационная вытяжка заключается в том, что передавливаемое через узлы сетки внешнее усилие распрямляет и поворачивает в направлении оси действия силы участки молекул между узлами. Этот процесс может идти как при фиксированных узлах, так и при значительном изменении их содержания и вида, что определяется условиями ориентационной вытяжки. Наличие надмолекулярных структур сильно влияет на процесс ориентации.*

Ключевые слова: *холодная вытяжка, фибрилляция полимера, шейка фибриллы, высокоразвитая межфазная поверхность.*

Основным процессом, происходящим при холодной вытяжке помимо ориентации звеньев макромолекул, является фибрилляция полимера. Условием возможности протекания процесса является наличие исходной неоднородности структуры, допускающей возможность преобразования на молекулярном уровне при температурах ниже температур плавления и стеклования.

Само по себе явление фибрилляции представляет собой проявление анизотропии волокнообразующих полимеров, что ограничивает сферу работы таких материалов как армирующих. Однако благодаря приобретенной форме волокна материалы с их применением выигрывают в трещиностойкости за счет комплексного механизма торможения роста трещины. Разрушение такого материала обязательно проходит через стадию межфибриллярного расщепления волокна.

Следствием любого рода вытяжки является образование и дальнейшее распространение шейки, с которой и начинается процесс фибрилляции. На начальном этапе, когда фибрилляции подверглась только шейка, отчетливо наблюдается граница между ориентированной и не ориентированной частью макромолекулы. На этой границе также обнаружено интенсивное диффузионное рассеяние, что говорит о том, что в процессе холодной вытяжки ориентация полимера сопровождается образованием рыхлости и микропустот на поверхности полимера. Это объясняется возрастающей способностью к колеба-

тельным движениям молекул на месте растяжения, что позволяет некоторым из них сблизиться до степени действия сил Ван-дер-Ваальса. Из-за присутствия ограниченности движения объединения звеньев происходит неравномерно, что приводит к образованию пустот в переходной фазе. А полученные на шейке фибриллы обладают иными физико-механическими свойствами и границей раздела, т.е. представляют отдельную фазу полимера, внутри которой он находится в стеклообразном состоянии.

Новообразованная фаза является термодинамически неустойчивой и обладает большой поверхностной энергией. Вытяжка приводит к значительному удлинению цепей, которые начинают беспорядочно коагулировать между собой, что изображено на рисунке 1 (в). Образованию «слипшейся» шейки препятствует адсорбионно-активная среда.

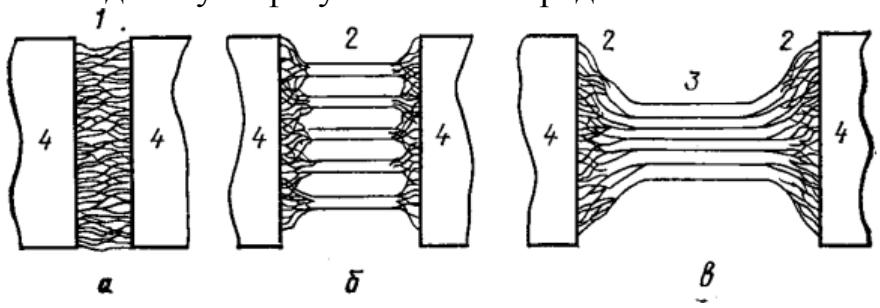


Рисунок 1 – Схема, иллюстрирующая процесс холодной вытяжки полимера в различных стадиях, где 1 – концентратор напряжения, 2 – переходная стадия, 3 – шейка, 4 – блочный неориентированный полимер

Более наглядной информацией о слипании боковых поверхностей фибрилл являются фотографии на рисунке 2, где представлен ПЭТФ, «вытянутый» в n-пропаноле.

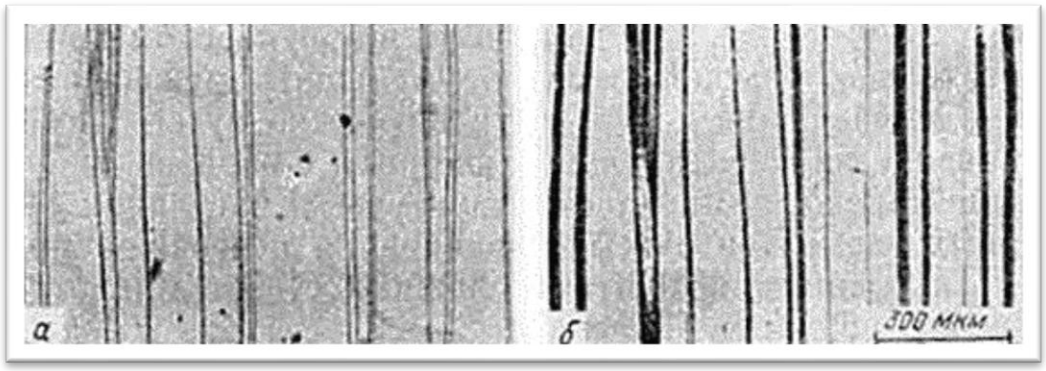


Рисунок 2 – Микрофотографии образца ПЭТФ, растянутого в n-пропаноле, где а – влажный образец, б – сухой образец

На фотографии влажного образца видны только контуры микротрещин, внутри которых находится материал из тонких и потому не рассеивающих свет фибрилл. На второй фотографии после удаления активной жидкости произошло слипание фибрилл боковыми по-

верхностями, образовав фибриллы значительно больших размеров и уже способных рассеивать свет.

Дальнейшая вытяжка полимера представляет собой перемещение переходного слоя шейки вдоль всего образца. В результате деформация является необратимой для всех полимеров, находящихся ниже температуры стеклования в высоко-эластичном состоянии.

График зависимости обратимой деформации от степени вытяжки, приведенный на рисунке 3, говорит о том, что у ориентированных полимеров значительно изменяются механические свойства.

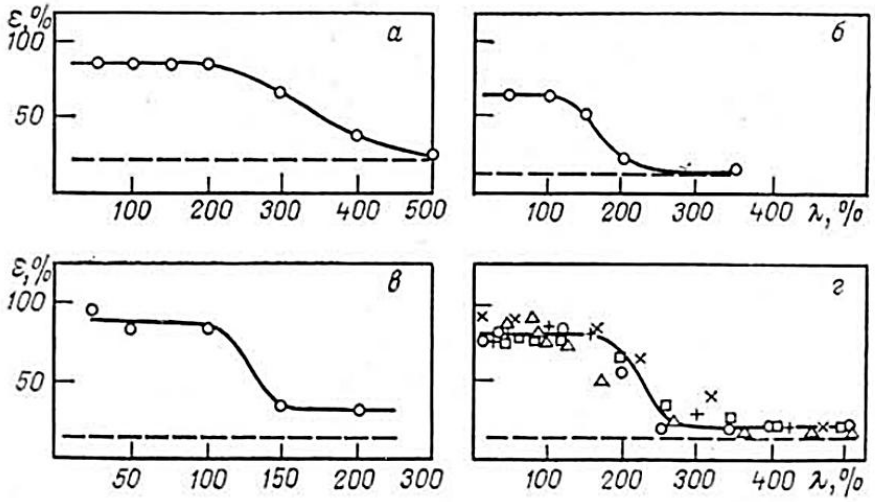


Рисунок 3 – Зависимость обратимой деформации от степени вытяжки в адсорбционно-активной среде при растяжении, где а – в n-пропаноле, б – метилэтилкетоне, в – метаноле, г – в n-пропаноле, формамиде, триэтиламине, бутилиодиде.

Заметно, что большие обратимые деформации проявляются в областях небольших значений удлинения. Также для каждого полимера имеется предельное значение удлинения, по достижению которого обратимые деформации резко уменьшаются.

Таким образом, деформированные путем холодной вытяжки полимеры приобретают иные свойства общего характера, т.е. получение подобных материалов не связано с необходимостью получения новых материалов.

Применение такого рода материалов связано с основной их характеристикой – высокоразвитой межфазной поверхностью. Это позволяет найти им применения в качестве пористых полимерных адсорбентов, облегчает введение различного рода добавок.

Список литературы:

1. Волынский, А.Л., Бакеев, Н.Ф. Высокодисперсное ориентированное состояние полимеров. – М.: Химия, 1984. – 187 с.

2. Бартенев, Г.М. Физика полимеров. – М.: Химия, 1990.

3 Любин, Дж. Справочник по композиционным материалам. – М.: Машиностроение, 1988. – 7 с.

© Белякович С.А., Головина Е. А. 2017

ДИНАМИКА РЕШЕТКИ ОРТОРОМБИЧЕСКИХ КРИСТАЛЛОВ В МОДЕЛИ КИТИНГА

К. А. Гордиенко, А. В. Копытов

ФГБОУ ВО Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия

Аннотация: *В рамках модели Китинга произведён расчет фононных спектров в наиболее симметричных точках и направлениях зоны Бриллюэна для кристаллов $LiInS_2$ и $LiInSe_2$ в орторомбической фазе. Исследована зависимость фононного спектра при изменении состава кристаллов.*

Ключевые слова: *динамика решетки, фононные спектры, халькопирит, орторомбическая структура.*

В данной работе для расчета фононных спектров кристаллов с орторомбическим типом структуры $LiInSe_2$ и $LiInS_2$ была использована модель Китинга, которая в основном используется для исследования динамики решетки кристаллов с тетрагональной атомной координацией. Основной целью настоящей работы является реализация модели Китинга для орторомбической фазы кристаллов халькопирита.

В модели Китинга [1] потенциальная энергия кристалла записывается в виде:

$$U = \frac{2}{A^2}\sum_{n,m}\alpha_{nm}\{\mathbf{R}(nm)\mathbf{R}(nm) - \mathbf{R}^0(nm)\mathbf{R}^0(nm)\}^2 + \\ + \frac{2}{A^2}\sum_{n,m,k>m}\beta_n^{mk}\{\mathbf{R}(nm)\mathbf{R}(nk) - \mathbf{R}^0(nm)\mathbf{R}^0(nk)\}^2, \quad (1)$$

где коэффициенты α_{nm} и β_n^{mk} являются *аналогом* жесткости пружин между атомами в кристалле.

Для кристаллов с тетраэдрической структурой широкое применение получил вариант, предложенный Китингом для кристалла типа алмаза и обобщённый Мартином на кристаллы с решёткой сфалерита [2]. Затем модель Китинга с успехом применялась и для кристаллов с решеткой халькопирита [3]. К достоинствам этой модели следует отнести инвариантность потенциальной энергии относительно вращений и перемещений кристалла как целого, наглядность используемых параметров, допускающих простую химическую интерпретацию, возможность перенесения силовых характеристик ковалентной связи из соединения в соединение. Ионная составляющая связей учитывалась с использованием кулоновского взаимодействия жестких ионов [4], рассчитанного методом Эвальда [5]. Общее число параметров в модели Китинга для орторомбических кристаллов – девять, из которых семь констант короткодействия – две константы центрального взаимодействия (α) и пять угловых констант

(β); кулоновское взаимодействие описывается тремя эффективными зарядами (q). Параметры модели определялись путем оптимизации при сопоставлении теоретических и экспериментальных или первопринципных частот.

Ниже представлены данные кристаллов $LiInS_2$ и $LiInSe_2$ в орторомбической фазе, а также результаты расчетов фононных симметричных точек и направлений зоны Брилюэна.

Таблица 1 – Параметры, для кристаллов $LiInS_2$ и $LiInSe_2$ используемые в работе ($X = S, Se$)

Кристалл	a[6,7]	b[6,7]	c[6,7]	α_{LiX}	α_{InX}	β_X^{LiX}	β_X^{InX}	β_{Li}^{XLi}	β_{In}^{XLi}	β_{In}^{XIn}	Z_{Li}	Z_{In}
$LiInS_2$	6.89	8.05	6.48	13.2	52.7	2.61	11.10	0.65	0.65	0.39	0.5	0.03
$LiInSe_2$	7.18	8.39	6.78	8.5	42.0	2.61	11.10	0.65	0.65	0.39	0.6	0.03

Параметры решетки, короткодействующих сил, а также эффективный заряд, используемые в данной работе представлены в табл.1. Одинаковые значения для угловых констант в обоих кристаллах объясняется их незначительным влиянием на колебательный спектр – большее влияние оказывают константы прямого взаимодействия. Результаты вычислений приведены на рисунке 1 и в таблицах 2, 3.

Как видно из рисунка 1, общая топология спектров совпадает с расчетами, проведенными с использованием первопринципной модели [8], хорошо видно отделение «оптической» связки частот (по происхождению из сфалеритного аналога) и «акустической» частей спектра. Для кристалла $LiInSe_2$ в оптической части спектра хорошо заметны несколько запрещенных полос частот. В спектре $LiInS_2$ эти полосы частично исчезают из-за движения ветвей вниз и вверх соответственно – в работе [8] видно вырождение в точке Г на уровне 200 $см^{-1}$.

Из сравнения спектров между собой видно влияние массы аниона на колебательный спектр – Средняя часть спектра кристалла $LiInS_2$ заметно поднимается в спектре $LiInSe_2$. Отличие максимальных частот колебаний в двух разных спектрах можно объяснить более чем в два раза меньшей массой S по сравнению с Se.

В таблицах 2, 3 приведены вклады в поперечные колебания оптических частот симметрии A_1, B_1, B_2, активных в ИК области и вклады для мод симметрии A_2 орторомбических кристаллов $LiInS_2$ $LiInSe_2$. Можно отметить, что для обоих кристаллов в верхнюю часть спектра (306 – 357, 387 – 430 $см^{-1}$) наибольший вклад дает легкая подрешетка лития (≈80%-90%).

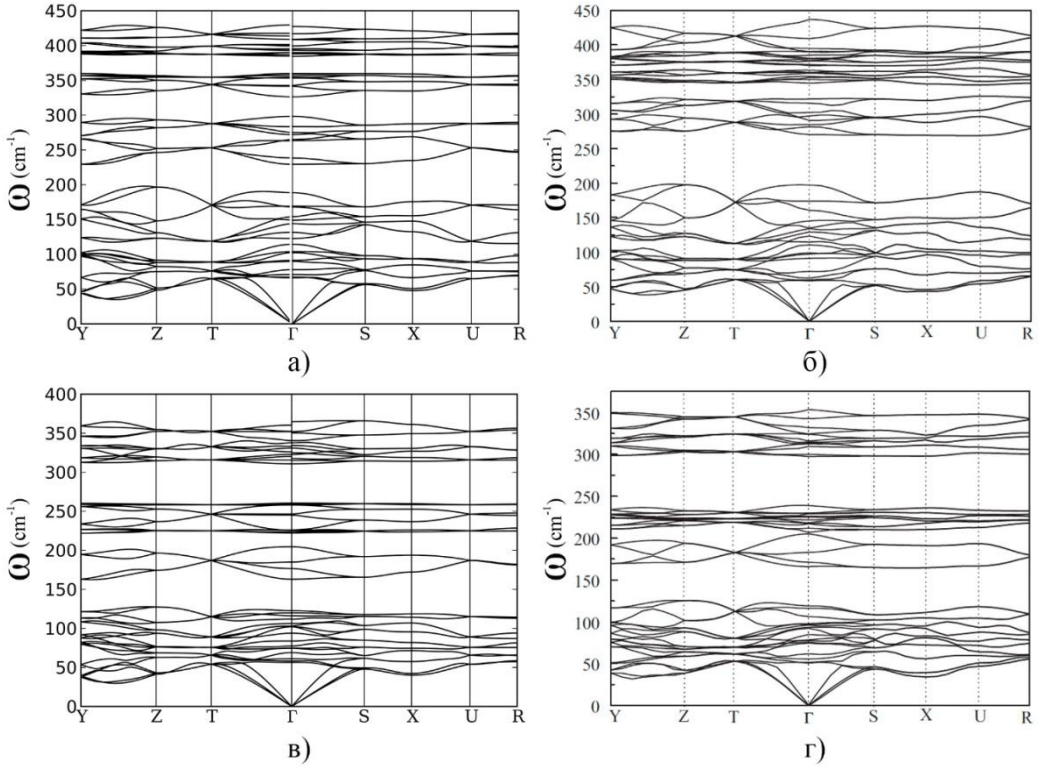


Рисунок 1 – Фононные спектры орторомбической фазы кристаллов а) $LiInS_2$ данная работа б) $LiInS_2$ [8] в) $LiInSe_2$ данная работа г) $LiInSe_2$ [8]

Наибольший вклад в среднюю часть спектра кристалла $LiInS_2$ дает анионная подрешетка атомов серы.

Таблица 2 – Длинноволновые фононные частоты орторомбической фазы кристалла $LiInS_2$

Симметрия A1				Симметрия B1				Симметрия B2				Симметрия A2			
ω, [cm^{-1}]	Вклады атомов, [%]			***ω, [cm^{-1}]***	Вклады атомов, [%]			***ω, [cm^{-1}]***	Вклады атомов, [%]			***ω, [cm^{-1}]***	Вклады атомов, [%]		
	Li	In	S		Li	In	S		Li	In	S		Li	In	S
												412	83	1	16
413	77	0	23	***403***	77	1	22	***430***	80	1	19	***398***	83	0	17
393	78	1	21	***397***	99	0	1	***420***	93	0	7	***393***	74	2	24
387	85	0	15	***393***	41	3	56	***413***	79	2	19	***378***	10	17	73
379	5	17	78	***372***	4	17	79	***372***	20	15	65	***361***	0	12	88
376	8	17	75	***359***	6	13	81	***343***	0	4	96	***312***	5	25	70
285	9	21	70	***287***	10	23	67	***296***	20	24	56	***239***	14	13	73
248	7	10	83	***276***	12	14	74	***275***	16	24	60	***168***	12	3	85
149	11	16	73	***170***	8	18	74	***189***	1	4	95	***132***	7	24	69
122	14	3	83	***144***	10	20	70	***154***	8	11	81	***102***	3	57	40
104	1	73	26	***91***	5	62	33	***115***	1	78	21	***78***	1	74	25
66	0	73	27	***70***	2	68	30	***90***	1	67	32	***67***	2	70	28

При сравнении значений частот двух кристаллов в Г точке между собой можно заметить, что общая топология колебательного спектра сохраняется. Диапазон колебательных частот, однако, разный – частоты кристалла $LiInS_2$ в среднем больше (рис.2), что связано с различными массами атомов S и Se (отличие практически в два раза). Для низких частот преобладает вклады подрешеток ионов серы, селена и индия в кристалле $LiInSe_2$.

Таблица 3 – Длинноволновые фононные частоты орторомбической фазы кристалла $LiInSe_2$

Симметрия A1				Симметрия B1				Симметрия B2				Симметрия A2			
ω, [cm^{-1}]	Вклады атомов, [%]			***ω, [cm^{-1}]***	Вклады атомов, [%]			***ω, [cm^{-1}]***	Вклады атомов, [%]			***ω, [cm^{-1}]***	Вклады атомов, [%]		
	Li	In	Se		Li	In	Se		Li	In	Se		Li	In	Se
												344	98	0	2
326	92	2	6	***357***	95	1	4	***343***	97	0	3	***323***	96	0	4
309	78	1	21	***254***	3	38	59	***333***	92	0	8	***302***	93	0	7
306	77	0	23	***254***	0	42	58	***329***	90	1	9	***257***	0	39	61
256	0	40	60	***242***	2	42	56	***316***	40	0	60	***243***	0	40	60
255	2	41	57	***223***	2	42	56	***314***	98	0	2	***223***	1	49	50
219	3	55	42	***202***	1	0	99	***223***	2	42	56	***174***	2	10	88
160	0	1	99	***183***	1	9	90	***221***	2	50	48	***115***	3	9	88
111	2	24	74	***119***	2	20	78	***121***	1	17	82	***102***	1	24	75
93	1	43	56	***102***	0	39	61	***105***	1	11	88	***76***	1	32	68
83	4	5	91	***74***	1	31	68	***101***	0	46	54	***68***	1	38	61
58	1	50	49	***60***	1	43	56	***73***	0	36	64	***56***	1	41	58

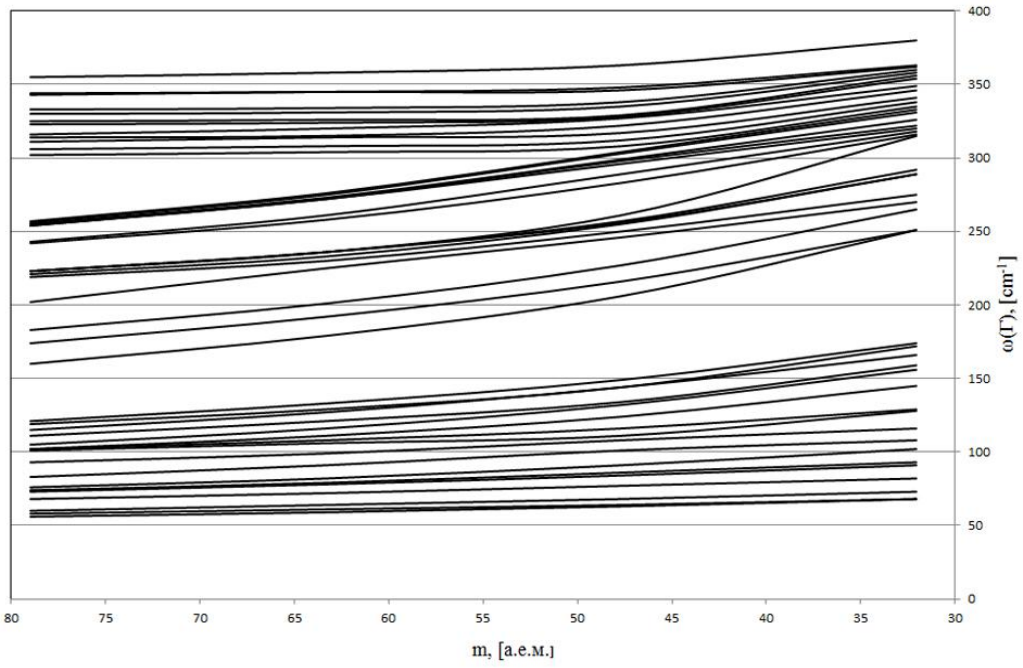


Рисунок 2 – Изменение значений частот при переходе атома Se в атом S

В распределении вкладов атомов в оптические колебания также наблюдается похожая эволюция – однако в случае кристалла $LiInS_2$ колебания легкого атома серы смещаются в среднюю часть спектра. Из такого сравнения можно сделать вывод о схожести этих кристаллов по различным свойствам, которые определяются колебаниями кристаллической решетки, например, тепловым.

Список литературы:

1. Keating P.N. // Phys. Rev. – 1966. – V.145. – P. 637–645.

2. Martin R.M. // Phys. Rev. B. – 1970. – V.1. №10. – P. 4005–4011.

3. Копытов А.В., Поплавной А.С., Уфимцев М.К. // Журнал структурной химии. – 2013. – Т.54. – №5. – С. 815–821.

4. Борн. М., Кунь Х. Динамическая теория кристаллических решеток. – Изд-во Иностранной литературы, 1958. – 488 с.

5. Dove T. Introduction to lattice dynamics. – Cambridge University Press, 1993. – 258 с.

6. Kish Z.Z., Kanishcheva A.S., Mikhailov Yu.N., Lazarev V.B., Semrad E.E., Peresh E.Yu. // Doklady Akademii Nauk SSSR. – 1985. – 280. – P. 398–401.

7. Hoenle W., Kuehn G., Neumann H. // Zeitschrift fuer Anorganische und Allgemeine Chemie. – 1986. –543. –P. 161–168.

8. Tianhui Ma, Liang Sun, Chao Xu, Yufeng Chen // Journal of All. And Com. – 2011. – 509. – P. 9733–9741.

© Гордиенко К.А., Копытов А.В., 2017

АНИЗОТРОПИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН В ОРТОРОМБИЧЕСКИХ LIGAS $_2$ И AGINS $_2$

И. Н. Загвоздин[1], А. В. Копытов [1], В. М. Педиков [2]

[1]*Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия*

[2]*Томский государственный архитектурно-строительный университет, г. Томск, Россия*

Аннотация: *Методом численного решения уравнения Кристоффеля исследована анизотропия распространения упругих волн в LiGaS2 и AgInS2. В этих кристаллах определены особые направления. В неприводимой части зоны Бриллюэна располагаются пять или шесть продольных нормалей и три или пять акустических оси. Определены также направления распространения чисто поперечных волн и характеристики внутренней конической рефракции.*

Ключевые слова: *упругие волны, продольные нормали, акустические оси, внутренняя коническая рефракция.*

LiGaS и $AgInS_2$, полупроводники класса I-III-VI_2, кристаллизуются в орторомбической структуре. Эти материалы широко используются в нелинейной оптике из-за своих высоко нелинейных коэффициентов и широкой области прозрачности. В работах [1-2] для кристаллов $LiGaS_2$ и $AgInS_2$ получены упругие постоянные, значения которых приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Упругие постоянные в ГПа

	C_{11}	C_{12}	C_{13}	C_{22}	C_{23}	C_{33}	C_{44}	C_{55}	C_{66}
$LiGaS_2$	94,2	37,9	26,8	77,4	29,1	100,0	28,2	23,7	29,8
$AgInS_2$	129,0	46,0	64,0	116,0	55,0	139,5	22,5	21,5	28,5

В нашей работе путем численного решения уравнения Кристоффеля по приведенным значениям упругих постоянных исследована анизотропия распространения акустических волн в $LiGaS_2$ и $AgInS_2$. Уравнение Кристоффеля записывалось в сферической системе координат и решалось для неприводимой части зоны Бриллюэна (НЗБ), которая задается изменением сферических координат в пределах $0° \le \varphi \le 90°, 0° \le \theta \le 90°$. Исследованы также особые направления (продольные нормали, акустические оси и направления, вдоль которых распространяются чистопоперечные волны [3]). Подобные исследования проведены для тетрагональных кристаллов типа I-III-VI_2 и II-IV-V_2 в работах [4-7].

Для случая продольных нормалей уравнение Кристоффеля может быть сведено к скалярному уравнению, которое определяет конус продольных нормалей [3]. Из

анализа этого уравнения установлено, что в $LiGaS_2$ в НЗБ располагается 5 продольных нормалей, а для $AgInS_2$ – 6 (таблица 2).

Таблица 2 – Направления продольных нормалей в неприводимой части зоны Бриллюэна

$LiGaS_2$	1	2	3	4	5	6
θ °	0	90	90	48,64	90	-
φ °	0	0	90	0	22,06	-
$AgInS_2$	1	2	3	4	5	6
θ °	0	90	90	70,80	68,29	9,22
φ °	0	0	90	90	0	0

Проверка условий реализации акустических осей показала, что в кристаллах $LiGaS_2$ и $AgInS_2$ в НЗБ – 5 и 3 акустических оси соответственно (таблица 3).

Для акустических осей, не являющихся продольными нормалями, имеет место внутренняя коническая рефракция, т.е. если волновая нормаль совпадает с акустической осью кристалла, то ей соответствует целый конус направлений вектора потока энергии, каждое из которых отвечает определенному вектору смещения квазипоперечной волны.

Таблица 3 – Направления акустических осей для неприводимой части зоны Бриллюэна

$LiGaS_2$	1	2	3	4	5
θ °	21,71	66,30	66,58	90	90
φ °	0	0	90	32,33	74,85
$AgInS_2$	1	2	3	4	5
θ °	9,22	68,29	70,80	-	-
φ °	0	0	90	-	-

Вычисленные характеристики конуса рефракции приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Характеристики внутренней конической рефракции

	Акустическая ось, θ °/ φ °	$\overline{U}_{QL}$, θ°/φ°	$V_{QT}^{Ф}$, 10^3 м/с	Сечение конуса рефракции	Ось конуса θ °/ φ °	Знак вращения	α °	$V_{QT}^{г}$, 10^3 м/с
$LiGaS_2$	66,58/90	62,87/90	3,143	эллипс	67,69/90	Левый	0 45 90 135	3,152 3,194 3,145 3,194
	66,30/0	70,77/0	3,181	эллипс	56,17/0	Правый	0 45 90 135	3,181 3,236 3,417 3,236
	21,71/0	15,84/0	3,120	эллипс	32,69/0	Правый	0 45 90 135	3,120 3,225 3,339 3,225
	90/32,33	90/31,06	2,925	эллипс	90/29,26	Левый	0 45 90 135	2,935 2,940 2,978 2,940
	90/74,85	90/69,73	3,091	эллипс	90/82,22	Правый	0 45 90 135	3,093 3,139 3,165 3,139
$AgInS_2$	70,80/90	72,88/90	2,520	эллипс	59,99/90	Правый	0 45	2,528 2,588

Продолжение таблицы 4

	Акустическая ось, θ °/ φ °	$\overline{U}_{QL}$, θ°/φ°	$V_{QT}^{Ф}$, 10^3 м/с	Сечение конуса рефракции	Ось конуса θ °/ φ °	Знак вращения	α °	$V_{QT}^{г}$, 10^3 м/с
							90 135	2,806 2,588
	68,29/0	71,26/0	2,517	эллипс	57,28/0	Правый	0 45 90 135	2,524 2,581 2,807 2,581
	9,22/0	6,778/0	2,277	эллипс	19,02/0	Правый	0 45 90 135	2,279 2,316 2,384 2,316

В третьем столбце этой таблицы указаны направления векторов поляризации квазипродольной волны, в четвертом – фазовые скорости поперечных волн.

В седьмом столбце указано направление вращения вектора потока энергии по отношению к волновой нормали в зависимости от угла поворота α (восьмой столбец) вектора поляризации квазипоперечной волны. В последнем столбце приведены соответствующие значения групповых скоростей.

Условия распространения чистопоперечных волн в кристаллах орторомбической системы выполняются для плоскости (110). Кроме того, чисто поперечные волны могут распространяться вдоль направлений, лежащих на поверхности конуса 4-го порядка, уравнение которого записано в [3]. Численное решение этого уравнения дает пары углов θ, φ, указывающие направления распространения чистопоперечных волн (рисунок 1).

По вычисленным значениям фазовой скорости в различных направлениях были построены поверхности рефракции (поверхность обратной фазовой скорости) (рисунок 2).

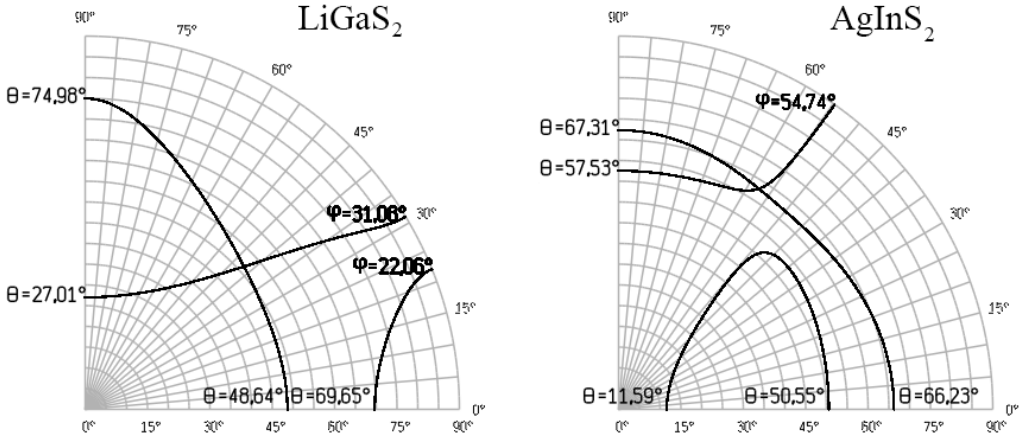


Рисунок 1 – Направления распространения чистопоперечных волн

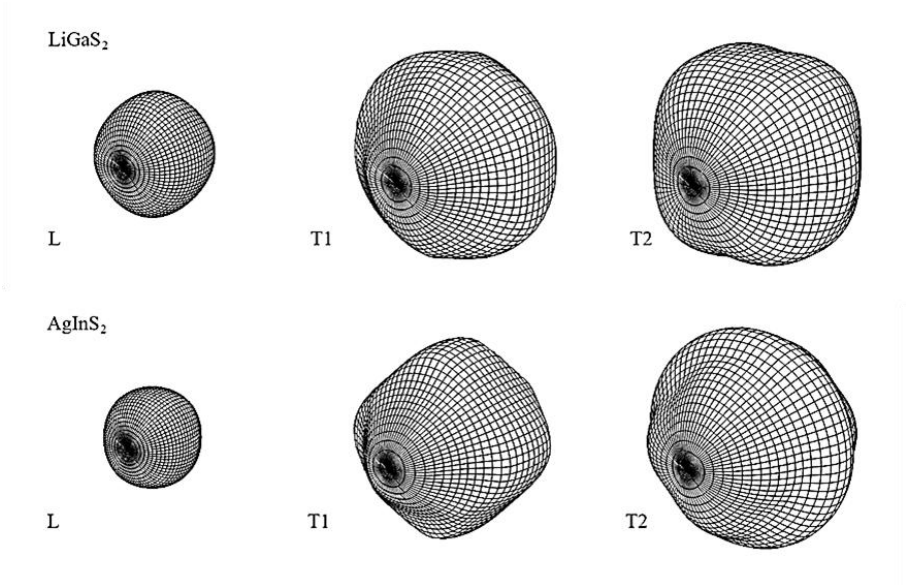


Рисунок 2 – Поверхности рефракции в $LiGaS_2$ и $AgInS_2$

Сечения этих поверхностей плоскостями симметрии приведены на рисунке 3. Как видно из рисунка 2, наибольшие отклонения поверхностей рефракции от изотропного случая имеют место для квазипоперечных (T_1, T_2) акустических волн. Поверхность рефракции для квазипродольных (L) волн представляет собой слабо деформированный эллипсоид.

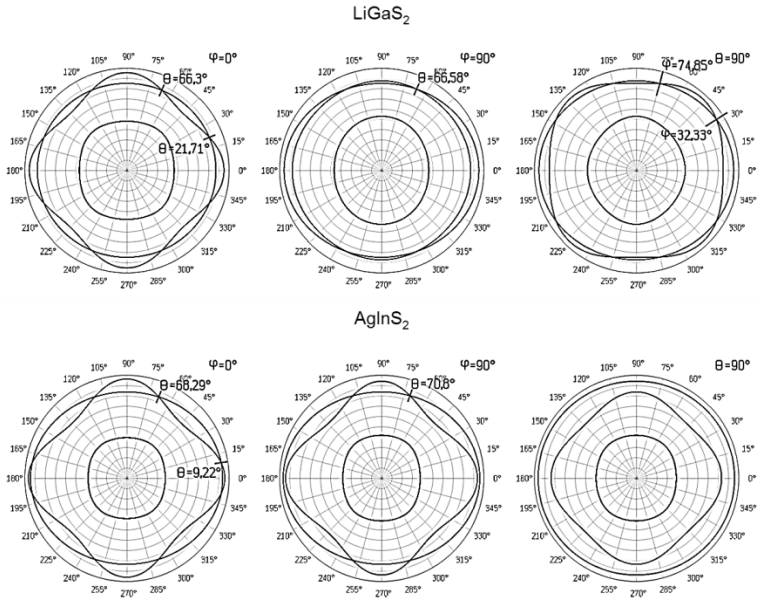


Рисунок 3 – Сечения поверхностей рефракции плоскостями симметрии в $LiGaS_2$ и AgInS

Полученные результаты расчета необходимы для построения поверхностей интенсивностей, а также для анализа фононной фокусировки. Кроме того данные расчеты могут быть использованы при изучении различных физических процессов, которые происходят с участием акустических фононов, в частности, при расчете тензора

времени релаксации при рассеянии на акустических фононах.

Список литературы:

1. Копытов А. В. Длинноволновые колебания и упругие свойства $LiGaS_2$ / А. В Копытов., Н. Г. Кравченко, А. С. Поплавной // Труды XII международной научной школы-конференции «Фундаментальное и прикладное материаловедение». – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2015. – с. 28-32.

2. Orlova N.S., The Anisotropy of Elastic Properties in Orthorhombic Modification of AgInS2 from X-Ray Thermal Diffuse Scattering Data / N.S. Orlova, A.V. Pushkarev //Crystal Research & Technology, 1998, P. 207.

3. Федоров Ф.И. Теория упругих волн в кристаллах. – М.: Наука, 1965. – 388 с.

4. Антропова Е.В., Копытов А.В. // Изв. вуз. Физика. **53** (9/2), 307 (2010).

5. Антропова Е.В., Копытов А.В. // Изв. вуз. Физика. **54** (1/2), 40 (2011).

6. Антропова Е.В., Копытов А.В. // Изв. вуз. Физика. **56** (8/3), 198 (2013).

7. Antropova E.V., Kopytov A.V. Фундаментальные проблемы современного материаловедения **11** (4/2), 664 (2014).

© Загвоздин И.Н., Копытов А.В., Педиков В.М., 2017

ИЗМЕНЕНИЕ ПРОФИЛЯ ШЕРОХОВАТОЙ ПОВЕРХНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА РАСПЫЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С РОСТОМ ДОЗЫ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ

А. Н. Карпиков, С. Б. Кислицин, М. С. Козырева

РГП «Институт ядерной физики», г. Алматы, Республика Казахстан

Аннотация: *В рамках модели распыления шероховатой поверхности, основанной на разности локальных коэффициентов распыления её фрагментов, проведены расчеты изменения профиля и вызванного им изменения глобального коэффициента распыления с ростом дозы ионного облучения. Установлено, что при нормальном падении ионного потока, профиль шероховатой поверхности имеет тенденцию к сглаживанию, которое наступает при дозах, определяемых параметрами облучаемого материала, амплитудой шероховатости и локальными коэффициентами распыления фрагментов. Расчеты проведены для двухфрагментной симметричной поверхности вольфрама, облучаемой ионами гелия и аргона с энергией 100 кэВ, при различных значениях амплитуды шероховатости.*

Введение. Распыление, т.е. удаление атомов приповерхностных слоев мишени при бомбардировке ускоренными частицами, происходит в результате столкновений налетающих частиц с атомами твердого тела. Интенсивность процесса распыления характеризуется коэффициентом распыления (*S*).

Распыление происходит при соударении направленного пучка быстрых частиц с поверхностью и при воздействии на твердое тело потоков плазмы.

Распыление наблюдается также в ускорителях в источнике ионов, на диафрагмах и мишенях. Исследование закономерностей процесса распыления имеет важное значение с точки зрения определения эрозионной стойкости материалов, в частности, выбираемых для использования в качестве первой стенки термоядерных установок и реакторов (ТЯР) типа токамак, а также применения его для поверхностного ионного травления, анализа поверхности и получения тонких пленок.

Коэффициент распыления зависит от условий облучения (энергии E_0, массы и флюенса бомбардирующих частиц, угла их падения относительно нормали к поверхности мишени), а также типа распыляемого материала, его структурно-фазового состояния и в особенности структуры и состава поверхности. Число атомов, распыляемых одной налетающей частицей, является статистической величиной.

Микрорельеф поверхности также может оказывать существенное влияние на среднее значение коэффициента распыления. Шероховатость с размерами, равными или превосходными линейный размер каскада столкновений (~500 Å), приводит к увеличению распыления по сравнению с плоской поверхностью [1].

Изменение профиля поверхности. Различные фрагменты шероховатой поверхности имеют разные коэффициенты распыления, и, следовательно, распыляются с разной скоростью. Это, в свою очередь, приводит к изменению первоначального профиля шероховатой поверхности.

Рассмотрим этот эффект на примере первоначально (до облучения) двухфрагментной симметричной поверхности, имеющей период L. Поток ионов падает перпендикулярно глобальной поверхности. Поведение локальных фрагментов, нормаль к которым составляет $-\alpha$ и α, в данном случае идентично, поскольку и коэффициент, и скорость распыления являются четными функциями, и зависит лишь от абсолютного значения угла ($S(\alpha)=S(\cos\alpha)$). В процессе распыления профиль распыляемой поверхности неизбежно проходит через конфигурации *а*, *б* и *в* на рисунке 1. Определяющим моментом в этом случае будет зарождение и развитие фрагментов типа x_2, параллельных глобальной поверхности S_0, которые распыляются с меньшей скоростью, чем наклонные фрагменты с проекцией x_1.

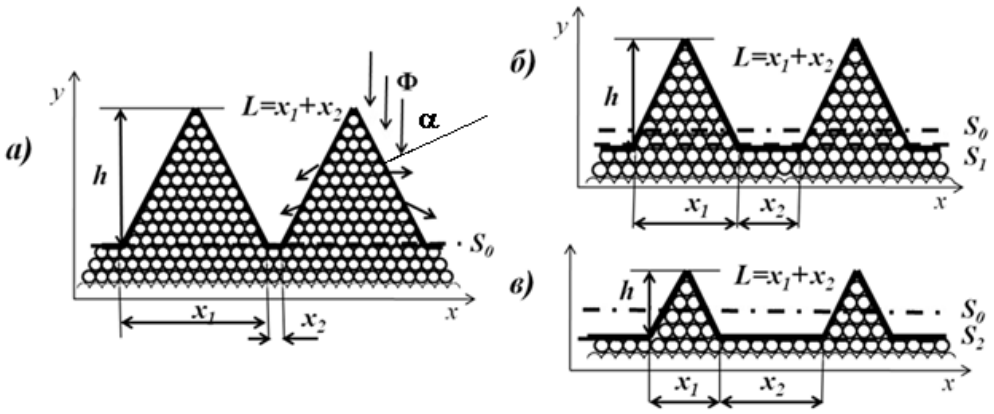


Рисунок 1 – Схематическое представление изменения профиля распыляемой поверхности с ростом дозы облучения Ф. S_0 – начальная глобальная плоскость поверхности; S_1 и S_2 – изменение профиля с увеличением Ф

При облучении поверхности до дозы Φ, высота рельефа поверхности h_0 (амплитуда шероховатости) уменьшается на величину Δh, равную

$$\Delta h = \frac{\Phi}{\rho_{am}}(S(\alpha) - S(0)), \quad (1)$$

где ρ_{am} – атомная плотность облучаемого материала. При этом длина нормальных к направлению ионов фрагмента x_2 увеличится (соответственно, x_1 уменьшится) за фрагментов на величину

$$\Delta x = \frac{2S(\alpha)\Phi\cos\alpha}{\rho_{am}\sin\alpha}. \quad (2)$$

Проведенные на основе (1) – (2) расчеты изменения профиля двухфрагментной симметричной поверхности вольфрама, облучаемого ионами He и Ar с энергией 100 кэВ, при различных углах наклона фрагментов α, представлены на рисунках 2 и 3. Поток ионов имеет направление $-y$.

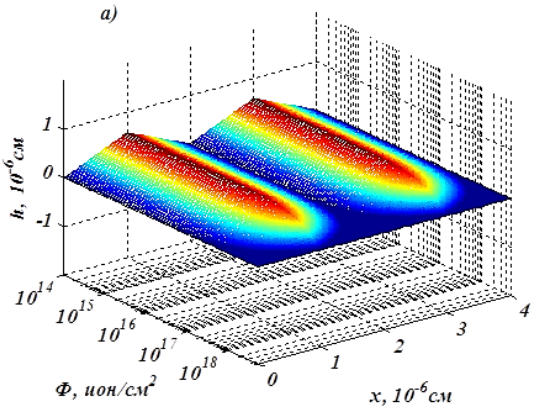


Рисунок 2 – Изменение профиля облучаемой поверхности вольфрама при облучении ионами гелия (без учета смещения всей поверхности в направлении падения потока) в зависимости от флюенса ионов при различных углах наклона фрагменов α: а – α = 30°; б – α = 45°; в – α = 60°.

E0 = 100 кэВ, L = 2×10^{-6} см

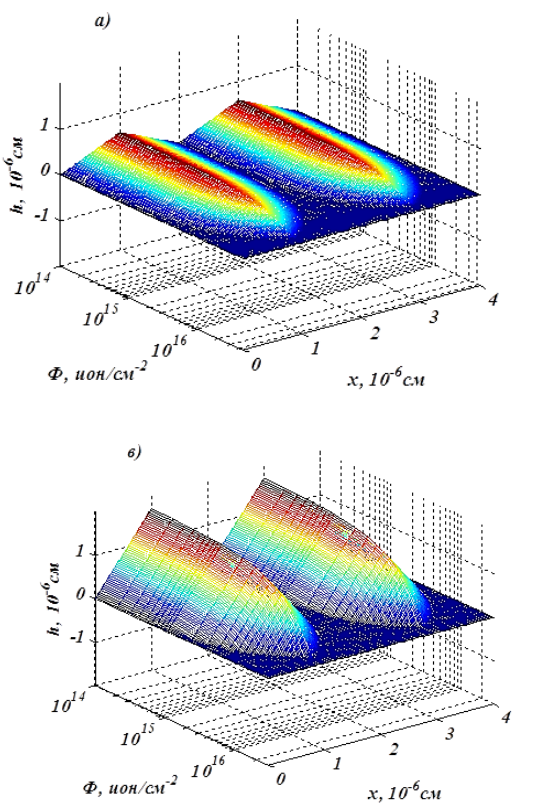


Рисунок 3 – Изменение профиля облучаемой поверхности вольфрама при облучении ионами аргона (без учета смещения всей поверхности в направлении падения потока) в зависимости от флюенса ионов при различных углах наклона фрагменов α: а – α = 30°; б – α = 45°; в – α = 60°.

E0 = 100 кэВ, L = 2×10^{-6} см

Коэффициенты распыления $S(\alpha)$ определялись с помощью программного пакета SRIM-2012, который позволяет рассчитывать кас-

кады атомных соударений для широкого спектра ионов и мишеней.

Из рисунков 2 и 3 следует, что увеличение дозы облучения Φ приводит к сглаживанию поверхности, причем его интенсивность определяется углами наклона фрагментов. При дозах порядка ~10^{18} ион/см^2 для гелия и ~10^{16} ион/см^2 для аргона поверхность становится гладкой. Однако следует отметить, что такая ситуация справедлива лишь при нормальном падении ионного потока на базовую поверхность. С изменением угла падения или при более сложной конфигурации исходной поверхности распыление может приводить также к увеличению амплитуды шероховатости. Наличие на исходной поверхности примесных выделений (с другим коэффициентом распыления) также способствует увеличению шероховатости.

Изменение коэффициента распыления. Изменение профиля распыляемой поверхности влечет за собой изменение коэффициента распыления шероховатой поверхности S_R.

Если $S(E_0, \alpha)$ – зависимость коэффициента распыления от локального угла падения (при энергии ионов E_0) для плоской поверхности сегментов, то

$$S_R(E_0) = \frac{1}{L}\sum_{i=1}^{k} S(E_0, \alpha_i)\cdot\Delta x_i \quad (3)$$

представляет собой коэффициент распыления шероховатой поверхности с периодом L, состоящей из k фрагментов Δl_i, нормали к которым составляют углы α_i с нормалью к базовой плоскости поверхности и имеющих на неё проекции Δx_i [2].

Более подробное описание зависимости коэффициента распыления S_R шероховатой поверхности от типа и параметров распыляемой поверхности приведено в [3].

Расчеты проведены для рассмотренных первоначально двухфрагментных симметричных границ с α = 30° ($h = L\ \overline{3}/2$), 45° ($h = L/2$) и 60° ($h = L/2\ \overline{3}$).

Примеры рассчитанных согласно (3) с учетом (1) и (2) зависимостей коэффициентов распыления вольфрама при нормальном глобальном падении ионов гелия и аргона с энергией 100 кэВ от дозы облучения приведены на рисунке 4.

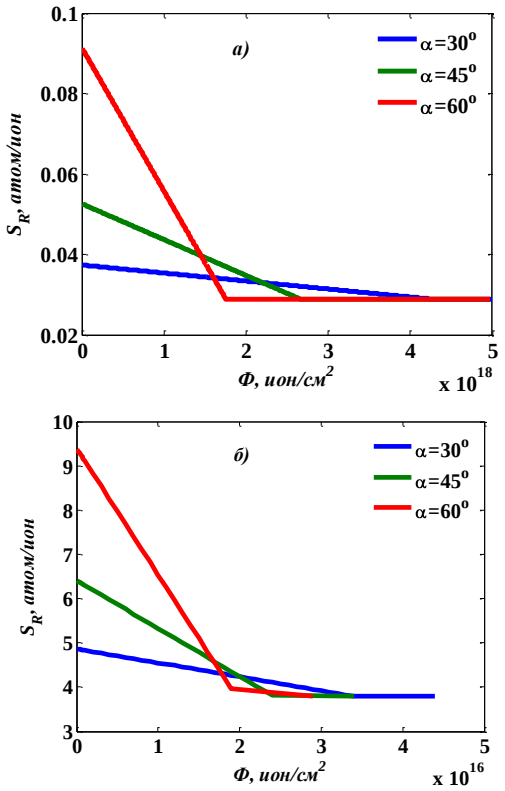


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента распыления поверхности W от дозы Ф при облучении ионами He (а) и Ar (б) при различных углах наклона фрагментов α. E0 = 100 кэВ, L = 2×10^{-6} см.

Как видно из рисунка, для всех рассмотренных типов поверхностей, поведение S_R характеризуется уменьшением с ростом дозы облучения, и стабилизацией на уровне $S_R=S(0)$. Чем больше амплитуда шероховатости поверхности h_0, тем быстрее происходит стабилизация.

Различие в дозах, при которых происходит стабилизация, связано с различием коэффициентов распыления ионами He и Ar.

Заключение. Проведенные расчеты показали, что учет микрорельефа поверхности согласно предложенному механизму, основанному на несовпадении локального и глобального углов падения ионов, приводит к следующему:

- увеличение дозы облучения Φ при нормальном падении ионов приводит к сглаживанию поверхности, причем его интенсивность определяется углами наклона фрагментов облучаемой поверхности;

- в процессе сглаживания первоначально двухфрагментная поверхность трансформируется в трехфрагментную, и становится гладкой при дозах, определяемых амплитудой шероховатости и величиной коэффициента распыления материала;

- с изменением угла падения ионов или при более сложной конфигурации исходной поверхности распыление может приводить к увеличению амплитуды шероховатости, также как и наличие примесных выделений;

- для всех рассмотренных типов поверхностей, поведение S_R характеризуется уменьшением с ростом дозы облучения, и стабилизацией на уровне $S_R=S(0)$.

Необходимо отметить, что в данном рассмотрении не учитывалась роль отраженных ионов, которая при больших α может быть весьма значительной.

Список литературы:

1. Физическое материаловедение / под общ. ред. Б.А. Калина. – Том 4. Физические основы прочности. Радиационная физика твердого тела. Компьютерное моделирование / Е.Г. Григорьев, Ю.А. Перлович, Г.И. Соловьев, А.Л. Удовский, В.Л. Якушин. – М.: МИФИ, 2008. – 696 с.

2. Kozyreva M.S., Karpikov A.N., Kislitsyn S.B. The contribution of a surface roughness to physical sputtering of metals // Book of abstracts «Nuclear science and its application» VII Eurasian Conference. – Baku, 2014. – P. 250-251.

3. Карпиков А. Н., Кислицин С. Б., Козырева М. С. Распыление шероховатой поверхности в процессе ионного облучения металлов // Труды XII Международной научной школы-конференции "Фундаментальное и прикладное материаловедение". – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2015. – с. 14-20.

© Карпиков А.Н., 2017

СОЕДИНЕНИЯ МЕТАЛЛ-КОМПОЗИТ В КОНСТРУКЦИЯХ СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНИКИ

В. Б. Маркин[1], Р. Р. Ибрагимова[2]

[1]*Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия*

[2]*Казахский государственный технический университет, Алматы*

Аннотация: *Применение полимерных композиционных материалов в конструкциях современной техники обусловлено снижением металлоемкости и повышением весового совершенства изделий. Однако полная замена металлов на композиционные материалы связана с большими техническими и технологическими проблемами, поэтому актуальной является задача разработки стыковочных элементов, позволяющих осуществить связь между ними. Рассмотрены способы образования соединений металлов и композитов, их особенности и возможности передачи нагрузки. Для высоконагруженных конструкций целесообразно использование сплошных соединений, в которых важная роль отводится адгезионным свойствам контактирующих компонентов. На примере изделий, использующихся в нефтедобывающей отрасли, показана возможность замены стальных штанг на стеклопластиковые однонаправленные стержни, получаемые методом пултрузии. Снижение веса изделий наряду с повышенными антикоррозионными характеристиками является результатом такой замены.*

Ключевые слова: *полимерные композиционные материалы, пултрузия, металлоемкость конструкций, стыковочные элементы металл-композит, нефтедобывающая промышленность.*

В настоящее время трудно найти такую отрасль машиностроения, которая не нуждалась бы в снижении материалоемкости и особенно металлоемкости изделий. Достаточно хорошо известно, что полимерные композиционные материалы и их применение приводят к существенному снижению металлоемкости и, как следствие, массы изделия. Кроме того, это сопровождается повышением коррозионной стой-кости конструкций и сокращением сроков на их ремонт, а следовательно, способствует уменьшению энергоемкости производства и снижению его экологической опасности, особенно если она связана с загрязнением атмосферы. Однако полная замена металлических, чаще всего стальных, элементов конструкций на композитные представляется довольно сложной задачей, связанной со сложностью технологии изготовления стыковочных элементов для разных агрегатов. Поэтому разработка таких элементов для совершенствования изделий современной техники представляется актуальной задачей.

Рассмотрим некоторые направления машиностроения, для которых отмеченные выше моменты играют существенную роль.

1. Нефте- и газодобывающие отрасли. Металлоемкость производства и оборудования очень высока, что связано с необходимо-

стью использовать металлические каркасы буровых сооружений, большое количество стальных труб, мощное насосное оборудование, особенно для погружных насосных систем и т.п.

2. Добывающие отрасли, использующие шахтные методы добычи полезных ископаемых и угля. Шахтные крепи, поддерживающие боковые стены и потолок шахтных проемов, большое количество рельсовых коммуникаций, оборудование для подачи воздуха, удаления воды и т.д.

3. Производство металлообрабатывающих станков, станины которых, как и прочие агрегаты изготавливаются исключительно из металлов.

4. Судостроение и автомобилестроение потребляют в основном традиционные материалы, т.е. металлы и их сплавы.

Особенности и преимущества композиционных материалов над традиционными определяются, прежде всего, их сравнительно невысокой плотностью (стеклопластики – 2400-2600 кг/м^3, углепластики – 1400-1600 кг/м^3, органопластики 1200 – 1500 кг/м^3), что наряду с высокими прочностными характеристиками превращает удельные значения прочности и жесткости на порядок выше, чем у традиционных материалов.

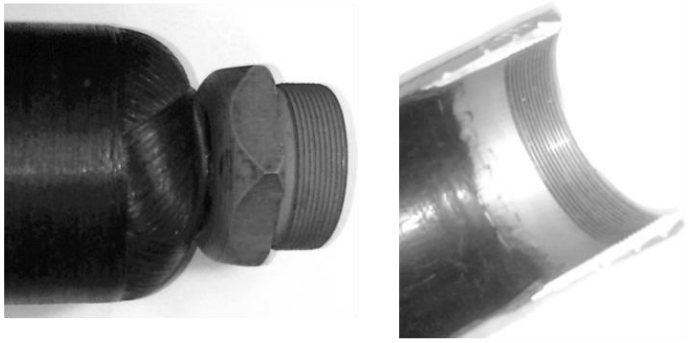
Требования, предъявляемые к конструкциям соединительного узла композит- металл, характер нагрузок, действующих на соединение, зависят прежде всего от назначения и условий эксплуатации изделия. В соответствии с характером передачи нагрузок соединения подразделяются на стыковочные и поддерживающие [1]. К стыковочным относятся механические и комбинированные соединения металл-композит, являющиеся наиболее распространенными конструкциями. В этих конструкциях все нагрузки, приходящиеся на стык, воспринимаются металлическими элементами и передаются на корпус изделия через композиционный материал. Группу поддерживающих соединений представляют конструкции, основная особенность которых связана с передачей напряжений на стыке непосредственно адгезионными прослойками. На рисунке 1 представлены характерные конструкции, относящиеся к этим типам соединений. В настоящее время наиболее широко представлены резьбовые, клеевые, заклепочные и шпилечно-болтовые соединения армированных пластиков и конструкций на их основе. Несмотря на то, что клеевые и резьбовые соединения обладают рядом преимуществ, они не применимы для передачи сосредоточенных нагрузок в соединениях элементов, имеющих значительную толщину.

В настоящее время наиболее широко представлены резьбовые, клеевые, заклепочные и шпилечно-болтовые соединения армированных пластиков и конструкций на их основе. Несмотря на то, что клеевые и резьбовые соединения обла-

дают рядом преимуществ, они не применимы для передачи сосредоточенных нагрузок в соединениях элементов, имеющих значительную толщину.

Условно все типы возможных соединений композитных и металлических элементов можно разделить на три класса:

- сплошные (клеевые, формовочные, сварные);
- механические (резьбовые, клепаные, шпилечно-болтовые, самозаклинивающиеся, сшивные и игольчатые);
- комбинированные (клее-клепанные, клеесшивные, клее-игольчатые, клееболтовые, клерезьбовые и другие сочетания механических и клеевых соединений).



а б

Рисунок 1 – Типы соединений металл-композит в конструкциях где а – внутренний металлический резьбовой элемент в стеклопластиковом корпусе; б – металлический фланец композитного баллона давления

Рациональное проектирование соединительных элементов с целью снижения массы конструкции связано, прежде всего, с анализом факторов, влияющих не их несущую способность [2]. *Конструктивные факторы* влияют на выбор класса соединения, геометрических параметров, материала крепежного элемента, подкрепления в зоне стыка и т.д. Наиболее важными конструктивными факторами для сплошных соединений являются длина адгезионной прослойки, толщины соединяемых элементов, жесткости адгезионной прослойки и соединяемых элементов.

Технологические факторы определяют структурные параметры композиционного материала, его физико-механические характеристики, остаточные напряжения, возникающие в процессе изготовления соединения.

Эксплуатационные факторы непосредственно зависят от уровня и спектра внешних нагрузок, времени и температуры эксплуатации, ресурса работы изделия и состояния среды (особенно наличия влаги, которая может влиять на клеевую прослойку и металлическую компоненту соединения).

Анализ конструкций, исполь-

зующих композиты и металлы, показал, что для них предпочтение отдается сплошным соединениям, которые широко распространены во многих отраслях машиностроения благодаря созданию конструкционных клеев на основе синтетических полимеров, зачастую являющихся компонентами полимерного связующего, применяемого в композиционном материале. Клеевые соединения обладают рядом преимуществ:

- способны соединять самые разнообразные материалы, существенно отличающиеся по своим характеристикам;
- не приводят к ослаблению соединяемых элементов конструкции;
- не подвержены коррозии, позволяют создавать герметичные узлы;
- превосходят по прочности другие соединения при работе на срез;
- способствуют снижению массы конструкции;
- позволяют технологично и быстро осуществлять сборку соединения.

Некоторые недостатки клеевых соединений, особенно малое сопротивление отдирающим нагрузкам и возможности ползучести, легко преодолимы за счет дополнительных технологических приемов [3].

В качестве примера использования адгезионного соединения металла и композита можно привести экономически обоснованную замену стальных штанг-толкателей погружного насоса, работающего в нефтяной скважине. Стальная штанга заменяется на однонаправленную стеклопластиковую, изготавливаемую методом пултрузии, а узлы соединения отдельных стеклопластиковых фрагментов между собой и к исполнительным механизмам изготавливаются различными способами (рисунок 2), предусматривающими увеличение площади адгезионного контакта стали и композита.

Свойства и характеристики штанг для погружных насосов нефтедобычи приведены в таблице 1.

Полученные результаты для штанг типа ШН-25, показали, что весовое совершенство изделий из однонаправленного стеклопластика является достаточно весомым.

Рисунок 2 – Способы формирования адгезионного (клеевого) соединения стали и однонаправленного стеклопластика в штангах погружного насоса: а – общий вид элемента соединения; б – адгезионно-клеевое соединение, уплотняемое внешним клеевым составом; в – адгезионное соединение, уплотняемое резьбовой втулкой; г – прямое адгезионное соединение без стальной муфты

Кроме того, необходимо учи-

тывать и увеличение срока службы таких изделий в условиях эксплуатации в средах с повышенным содержанием корродирующих реагентов при высоких температурах [4].

Работы в направлении разработки таких конструкций ведутся в России. На рисунке 3 приведена фотография образца штанги погружного насоса с композитным несущим стержнем, изготовленного из стеклопластика на предприятии Galencomposite.

Таблица 1 – Основные характеристики штанг погружных насосов в расчете на 100 метров длины

Материал штанги	Плотность, кг/м^3	Прочность при растяжении, МПа	Диаметр несущего стержня, мм	Масса штанги, кг	Весовое совершенство
Сталь высокопрочная	7800	1520	40	400	1
Однонаправленный стеклопластик	2100	1750	25	103	3,88

Рисунок 3 – Образец для испытаний стеклопластиковой штанги погружного насоса

Таким образом, применение сплошных способов соединения элементов конструкций из металла и композиционного материала способствует выполнению основной задачи, связанной с высоконагруженными режимами эксплуатации. По мнению авторов, связь элементов в таких конструкциях можно варьировать за счет разработки и обоснования методов улучшения адгезии для конкретных материалов, образующих эти элементы.

Список литературы:

1. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: Учеб. Для вузов. - М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 516 с.

2. Воробей В.В., Сироткин О.С. Соединение конструкций из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1985. – 166 с.

3. Маркин В.Б. Строительная механика композитных конструкций: Учеб. пособие. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2004. – 180 с.

4. Воробей В.В., Маркин В.Б. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций. – Новосибирск: Наука, 2006. – 190 с.

© Маркин В.Б., Ибрагимова Р.Р., 2017

СИММЕТРИЙНЫЕ СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ КРИСТАЛЛИЧЕСКИМИ СТРУКТУРАМИ АМИДОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

Е. Б. Кайзер, Н. Г. Кравченко, А С. Поплавной

Кемеровский государственный университет, г. Кемерово, Россия

Аннотация: *В работе выполнен симметрийный анализ кристаллических структур амидов щелочных металлов MeNH2 (Me = Li, Na, K). Построены схемы подчинения пространственных групп этих структур по принципу: пространственная группа → максимальная неизоморфная подгруппа. Для включения всех обсуждаемых в литературе структур в схемы подчинения необходимо вводить некоторые промежуточные пространственные группы, которые могут соответствовать метастабильным состояниям, но также возможна и реализация устойчивых структур с предсказанной симметрией.*

Ключевые слова: *амиды щелочных металлов, кристаллическая структура, пространственные группы симметрии.*

Важнейшей задачей водородной энергетики является организация технически и экономически эффективного хранения и транспортировки водорода [1, 2]. Один из перспективных способов решения этой задачи – хранение водорода в связанном состоянии. Материалы – накопители водорода – легкие металлические гидриды: LiH, MgH_2, $LiBH_4$, $LiNH_2$ и другие. Среди них амид лития $LiNH_2$ имеет достаточно высокую гравиметрическую плотность водорода (18.5% по массе) и является безопасным и эффективным материалом для хранения водорода. Находящийся в группе щелочных амидов амид натрия ($NaNH_2$), хотя и имеет относительно низкое содержание водорода (5.2% по массе) также продемонстрировал многообещающие возможности для его хранения. Недавнее исследование показало, что $NaNH_2$ образует промежуточные комплексы с другими гидридами металлов, например с $LiAlH_4$ и это содействует выделению водорода [3]. В отличие от амида лития существует достаточно мало работ, посвященных исследованию $NaNH_2$. Наименее изученным в группе амидов щелочных металлов является амид калия ввиду отсутствия его применения в качестве материала – накопителя водорода и в настоящее время он используется только в органическом синтезе. В то время как упомянутые выше амиды щелочных металлов являются стабильными кристаллическими веществами, амид серебра представляет собой высоко взрывоопасный белый осадок, при этом степень его изученности не позволяет ответить на вопросы, касающиеся его химической стабильности, взрывоопасности или невозможности существования кристаллической фазы.

Наиболее исследованным как экспериментально, так и теоретиче-

ски из амидов щелочных металлов является амид лития. Его кристаллическая структура впервые была исследована в [4] методами рентгеноструктурного анализа и уточнена в [5]. В последней работе с использованием программного кода WIEN2K выполнен расчет электронной структуры в рамках теории функционала плотности с использованием линеаризованных присоединенных плоских волн в приближении полнопотенциального метода с обобщенной градиентной аппроксимацией обменно-корреляционного потенциала Perdew-Burke-Ernzerkof 96. В работе представлены электронная плотность состояний и распределение валентной плотности. Проводились также экспериментальные и теоретические исследования фаз высокого давления [6-10]. В частности, существование фаз высокого давления предсказывают теоретические расчеты [6, 9].

Для нахождения стабильных структур в [6] использовался первопринципный эволюционный алгоритм USPEX (Universal Structure Predictor: Evolutionary Xtallography) [11-13]. Данный метод широко используется для прогнозирования стабильных кристаллических структур высокого давления, не требуя при этом каких-либо экспериментальных данных. В настоящее время USPEX можно использовать совместно с такими программами как VASP, GULP, Siesta, Quantum Esoresso и др. [12, 13]. Так, оптимизация полученных структур в [6] проводилась с помощью программного кода VASP. Вычисления фононной плотности состояний выполнялось методом замороженных фононов с применением программного кода FROPHO. Для всех установленных кристаллических фаз, кроме структурных параметров вычислены фононные плотности состояний и распределения зарядовой плотности. Отмечается, что полученные результаты указывают на высокую вероятность возникновения водородной связи N-H…N между соседними группами NH_2 в γ-$LiNH_2$, которая ослабляет полярную ковалентную связь N-H внутри группы NH_2, что может соответствовать десорбции водорода.

Кристаллическая структура, электронные и колебательные свойства амида натрия исследовались в [3,14,15]. В [15] экспериментально определена кристаллическая структура $NaND_2$. Замена водорода на дейтерий в экспериментальных исследованиях повышает точность измерений позиций атомов, но не может дать информации, касающейся химической связи и типа взаимодействий, ввиду различия в массах H и D в два раза, которое приводит к изменениям многих физико-химических свойств. Экспериментальные исследования структуры ИК и КР спектров $NaNH_2$ под давлением выполнены в [3]. Показано, что при давлениях 0.9 и 2.0 GPa в кристалле происходят фазовые переходы, на что указывают значительные изменения величин ИК и КР частот в различных диапа-

зонах давлений. После декомпрессии все характерные особенности спектров восстанавливаются, что говорит об обратимости фазовых переходов.

Кристаллическая структура амида калия KNH_2 определена в [16,17], установлено наличие двух фаз при различных температурах.

Как видно из приведенного краткого обзора, значительная часть работ посвящена поискам различных структурных фаз амидов щелочных металлов, которые обладали бы оптимальными свойствами для хранения и транспортировки водорода. При этом применяются как теоретические, так и экспериментальные методы. Отметим, что в последние годы существенно возросла роль теоретико-групповых подходов к поиску гипотетических структур различных соединений [18, 19]. Методы, представленные в работах [18, 19] применены нами к исследованию симметрийных соотношений в ряду амидов щелочных металлов с целью поиска новых гипотетических стабильных или метастабильных структур.

Установленные кристаллические структуры амидов щелочных металлов.

Главная проблема исследований с помощью рентгеноструктурного анализа таких соединений, как гидриды легких металлов состоит в плохой рассеивающей способности водорода для падающих рентгеновских лучей, в то время как рассеяние нейтронов дает надежное измерение положений водорода. Так, в ранней работе [4] впервые была исследована кристаллическая структура α-$LiNH_2$ методами рентгеноструктурного анализа. Установлено, что амид лития при нормальных условиях кристаллизуется в решетку тетрагональной сингонии с пространственной группой S_4^2 (№82, $I4$) и восемью формульными единицами в элементарной ячейке. Однако найденные положения атомов вызвали некоторые сом-нения, поскольку минимальное расстояние между атомами азота и водорода составило всего 0.7Å, в то время как в несольватированном мономере $LiNH_2$ оно составляет d_{N-H}=1.022 Å и d_{N-H}=1.82 Å в Li_2NH [5]. Поэтому в [5], на основе метода порошковой нейтронной дифракции высокого разрешения были найдены более точные координаты атомов в α-$LiNH_2$.

Экспериментальные и теоретические исследования фаз высокого давления выполнены в [6-10]. Экспериментально установлено [7], что в кристаллах $LiNH_2$ происходит переход к фазе высокого давления при 12.5 GPa, однако группу симметрии этой фазы определить не удалось. Это было сделано в [8] – установлено, что фаза имеет моноклинную сингонию с пространственной группой C_2^2, (№4, $P2_1$). В [10] при давлениях от 10 до 25 GPa с использованием методов ИК-спектроскопии и рентгеноструктурного анализа удалось обнаружить новую промежуточную фазу. Установлено, что она существует в

диапазоне давлений от 10 до 13 GPa при комнатной температуре и имеет пространственную группу C_{2h}^6 (№15, $C2/c$), в кристаллографической ячейке содержится Z=8 формульных единиц.

Теоретические расчеты предсказывают существование большего количества фаз высокого давления [6, 9]. В [6] найдены две стабильные фазы: β-$LiNH_2$ – орторомбическая, $NaNH_2$-тип, группа симметрии D_{2h}^{24} (№70, $Fddd$); γ-$LiNH_2$ – орторомбическая, D_2^3 (№18, $P2_12_12$). Расчеты показали, что фаза основного состояния α-$LiNH_2$ стабильна вплоть до давления 4.66 GPa, при котором происходит переход к β-$LiNH_2$. При этом разность энтальпий для α- и β- фаз очень мала и составляет всего 3.2 meV/f.u. (f.u. – формульная единица). Фазовый переход β-γ происходит при давлении 10.76 GPa, что совпадает с экспериментом.

В отличие от амида лития, амид натрия изучен достаточно слабо. В [15] установлено, что амид натрия кристаллизуется в орторомбическую решетку с пространственной группой D_{2h}^{24} (№70, $Fddd$). Натрий и азот занимают уайков позиции 16f и 16g, формируя таким образом тетраэдры, центрированные на атомах натрия с межатомным расстоянием d_{Na-N}=2.4-2.5 Å. Экспериментальные исследования $NaNH_2$ под давлением показали [3], что при давлениях около 0.9 и 2.0 GPa происходят фазовые переходы, на что указывают значительные изменения в спектральных профилях КР и ИК частот. Структурные характеристики фаз высокого давления остались не определенными, однако, в теоретической работе [14] первопринципными методами получены термодинамически устойчивые фазы амида натрия при давлениях 0-20 GPa. Установлено, что α-$NaNH_2$ (пространственная группа D_{2h}^{24}) при давлении 2.2 GPa сначала трансформируется в орторомбический β-$NaNH_2$ D_2^3 (№18, $P2_12_12$), а затем, при давлении 9.4 GPa в моноклинный γ-$NaNH_2$ C_{2h}^6 (№15, $C2/c$). Как видно из схемы (1) наиболее симметрийно близкими являются фазы α-$NaNH_2$ и γ-$NaNH_2$, фаза β-$NaNH_2$, в пространственной группе которой не имеется точечных уайков позиций, отстоит от α- и γ-фаз на четыре симметрийно близкие пространственные группы.

В работах [16, 17] экспериментально исследована кристаллическая структура амида калия. Ниже температуры 326 К кристаллическая решетка KNH_2 является моноклинной, с пространственной группой C_{2h}^2 (№11, $P2_1m$), при температуре 326-328 К она становится тетрагональной, с пространственной группой симметрии D_{4h}^7 (№129, $P4/nmm$). В амиде калия, в отличие от амидов лития и натрия, в элементарной ячейке содержится всего две формульные единицы (Z=2).

Установленные в перечисленных работах кристаллические струк-

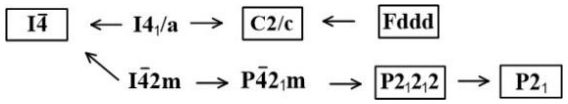
туры амидов щелочных металлов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Пространственные группы кристаллических структур амидов щелочных металлов

Пространственная группа	Источник информации, соединение, метод исследования	Кристаллографическая система
129 (P4/nmm, D_{4h}^7)	KNH_2 [17], рентгеновская дифракция, T>326K	Тетрагональная
82 (I4, S_4^2)	α-$LiNH_2$ [4], рентгеновская дифракция	
70 (Fddd, D_{2h}^{24})	α-$NaNH_2$[3], рентгеновская дифракция β-$LiNH_2$ [6], теория, VASP, давление >4.6GPa	Орторомбическая
18 ($P2_12_12$, D_2^3)	γ-$LiNH_2$ [6], теория, VASP, давление >10.7GPa β-$NaNH_2$ [14], теория, USPEX, давление >2.2GPa	
15 (C2/c, C_{2h}^6)	III- $LiNH_2$ (промеж. фаза 10-13 GPa) [10], ИК, рентген γ-$NaNH_2$ [14], теория, USPEX, давление >9.4GPa	Моноклинная
11 ($P2_1/m$, C_{2h}^2)	KNH_2 [17], рентгеновская дифракция, T<326K	
4 ($P2_1$, C_2^2)	[8] синхротр. дифр., функц. плотности, P(10.3-15.0 GPa)	

Симметрийные особенности кристаллических структур амидов щелочных металлов.

Для анализа фазовых переходов представляет интерес найти следующие симметрийные соотношения между пространственными группами, установленными экспериментально и теоретически для фаз $LiNH_2$: пространственная группа → максимальная неизоморфная под-группа и пространственная группа ← минимальная неизоморфная супергруппа. Эти соотношения могут быть найдены с использованием Кристаллографических таблиц [20]. Для пространственных групп $P2_1$, C2/c, $P2_12_12$, Fddd, I4 отвечающих установленным фазам $LiNH_2$ получается следующая схема:



(1)

На этой схеме в прямоугольники заключены пространственные группы, установленные для разных фаз $LiNH_2$. Как видно из этой схемы, наиболее тесная симметрийная связь имеется между пространственными группам C2/c и Fddd, относящимся, соответственно к промежуточной фазе высокого давления при комнатной температуре и теоретически представленной стабильной орторомбической фазе. Именно пространственная группа C2/c является максимальной неизоморфной подгруппой пространственной группы Fddd, а пространственная группа Fddd является ми-

нимальной неизоморфной супергруппой пространственной группы C2/c. Такое же соотношение имеется между моноклинной пространственной группой $P2_1$ высокого давления и пространственной группой $P2_12_12$ теоретически предсказанной стабильной орторомбической фазы.

Кристаллическая структура α-$LiNH_2$ с пространственной группой I4 претерпевая фазовые переходы проходит через стадию повышения симметрии до пространственной группы $I4_1/a$ с последующим понижением симметрии до пространственной группы C2/c промежуточной фазы высокого давления. Далее симметрия снова повышается до пространственной группы Fddd теоретически предсказанной стабильной орторомбической фазы. Второй канал фазовых переходов под давлением также связан с первоначальным повышением симметрии от группы I4 до группы $P42_1m$, далее симметрия только понижается вплоть до теоретически предсказанной фазы с пространственной группой $P2_12_12$ и моноклинной пространственной группой $P2_1$. Таким образом, достаточно тесная симметрийная связь прослеживается между пространственными группами C2/c, Fddd, I4; пространственные группы $P2_1$, $P2_12_12$ связаны с этими тремя более длинными цепочками на схеме (1). В связи с этим обратим внимание на специфически симметрийную особенность пространственных групп $P2_1$, $P2_12_12$ – они не содержат точечных уайков-позиций: в пространственной группе $P2_1$ уайков-позиция относится к общей точке примитивной ячейки (x,y,z); в пространственной группе $P2_12_12$ уайков-позиции располагаются в общей точке (x,y,z) и на линиях (0,0,z), (½, ½,z), (0, ½,z), (½, 0,z) примитивной ячейки.

Пространственные группы, приведенные в схеме, не помещенные в прямоугольники могут относиться к метастабильным состояниям. Отметим, что приведенная схема представляет возможные симметрийные переходы, допускаемые теорией групп.

Схема симметрийных связей между пространственными группами двух фаз KNH_2 оказывается достаточно простой:

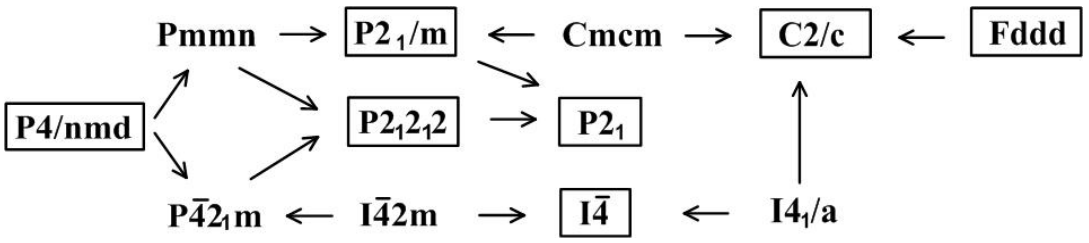
$$\boxed{\mathbf{P4/nmm}} \longrightarrow \mathbf{Pmmn} \longrightarrow \boxed{\mathbf{P2_1/m}} \qquad (2)$$

Отметим, что в этой цепочке не происходит смены центрирования пространственных групп.

На основе приведенных данных можно поставить вопрос о кристаллохимической близости амидов щелочных металлов. Амиды лития и натрия кристаллизуются в структурах с одинаковыми пространственными группами C2/c, $P2_12_12$, Fddd), что говорит об их тесной кристаллохимической близости. Не исключено, что также существуют фазы амида натрия с совпадающими с амидом лития

пространственными группами $P2_1$, I4, или с пространственными группами, не заключенными в прямоугольники на схеме 1.

Что касается амида калия, то к настоящему времени установлены две кристаллические фазы с пространственными группами P21/m, P4nmm, которые не совпадают с пространственными группами амидов лития и натрия. Симметрийную связь между всеми пространственными группами амидов щелочных металлов по принципу: пространственная группа → максимальная неизоморфная подгруппа и пространственная группа ← минимальная неизоморфная супергруппа можно также представить схемами типа (1). Такое представление неоднозначно – имеются различные варианты, из которых необходимо выбирать оптимальные – с кратчайшими связями между известными кристаллическими соединениями. Рассмотрим одну из таких оптимальных симметрийных схем:



(3)

Наиболее высокосимметричная пространственная группа амида калия P4/nmm по нескольким каналам (два из которых представлены на схеме) с понижением или с повышением симметрии через промежуточные пространственные группы связана с пространственными группами как амида калия, так и амидов лития и натрия. Наиболее тесная симметрийная связь имеется между пространственными группами $P2_1$, $P2_1/m$, $P2_12_12$ и C2/c, Fddd. Эти симметрийные особенности присутствуют на всех схемах типа (3); различия между схемами заключаются только в номерах промежуточных пространственных групп.

Промежуточные группы орторомбической и тетрагональной сингоний

Как видно из таблицы 1, синтезированные и теоретически предсказанные структуры амидов щелочных металлов относятся к тетрагональной, орторомбической и моноклинной сингониям. Кратчайшие симметрийные связи между ними обеспечиваются пространственными группами, относящимися к орторомбической и тетрагональной сингониям, которые представлены в таблице 2. В скобках в этой таблице приведены точечные подгруппы пространственных групп.

Пространственная группа Pmmn является промежуточной при фазовом переходе в KNH_2, следовательно, можно ожидать, что эта группа отвечает метастабильной фазе этого соединения. Из схемы (3) видно, что эта же группа является промежуточной между структурами фаз KNH_2 и γ-$LiNH_2$ и β-$NaNH_2$, то есть структура, отвечающая Pmmn симметрийно родственна всем амидам щелочных металлов. Подобную же связь между структурами KNH_2 ($P2_1/m$) и структурами III-$LiNH_2$ и γ- $NaNH_2$ (C2/c) обеспечивает пространственная группа Cmcm (схема 3).

Пространственные группы тетрагональной системы, представленные в таблице 2 обеспечивают пространственные связи между структурами различных фаз амида лития, схеме (1), а также связывают структуры некоторых фаз всех трех амидов щелочных металлов, согласно схеме (3).

Таблица 2 – Промежуточные группы орторомбической и тетрагональной сингоний

Орторомбическая		Тетрагональная		
Pmmn (D_{2h})	Cmcm (D_{2h})	$I4_1/a(C_{4h})$	$P42_1m$ (D_{2d})	I42m (D_{2d})

Выполненные симметрийные исследования дают основания для предположения, что пространственные группы, представленные в таблице 2 могут отвечать стабильным или метастабильным фазам амидов щелочных металлов. Далее необходимо построить модели структур, отвечающие этим пространственным группам и провести оптимизацию параметров структур методами функционала плотности. Такая работа ведется.

Список литературы

1. Тарасов Б. П. Водородная энергетика: прошлое, настоящее, виды на будущее / Б. П. Тарасов, М. В. Лотоцкий, В. А. Яртыс // Рос. хим. ж. – 2006. – т. L. №6. – с. 34-48.

2. Ажажа В.М., Тихоновский М.А., Шепелев А.Г., Курило Ю.П., Пономаренко Т.А., Виноградов Д.В. Вопросы атомной науки и техники. 2006. № 1, Серия: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники (15). с.145–152.

3. Liu A., Song Y. J. Phys. Chem. B. 2011. Vol. 115. P. 7.

4. Juza R., Opp K. Z. anorg. allg. Chemie. 1951. Vol. 266. P. 313.

5. Yang J.B., Zhou X.D., James W.J. Yelon W.B. Appl. Phys. Lett. 2006. Vol. 88. P.041914.

6. Zhong Y., Zhou H., Hu Ch., Wang D., Rao G. Journal of Alloys and Compounds. 2012. Vol.544. P. 129–133.

7. Chellappa R., Chandra D., Somayazulu M., Gramsch S. A., Hemley R. J.. J. Phys. Chem. B. 2007. Vol. 111. P. 10785–10789.

8. Huang X., Li D., Li F., Jin X., Jiang S., Li W., Yang X., Zhou Q., Zou B., Cui Q., Liu B., Cui T. J. Phys. Chem. C. 2012. Vol. 116. P. 9744 – 9749.

9. Prasad D. L. V. K., Ashcroft N. W., Hoffmann R. J. Phys. Chem. A. 2012. Vol. 116. – P. 10027.

10. Yamawaki H., Fujihisa H., Gotoh Y., Nakano S. J. Phys. Chem. B. 2014. Vol. 118. P. 9991 – 9996.

11. http://uspex.stonybrook.edu/uspex.html.

12. Oganov A. R. Ma Y. Lyakhov A.O. Valle M. Reviews in Mineralogy & Geochemistry. 2010. Vol. 71. P. 271-298.

13. Lyakhov A. O., Oganov A. R., Stokes H. T., Zhu Q. Computer Physics Communications. 2013. Vol. 184. P. 1172.

14. Zhong Y., Zhou H., Hu C., Wang D., Oganov A. R. J. Phys. Chem. C. – 2012. Vol. 116. P.8387 – 8393.

15. Nagib M., Kistrup H., Jacobs H. Atomkernenergie. 1975. Vol. 26. P. 87.

16. Juza R., Jacobs H., Klose W. Zeitschrift fuer Anorganische und Allgemeine Chemie. 1965. Vol. 338. P. 171-178.

17. Jacobs H., Osten, Die E. Zeitschrift fuer Naturforschung, Teil B. Anorganische Chemie, Organische Chemie. 1976. Vol. 31. P. 385-386.

18. Muller U. Philipps-Universitat Marburg. 2008. P. 45.

19. Китаев Ю.Э., Панфилов А.Г., Tasci E. S. Aroyo M. I. Физика твердого тела. 2015. Т. 57. № 11. С. 2228-2235.

20. Hahn Th. International Tables for Crystallography, Vol. A: Space Group Symmetry Springer. 2005.

© Кайзер Е.Б., Кравченко Н.Г., Поплавной А.С., 2017

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМА ПРЕССОВАНИЯ И СПЕКАНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ КЕРМЕТА НА ОСНОВЕ КАРБИДА ТИТАНА

Св. С. Квон, И. Е. Медведева

Карагандинский государственный технический университет

Аннотация: *Представлены результаты исследований по влиянию режима прессования и спекания на параметры пористой структуры кермета на основе карбида титана. Пористая структура изучалась с помощью метода ртутной порометрии. Экспериментально установлены давление прессования, фракционный состав и параметры спекания для создания заданной открытой пористости кермета.*

Ключевые слова: *кермет, открытая пористость, фракционный состав, давление прессования, режим спекания, прочность.*

Введение. Керметы (керамик металлические материалы) – это порошковые материалы, состоящие из тугоплавких неметаллических соединений и металлической связки. В качестве металлической связки в керметах могут применяться различные металлы или сплавы, природа которых во многом определяет свойства готового кермета [1, с.112]. Микроструктура керметов может представлять собой керамическую матрицу, внутри которой размещены металлические включения; либо металлическую матрицу с изолированными между собой керамическими частицами; либо два равноправных каркаса из металла и керамики и статистическую смесь керамических и металлических частиц. Предпочтение той или иной структуры диктуется рекомендацией материала и технологией его получения. Керметы изготавливают методами порошковой металлургии – прессованием и твердофазным спеканием, жидкофазным спеканием, пропиткой, экструзией, горячим прессованием, прокаткой и др.

Изготовление керметов методом пропитки применяют реже, чем жидкофазное спекание. Это связано с тем, что в большинстве случаев стараются получить структуру кермета, при которой каждая частица карбида окружена слоем металла, чтобы обеспечить повышенные показатели ударной вязкости и трещиностойкости, а такую структуру легче получить жидкофазным спеканием, чем пропиткой. Тем не менее, в ряде случаев разумно использовать метод пропитки, который позволяет получить изделия сложной формы с практически нулевой пористостью, регулировать время контактирования с жидким металлом (сплавом) и годен для выпуска деталей больших серий. Кроме того, метод пропитки позволяет варьировать состав металлической связки в широких пределах в зависимости от требуемых конечных свойств изделия.

Для успешного ведения про-

цесса пропитки помимо хороших технологических свойств самой металлической связки (в частности, жидкотекучести) должен быть обеспечена соответствующая «пористая структура» [2, с.16]. Основными показателями пористой структуры являются общая пористость, закрытая и открытая пористость, распределение пор по размерам и поверхность пор. С точки зрения успешного протекания процесса пропитки кермета наибольший интерес представляют открытая пористость и распределение пор по размерам [3,с.54]. Именно с этих позиций было изучено влияние процессов прессования и спекания кермета на формирование пористой структуры.

Параметрами, формирующими пористый каркас, являются давление прессования, температура спекания и исходный фракционный состав. Безусловно, важнейшим фактором, определяющим характер пористости, также является и время спекания. Однако, как было показано в работе [4, с.149], увеличение время спекания приводит к коалесценции пор и образованию закрытой пористости. Поэтому в данном исследовании время спекания не варьировалось, было принято постоянным и равным 15 минут согласно классическому режиму спекания карбида титана [1,с.132].

Экспериментальная часть. В качестве исходного объекта исследований был выбран промышленный порошок карбида титана марки (ТУ 6-09-492-75), фракции F500.

Химический состав определялся на ДФС -71, фракционный состав на аналитической просеивающей машине AS200 и фотоседиментометре ФСХ- 6К. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Данные химического и фракционного анализов

Ti,%	$C_{св}$,%	$C_{общ}$,%	Fe,%	-500 мкм,%	-200 мкм,%	-100 мкм,%	-50 мкм,%
79, 5	0,2	19,8	0,3	98	23	17	12

Как видно из данных анализа фракционный состав довольно однороден (доля фракции -500 мкм составляет 98 %), соответствует заявленному сертификату, однако в составе имеются и мелкие фракции: -100 мкм; - 50 мкм. Наличие мелких фракций оказывает значительное влияние на формирование пористой структуры, поэтому их наличие и вклад в формирование каркаса и роль в процессе спекания необходимо учитывать. Как видно из данных таблицы 1 доля фракции – 200 мкм составляет 23 %. По данным проведенного симплекспланирования соответствующая координата первого симплекса составляет 52 %. Для достижения базового уровня исходный порошок карбида был подвергнут дополнительному измельчению. Для определения времени измельчения использовали формулу [5,с.22]:

$$E = c\left(\frac{1}{d_2^{\,2}} - \frac{1}{d_1^{2}}\right)$$

где E_1 – энергия, затраченная на из-

мельчение частиц до размера d_1;

E_2 – энергия, затраченная на измельчение частиц до размера d_2;

$$\frac{E_2}{E_1} = \left(\frac{1}{200^2} - \frac{1}{300^2}\right) / \left(\frac{1}{300^2} - \frac{1}{500^2}\right) = 1{,}97$$

Время, затраченное для измельчения исходного порошка карбида (основная фракция 500 мкм) составило 0,4 часа, следовательно: 1,97* 0,4 = 0,788 часов.

Измельчение проводили на мельнице Retsch Emax с параметрами измельчения: размер размольных шаров – 15 мм; частота вращения – 1200 об/мин.

После измельчения порошок был подвергнут дополнительному рассеву, доля фракции 200 мкм составила 57 %, что составляет 9 % абсолютной ошибки. Можно считать, что полученный после измельчения порошок соответствует рассчитанной координате симплекса.

После анализа фракционного состава порошок карбида титана прессовался на прессе HYDROPRESS 50. Образцы получали в виде дисков диаметром 30 мм. Давление прессования варьировалось в пределах от 1,5 до 2,5 МПа.

По окончании прессования образцы спекались в камерной печи Nabertherm LHT 02/17 при температуре 1550 ºС в атмосфере воздуха в течение 45 минут.

Спеченные образцы были подвергнуты испытаниям на прочность.

После спекания на полученных образцах была изучена пористая структура. Исследования пористости спеченных образцов проводили на ртутном порозиметре Pascal 140/440, диапазон пор доступных для измерения составляет 4 – 120 мкм. Все испытания проводились с тремя дублями, результат брался по среднеарифметическому.

При исследовании использовалась ртуть марки Р1 (ГОСТ 4658-73), содержание ртути 99,999. Угол смачивания Θ ртути такой марки равен 140 ºС.

В результате проведенных экспериментовбыли получены данные по открытой пористости, распределению пор по размерам и поверхности открытых пор (таблица 2).

Таблица 2 – Параметры пористой структуры образцов после спекания

№ Об	Отк. пор. %	Пов. пор, $см^2/г$	Доля пор, радиусом 4-50 мкм, %	Доля пор, радиусом 50 - 100 мкм, %	Доля пор, радиусом 100 - 116мкм, %	Доля пор, радиусом более 120 мкм, %
2	63	12,5	12	36	34	18
3	56	8,7	12	44	37	7
4	45	7, 4	15	21	35	29
5	43	7, 2	15	36	35	14
6	43	7, 3	17	34	34	15

Как видно из данных таблицы, основную долю пор составляют поры радиусом 50 – 100 и 100 – 116 мкм, более 30 % каждая группа. Доля пор менее 50 мкм составляет около 15 %, также как и доля очень крупных пор более 120 мкм.

По всей вероятности, очень мелкие поры не представляют особого интереса для процесса инфильтрации, т.к. ввиду большого сопротивления процесс пропитки будет затруднен.

Испытания на прочность проводились путем раздавливания на прессе INSTRON – 5972.

В таблице 3 приведены данные по прочности на раздавливание в зависимости от давления прессования и открытой пористости.

Таблица 3 – Взаимосвязь между давлением прессования, прочностью и открытой пористостью

№ образца	Давление прес., МПа	Прочность на раздавление после спекания, МПа	Открытая порист., %
1	1,50	-	-
2	1,70	130	63
3	1,90	235	56
4	2,10	245	45
5	2,30	270	43
6	2,50	290	38

Образец № 1 после прессования имел очень низкую прочность и рассыпался до спекания. В остальных образцах наблюдается достаточно хорошая корреляция между давлением прессования, прочностью и пористостью. В ранее проведенных исследованиях нами было установлено оптимальное количество связки для пропитки - 40 %. Очевидно, что и основным параметром оптимальной пористой структуры в данном случае является открытая пористость этого же порядка.

Как видно из данных таблицы открытая пористость порядка 40% достигается при давлении прессования от 2,1 до 2,5 МПа.

Заключение. Таким образом, для получения оптимального пористого каркаса кермета на основе карбида титана для про-питки на основании проведенных исследований можно рекомендовать следующие параметры:

- доля фракции -200 мкм составляет порядка 52%;
- давление прессования – от 2,1 до 2,5 МПа;
- время спекания – 40-45 мин;
- температура спекания – 1550 ºС.

Список литературы

1. Айзенкольб Ф. Порошковая металлургия. – М.: Металлургия 2009, 253 с.

2. Исагулов А.З., Куликов В.Ю., Ковалёва Т.В., Щербакова Е.П. О реологических свойствах песчано-смоляных форм //Литейное производство. – 2015. – № 2. – с. 15-17.

3. Исагулов А.З., Куликов В.Ю. Вывод уравнения прессования песчано-смоляных смесей и их реологические модели // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2007. – № 6. – с. 52-56.

4. Smagulov D., Amenova A., Dostayeva A. New method of phase transformations calculation in metals with structural features of the initial and new phases // Advanced Materials Research. – 2014. – Т. 911. – с. 148-151.

5. Исагулов А.З., Султамурат Г.И., Достаева А.М., Лайысов Н.Г. Характеристика твердых промышленных отходов металлургического производства // Труды Университета. – 2011. – № 4. – с. 21-23.

© Св.С. Квон, Медведева И.Е., 2017

ВЛИЯНИЕ НЕСТАЦИОНАРНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПРОЧНОСТЬ ПЕСЧАНО-СМОЛЯНЫХ ФОРМ

В. Ю. Куликов[1], Е. Н. Еремин[2], Т. В. Ковалёва[2]

[1]Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Казахстан

[2]Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия

Аннотация: *Определено, с целью повышения плотности и прочности получаемой оболочковой формы, давление на смесь не остается постоянным в течение всего процесса формирования оболочковой формы, а изменяется в процессе формообразования: сначала подается начальное давление 0,25-0,30 МПа, затем повышается на величину 0,05-0,10 МПа спустя 15-20 с, в конце формирования оболочки толщиной 10-15 мм давление снижается до нуля.*

It is determined that in order to increase the density and strength of the resulting shell mold, the pressure on the mixture does not remain constant throughout the process of forming the shell mold, but changes during the shaping process: first, the initial pressure is 0.25-0.30 MPa, then increases by a value of 0,05-0,10 MPa after 15-20 seconds, at the end of the formation of the shell thickness of 10-15 mm pressure is reduced to zero.

Ключевые слова: *смесь, форма, давление, песок, смола, прочность, качество*

Введение. От долговечности и эффективности работы оборудования в нефтегазовой отрасли напрямую зависят сроки и качество выполняемых работ и затраты на его эксплуатацию. Значит, обеспечение заготовительной и ремонтной базы нефтегазового оборудования качественными деталями является важной задачей.

Конкурентоспособность в производстве подобного оборудования зависит от долговечности, надежности производимых деталей, способности удовлетворить требования и ожидания потребителя продукции.

При этом, при изготовлении деталей важно снизить затраты на их производство, обеспечив, как было сказано выше, долговечность и надежность.

Качественную отливку детали невозможно получить без качественной литейной формы.

Известно, что литьё в формы, полученные из песчано-смоляных смесей (ПСС) даёт большую размерную точность. Такие формы обладают повышенными технологическими и механическими свойствами, не противодействуют усадке кристаллизующегося металла, не гигроскопичны, не склонны к осыпанию. Также они легко разрушаются после формирования отливки. Все это позволяет получать отливки, обладающие высокой чистотой поверхности и размерной точностью, что, в свою очередь, обеспечивает большую экономию формовочных материалов [1, с. 25-27].

Основная часть. На механизм повышения прочности сыпучих ма-

териалов большое влияние оказывает гранулометрический сос-тав наполнителя, а также процентный состав и свойства связующего [2, с. 38; 3, с. 31; 4, с. 21].

Прочность песчано-смоляной формы с использованием в качестве связующего пульвербакелита может колебаться от 1 до 4,5 МПа и зависит, в первую очередь, от процентного содержания связующего. Повышение прочности достигается за счёт приложения некоторого статического давления в течение теплового воздействия на смесь. Это положительно влияет на прочностные показатели и дает возможность снизить расход связующего [5, с. 17; 6, с. 16-20; 7, с.147].

В целом оболочка должна иметь прочность, достаточную для обеспечения сопротивления внешним нагрузкам. Важным параметром для нее является прочность на растяжение.

Известно, что приложение статического давления на смесь в течение формирования оболочки одновременно с термическим воздействием, повышает прочностные характеристики смеси. Вместе тем появляется возможность уменьшить использование в смеси связующего, стоимость которого весьма высока.

Целесообразность изменения давления в процессе формирования оболочки определяли в серии испытаний. Экспериментально установлено, что снижение шероховатости литейных форм достигается при увеличении давления на 0,05-0,10 МПа. При этом технологически необходимая величина газопроницаемости не снижается. Увеличение шероховатости и снижение газопроницаемости при дальнейшем увеличении давления происходит вследствие выдавливания зерен песка в уже затвердевшей оболочке. Вследствие выгорания связующего при более интенсивном прогреве ПСС показатели прочностных свойств также снижаются.

В таблице 1 приведены данные экспериментальных исследований по определению параметров изменения давления в процессе формирования оболочковой формы.

Во всех экспериментах продолжительность выдержки оболочки на плите составляла 40 с, температура нагрева модельной плиты 250 ^{0}С. Первоначальное давление во всей серии экспериментов составляло 0,2 МПа. Окончательное спекание оболочковой формы осуществлялось в течение 180 с при температуре 350 ^{0}С в электропечи. Наполнитель – кварцевый песок марок 1К0315 и 1К02 в пропорции 70:30. В качестве связующего использовался пульвербакелит.

Повышение прочности литейной формы достигается за счет изменения давления относительно начального в течение всего процесса формообразования. Вследствие изменения давления повышаются плотность упаковки зерен наполнителя (песка) и адгезионные свойств смолы, из-за более равномерного и полного обволакивания зерен песка (плавящаяся смола более прочно

связывает песчинки). При этом остальные технологические показатели формы (газопроницаемость, шероховатость) остаются в пределах необходимого.

Таблица 1 – Определение рационального параметра изменения давления на смесь в течение формирования оболочки

Изменение давления, ΔР, МПа	$R_{zф}$, мкм	Прочность формы, $\sigma_р$, МПа	Газопроницаемость, Г, ед	Величина и время после начала формообразования повышения давления, МПа
0	92	4,3	126	Весь процесс
0,01	87	4,4	124	0,01 через 10 с
0,03	73	4,8	119	0,01 через 5 с, 0,02 еще 5 с
0,05	67	4,9	111	По 0,01 МПа каждые 5 с
0,075	71	4,8	99	По 0,025 МПа через 5, 10, 20 с
0,09	68	4,7	91	По 0,03 МПа через 5, 10, 20 с

Для определения шероховатости после охлаждения отливок из них дисковой фрезой вырезали образцы размером 30×30×15 мм. Плоскость образцов зачищалась от легко отделяемого пригара формовочной смеси. Оставшийся трудно отделяемый пригар удалялся в растворе едкого натра при температуре 500 ^{0}С в течение 4…6 часов (по достижению постоянного веса образца). За количественную характеристику пригара принимали отношение веса пригара к площади поверхности образца (г/см^2).

Результаты определения влияния изменения величины давления в процессе формообразования на прочность и шероховатость формы показаны на рисунках 1, 2.

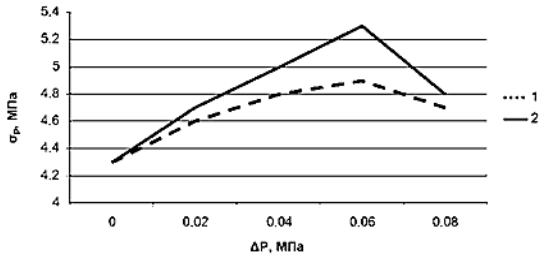


Рисунок 1 – Зависимость прочности формы от изменения прилагаемого давления в процессе формирования оболочки, где 1 – прочность без снижения давления в конце формообразования; 2 – прочность со снижением давления в конце формообразования

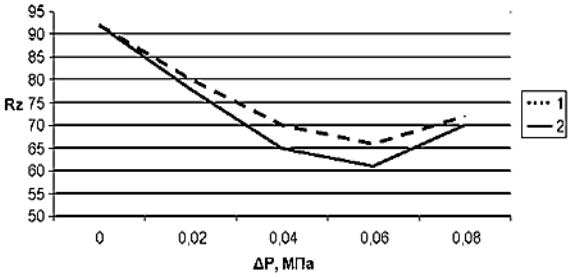


Рисунок 2 – Зависимость шероховатости от изменения прилагаемого давления в процессе формирования оболочки, где 1 – шероховатость без снижения давления в конце формообразования; 2 – шероховатость со снижением давления в конце формообразования

Зависимость прочности на разрыв от содержания связующего представлена на рисунке 3.

В проведенных экспериментах содержание пульвербакелита в смеси менялось от 1 до 7 %. Формообразование оболочки сопровождалось приложенным статическим давлением равным 0,22 МПа в течение всего времени формирования оболочки (сплошная).

В другой серии исследований давление изменялось: начальной была величина 0,22 МПа, затем давление увеличени до 0,32 МПа и снижали в конце формообразования (последение 20 % времени) до 0,2 МПа.

Образцы для определения прочности изготавливали при разных значениях статического давления при затвердевании формы. Результаты этой серии экспериментов показаны на рисунке 4.

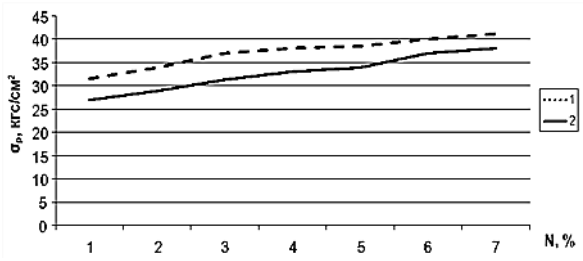


Рисунок 3 – Зависимость прочности на разрыв смеси от содержания смолы, где 1 – с использованием нестационарного давления в процессе формообразования: 2 – использование постоянного давления в процессе формообразования

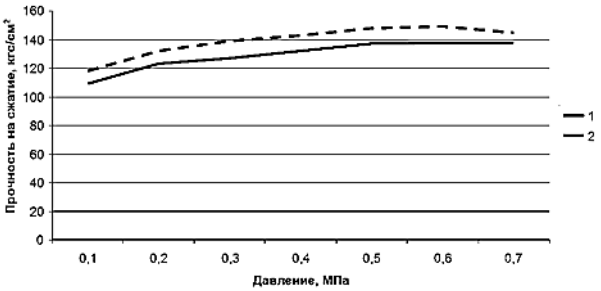


Рисунок 4 – Зависимость прочности на сжатие от величины давления при формировании оболочки, где 1 – с использованием нестационарного давления в процессе формообразования; 2 – использование постоянного давления в процессе формообразования

На рисунке 5 представлена отливка «Звездочка», полученная по новой технологии.

Найдено, что увеличение прочности песчано-смоляной оболочки достигается в условиях, когда воздействие на смесь давления не остается постоянным в процессе ее формирования, а изменяется следующим образом: сначала подается начальное давление 0,25-0,30 МПа, затем повышается на величину 0,05-0,10 МПа спустя 15-20 с, в конце формирования оболочки толщиной 10-15 мм давление снижается до нуля.

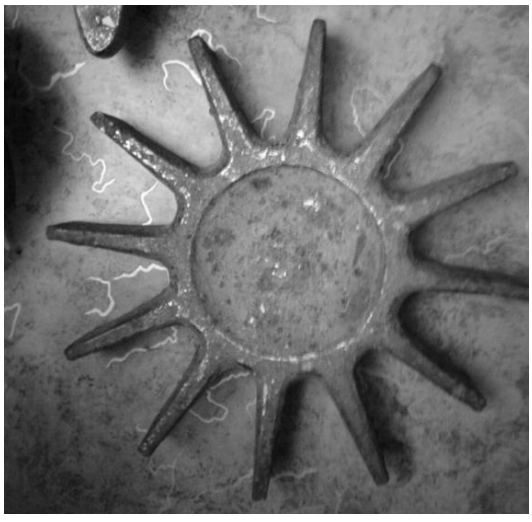


Рисунок 5 – Отливка «Звездочка»

Отливки, получаемые в литейных формах, полученных по разработанной технологии имеют высо-

кие плотность и геометрическую размерную точность, низкую шероховатость.

Список литературы

1. Соколов Н.А. Литье в оболочковые формы. – М.: Изд-во Машиностроение, 1969. – 328 с.

2. Грачев А.Н., Леушина Л.И., Ульянов В.А. Термостатирование оболочковых форм литья по выплавляемым моделям // Литейщик России. – 2014. – № 1. – С. 38-39.

3. Квон Св. С. Роль кристаллохимического строения магнетита в процессе его окисления// Труды Университета. – 2003. – № 2. – С. 30-32.

4. Исагулов А.З., Султамурат Г.И., Достаева А.М., Лайысов Н.Г. Характеристика твердых промышленных отходов металлургического производства // Труды Университета. – 2011. – № 4. – С. 21-23.

5. Квон Св. С., Буканов Ж.А. Моделирование процесса химической реакции в системе пористое тело-газовый агент // Труды Университета. – 2002. – № 1. – С. 17-19.

6. Шарая О.А., Дахно Л.А. Упрочнение деталей сельскохозяйственной техники и инструмента путем модифицирования поверхности // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2014. – №4. – С. 14-29.

7. Smagulov D., Amenova A., Dostayeva A. New method of phase transformations calculation in metals with structural features of the initial and new phases // Advanced Materials Research. – 2014. – Т. 911. – С. 148-151.

© Куликов В.Ю., Еремин Е.Н., Ковалёва Т.В., 2017

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ СВС-ЛИГАТУР СИСТЕМЫ AL-TI-B И ИХ ВЛИЯНИЕ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

А. Е. Матвеев[1], И. А. Жуков[1,2], В. В. Промахов[1,2], Я. А. Дубкова[1]

[1]Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск, Россия,

[2]Институт проблем химических и энергетических технологий СО РАН, г. Бийск, Россия

Аннотация: *В работе изучено структурно-фазовое состояние порошковых композиционных материалов Ti-B-Al, полученных методом СВС. Полученные композиционные материалы использовались в качестве лигатуры для алюминиевого сплава 6082. Введение 1 масс. % Частиц диборида титана в алюминиевый расплав приводит к увеличению прочности сплава в литом состоянии от 100 МПа до 160 МПа.*

Ключевые слова: *самораспространяющийся высокотемпературный синтез, алюминий, композиционный материал, структура, свойства, фазовый состав, диборид титана.*

Введение. Алюминий является одним из основных материалов, применяемых в авиакосмической и автомобильной отраслях. Повышение прочностных свойств алюминиевых сплавов без увеличения плотности является актуальной задачей. Известно, что введение тугоплавких неметаллических частиц в расплавы металлов эффективно измельчает зерно получаемых слитков и вносит дополнительный упрочняющий эффект, обусловленный действием механизма Орована. При этом действие этих механизмов эффективнее при использовании частиц размером до 1 мкр. Однако непосредственное введение частиц и равномерное распределение их по расплаву невозможно, так как присутствует эффект агломерации и флотации этих частиц. Решить данную проблему возможно используя предварительно подготовленные лигатуры. В этом случае большое значение имеет способ синтеза лигатуры, обеспечивающий оптимальное содержание упрочняющих частиц, их морфологию и фазовый состав [1, стр. 82]. Одним из таких методов является самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС). Данный метод отличается от остальных своей простотой, скоростями синтеза и минимальными затратами энергии. [2, стр. 2871] При этом известно, что наиболее эффективным инокулятором для алюминия является диборид титана. ***Таким образом, цель работы – изучение влияния структуры и свойств СВС-материалов на основе системы Al-Ti-B на механические свойства алюминиевых сплавов.***

Материалы и методы исследования. В качестве исходных компонентов порошковой шихты

для получения композитов использовались порошки титана марки ПТОМ-1, бора марки Б-99 и порошок алюминия марки АСД-0.

Приготовление порошковой смеси осуществлялось в несколько этапов: смешивание порошка титана и бора в стехиометрическом соотношении (69 масс. % Ti+31 масс. % B); добавление к полученной смеси порошка алюминия в количественном диапазоне 10 масс. % ÷ 55 масс. %. Из полученной порошковой смеси изготавливались прессовки диаметром 23 мм и высотой 25 мм. Прессование осуществлялось в стальной пресс-форме, усилие прессования составляло ~ 1,5 т.

Экспериментальные исследования характеристик образцов проводились следующим образом: в бомбу постоянного давления объёмом 3 литра устанавливался образец с впрессованным поджигающим составом (Ti+2B), при давлении инертного газа (аргона) в 2 атм производилось локальное инициирование путём подачи энергии через нихромовою спираль. Процесс горения фиксировался посредством съемки на высокоскоростную видеокамеру. Конечные продукты горения исследовались с помощью растровой электронной микроскопии и рентгенофазового анализа.

Введение СВС-материалов в расплав алюминия осуществлялось с использованием механического смесителя. В качестве матричного сплава использовался алюминий 6082.

Результаты исследований

Установлено, что при высоких температурах реакции синтеза размер зерна диборида титана составил 3,7 мкм (рисунок 1).

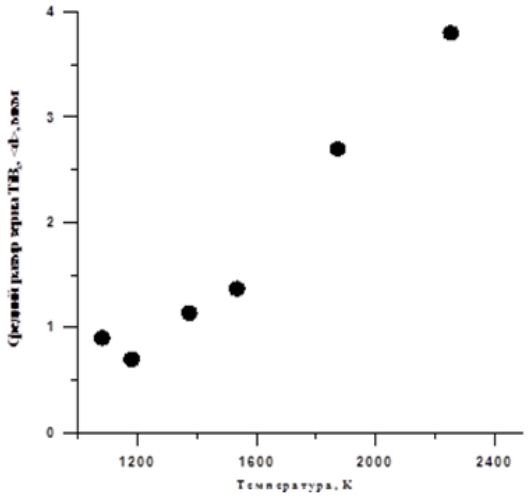


Рисунок 1 – Зависимости среднего размера зерна TiB_2 от температуры горения системы Al-Ti-B

На основе полученных РЭМ – изображений (рисунки 2–4) установлено, что при максимальном содержании алюминия в системе Al -Ti -B средний размер зерна TiB_2 уменьшился. Установлено, что увеличение содержания алюминия в системе Al-Ti-B от 10 до 60 масс % приводит уменьшению среднего размера зерна диборида титана от 3,7 мкм до 0,7 мкм (рисунок 5).

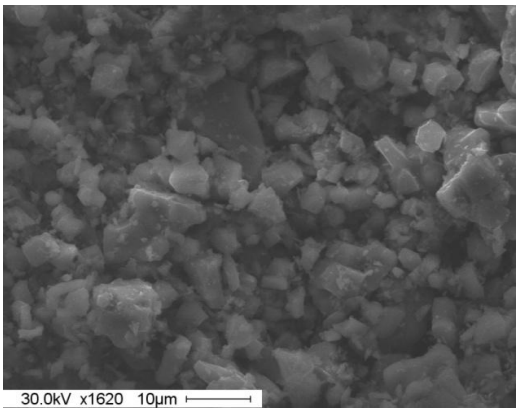


Рисунок 2 – Структура лигатуры (90%(Ti +2B)+10%Al) после синтеза

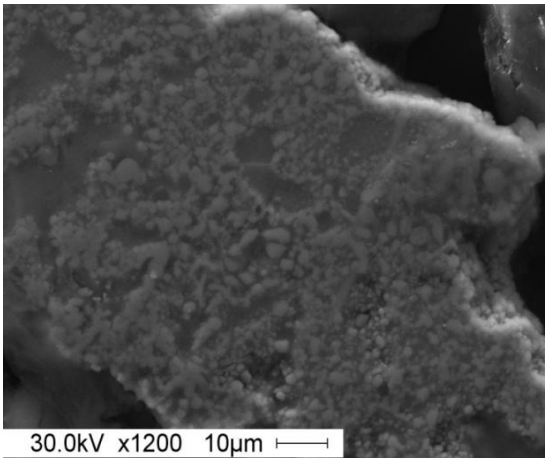


Рисунок 3 – РЭМ-изображение излома СВС-материала из порошковой смеси (70%(Ti +2B)+30%Al)

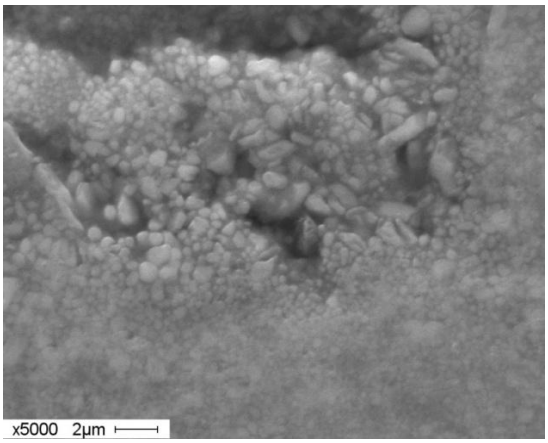


Рисунок 4 – РЭМ-изображение излома СВС-материала из порошковой смеси (50%(Ti +2B)+50%Al)

Обнаружено, что в структуре материалов наблюдались зерна диборида титана (TiB_2) формой близкой к сферической и неправильной формы. Согласно данным рентгенофазового и элементного анализов эти зерна разделены интерметаллидной матрицей типа Ti–Al.

Литературные данные свидетельствуют о том, что при изменении стехиометрии в системе Ti – B – Al можно контролировать фазовый состав конечных продуктов реакции и получать интерметаллидную матрицу из фаз Al_3Ti, Ti_3Al и др. [3, стр. 121, 4, стр. 50].

Также проведены предварительные исследования структуры и физико-механических свойств сплава Al-6082 с частицами TiB_2. Количество вводимых частиц TiB_2 составляло 0,05 масс. % и 1 масс. %. Введение частиц в расплав алюминия проводили посредствам синтезированных лигатур состава 50 масс.% (Ti+2B)+50 масс. %Al при одновременном воздействии мощного ультразвукового поля. Далее были проведены исследования структуры и физико-механических свойств сплавов Al-6082 без лигатуры и после введения 0,05 % и 1 %. TiB_2 Данные анализа демонстрируют уменьшение среднего размера зерна сплава от 620 мкм до 220 мкм.

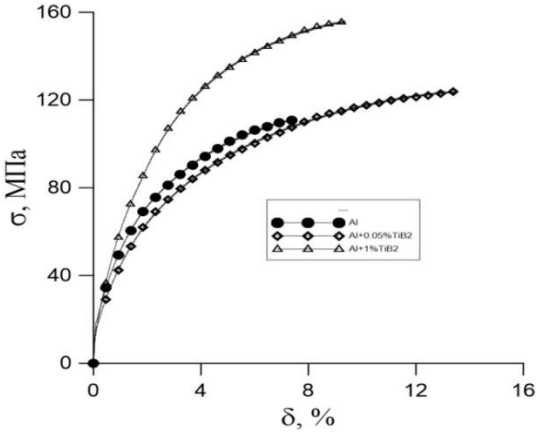


Рисунок 5 – Кривые растяжения полученных сплавов Al-6082 без добавок с ультразвуковой обработкой; Al-6082 с добавкой 0,05 % и 1 % TiB_2, с ультразвуковой обработкой

При этом исследования физико-механических свойств сплавов в литом состоянии и после введения

1 масс. % TiB_2 при одновременной ультразвуковой обработке (рисунок 5) показали повышение предела прочности сплава от 100 МПа до 160 МПа, увеличение предельной деформации до разрушения от 3,4 % до 4,1 %, увеличение модуля упругости от 24,5 ГПа до 26,5 ГПа, соответственно.

Заключение

Установлено, что структура полученных СВС-материалов порошковых систем Al-Ti-B состоит из интерметаллидной матрицы типа Ti-Al и включений частиц диборида титана (TiB_2), при этом средний размер частиц TiB_2 зависит от количества порошка алюминия в исходной системе и изменяется от 3,7 мкм до 0,7 мкм при изменении содержания алюминия от 10 до 60 масс %, соответственно.

Показано, что фазовый состав СВС – материалов, полученных из порошковых систем Al–Ti–B представлен фазами Ti–Al и TiB_2, при этом содержание фаз зависит от количества алюминия в исходной системе.

Обнаружено, что при введении частиц диборида титана в сплав алюминия происходит увеличение прочности и пластичности по сравнению с исходных сплавом, при это предел прочности при растяжении для сплавов, содержащих 1 масс. % частиц диборида титана составил ~ 160 МПа, в то время как у исходного сплава предел прочности при растяжении составлял ~ 100 МПа.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента МК-837.2017.8 договор № 14.Y30.17.837-МК.

Список литературы:

1. Dwivedi S. P., Sharma S., Mishra R. K. A356 aluminum alloy and applications-a review //Advanced Materials Manufacturing & Characterization. – 2014. – Т. 4. – №. 2. – С. 81-86.

2. Vorozhtsov S. A. et al. The application of external fields to the manufacturing of novel dense composite master alloys and aluminum-based nanocomposites //Metallurgical and Materials Transactions A. – 2015. – Т. 46. – №. 7. – С. 2870-2875.

3. Mortensen A., Jin I. Solidification processing of metal matrix composites //International Materials Reviews. – 1992. – Т. 37. – №. 1. – С. 101-128.

4. Вадченко С.Г. Режимы горения сильно разбавленной системы Ti+2B/С.Г. Вадченко, И.А. Филимонова//Физика горения и взрыва. – 2003. – №2. – С.48-55.

5. Гуляев А.П. Металловедение., 5-е изд., перераб. – М.: Металлургия, 1977. – 650 с.

© Матвеев А.Е., Жуков И.А., Промахов В.В., Дубкова Я.А., 2017

СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАЛИ 10Х18Н10Т-ВД КАК СЛЕДСТВИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

К. М. Мукашев, Б. Курбанова, А. Мтсбекова

Казахский национальный университет имени Аль-Фараби

г. Алматы, Казахстан

Аннотация: *В работе представлены результаты исследования возможности использования расплавленного лития в качестве теплоносителя и последствия его взаимодействия с модельным материалом первой стенки атомного реактора. В качестве объекта исследования была использована нержавеющая сталь марки 10Х18Н10Т-ВД, обозначаемый в промышленных условиях как ЭП-502. Исследования проводились методом позитронной спектроскопии, как наиболее чувствительный к структурным нарушениям атомарного размера. Для определения пригодности того или иного расплавленного металла в качестве теплоносителя был введен специальный коэффициент выигрыша. Установлено, что наилучшим сочетанием свойств для этой цели обладает тяжелый изотоп 7Li. Показано, что на скорость массопереноса могут оказывать влияние температура расплава, длительность обработки, скорость потока. В этом плане не последнее значение имеет предыстория материала. Об этом свидетельствуют данные радиационных воздействий, процессы насыщения водородом материала из напряженного и ненапряженного состояний, определяющие результаты диффузионного внедрения атомов Li в кристаллическую решетку стали, которые могут занимать как междоузельные положения, так и сегрегировать на границах зерен.*

Ключевые слова: *сталь, напряженное состояние, электроны, нейтроны, жидкие теплоносители, насыщение водородом, позитронная спектроскопия.*

Введение. После самой крупной в истории человечества техногенной катастрофы, произошедшей на Чернобыльской АЭС, в различных странах мира начались работы по разработке наиболее безопасных конструкций атомных реакторов, хотя эти поиски еще не внесли что - либо новое в существующий порядок подходов к решению самой проблемы, которые заключаются в следующем. Во-первых, это наращивание количества и эффективности различных защитных и локализующих систем с максимальной автоматизацией процесса управления реактором, что позволило бы свести к минимуму последствие любой аварии. Во-вторых, разрабатываются такие конструкции атомных реакторов или предлагаются такие научные и инженерные решения самой проблемы, чтобы на основе рационального использования законов природы исключить, самую возможность возникновения крупных аварий. Каким бы заманчивым ни был первый подход, ему присущ существенный недостаток - любое наращивание и усложнение связано с удорожанием каждой единицы вырабатываемой энергии. В то же время эти меры не могут устранить возможности появления аварии и ее причины, а в случае отказа, они сами могут стать причинами тяжелых

катастроф. Поэтому второй подход более целесообразен и перспективен, если, разумеется, удается решить при этом противоречивые, иногда взаимоисключающие задачи. Наиболее важной среди этих задач является проблема выбора теплоносителя первого контура, обеспечивающего отвод тепла со скоростью, необходимой для предупреждения перегрева.

Сущность проблемы. В качестве охладителя могут быть использованы как газообразные, так и жидкие среды, которые должны обладать высоким коэффициентом теплопередачи, низкой стоимостью, малым сечением захвата нейтронов и т.д. Разумеется, в ближайшее время бесспорное преимущество среди жидких теплоносителей сохраняется за водой, но у нее низкая точка кипения, а также она корродирует с металлом. В космических аппаратах и установках специального назначения будущее принадлежит жидкометаллическим охладителям. Уже сейчас некоторые реакторы на быстрых нейтронах используют в качестве теплопередающей среды жидкий натрий, при этом отмечается достаточно высокая безопасность таких установок [1]. Но, тем не менее, натриевым теплоносителям также присущи определенные недостатки, основным из которых является его химическая активность к воде и воздуху, в результате чего возникают тепловые взрывы и натриевые пожары. Эти качества характерны всем щелочным метал-лам, кандидатам в теплоносители, которые должны обладать еще низкой температурой плавления и высокой точкой кипения. Исходя из этого, наиболее пожаробезопасным считается эвтектический сплав Pb-Bi, лишенный указанных недостатков. Но этим сплавам, как и натрию, свойственна высокая степень наведенной радиоактивности, что усложняет вопросы защиты теплообменника.

Использование термоядерных реакторов в качестве источника энергии требует решения проблемы сырья для производства термоядерного топлива - трития. Считается, что такой реактор должен иметь бланкет - зону, в которой энергия нейтронов превращается в тепловую с одновременным воспроизводством трития по реакции [2]:

$$^{6}_{3}Li + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{3}_{1}H + 4.8 МэВ \qquad (1)$$

Тогда использование Li в качестве охладителя позволит решить одновременно две задачи, разумеется, при условии обеспечения полной безопасности эксплуатации, поскольку при горении Na и Li образуют аэрозоли, опасные для человека и окружающей среды. Кроме того, всем охладителям предъявляется еще одно немаловажное требование - минимальные затраты на его перекачку. С учетом всех этих обстоятельств, для определения пригодности того или иного металла в качестве теплоносителя, Китцесс ввел так называемый коэффициент выигрыша при зат-рате энергии на его перекачку [3]:

$$H = \frac{M^{2.75} \cdot C^3 \cdot K^{0.75} \cdot (\Delta T)^{3.75}}{\rho^{0.75} \cdot \sigma^{3.75}}, \qquad (2)$$

где M - молекулярный вес; C - теплоемкость; K – теплопроводность; ΔT - произвольный диапазон между точкой плавления и 650°С; ρ - удельный вес; σ - сечение захвата нейтронов теплоносителем.

В таблице 1 приведены расчетные значения коэффициента выигрыша для наиболее вероятных кандидатов - металлов. Видно, что наилучшим сочетанием свойств обладает тяжелый изотоп ^{7}Li, которого в природном Li содержится в количестве 92 %. Если затраты на отделение изотопов оправдывают себя и при условии обеспечения безопасных режимов эксплуатации [4], то ^{7}Li может оказаться наиболее подходящей теплопередающей средой, у которого $T_{пл}$ = 179°С, $T_{кип}$ = 1370°С, σ = 0.033 барн. Следовательно, материал первой стенки кроме высокой радиационной стойкости к распуханию в поле мощного нейтронного поля еще должен обладать не менее высоким антикоррозионным свойством в условиях длительной работы в расплавленном металле.

Таблица 1 – Значения коэффициента выигрыша для металлов [3]

Металлы	H	Металлы	H
^{7}Li	$2.5\cdot10^{20}$	Sn	$4.9\cdot10^{11}$
Bi	$6.6\cdot10^{16}$	K	$1.5\cdot10^{11}$
Pb	$3.7\cdot10^{12}$	NaK	$2.4\cdot10^{13}$
Na	$2.5\cdot10^{13}$	BiPb	$2.6\cdot10^{13}$

Поскольку в большинстве случаев в качестве конструкционных материалов ЯЭУ служат нержавеющая сталь, то изучение ее основных характеристик в условиях, наиболее приближенных к реальным, представляется своевременным и актуальным.

Методика эксперимента. Поэтому в качестве объектов исследования была выбрана аустенитная нержавеющая сталь марки ЭП-502 (10Х18Н10Т-ВД), которая была подвергнута облучению электронами (E = 4 МэВ) и нейтронами до флюенсов 10^{18} и 10^{19} см$^{-2}$ как из отожженного состояния, так и после обработки в расплавленном Li при температуре 600 °С в течении 1000 часов. Этим же видам воздействий подверглись образцы стали из напряженного, ненапряженного и наводороженного состояний.

Установка для обработки металлов в расплавленном литии представляла систему из различных металлических объемов, предназначенных для загрузки, перекачки, обработки и слива. Рабочие объемы были снабжены термопарами, манометрами, уровнемерами и устройствами для отбора проб. Жидкий металл перекачивался из одного объема в другой под давлением инертного газа - аргона через фильтр-ловушку со скоростью x = 1 м/с.

Экспериментальные результаты. Исследование аннигиляционных характеристик образцов проводилось методом измерения спектров угловой корреляции при комнатной температуре с последующим извлечением двух основных

параметров: $D_F = S_1/(S_2+S_3)$, пропорционального относительной вероятности перераспределения аннигиляции позитронов между электронами проводимости и ионного остова и ширины спектра на половине его высоты FWHM, сведенные в таблицу 2, где Φ_{e1} и Φ_{e2} - флюенсы электронов: Φ_n -флюенс нейтронов, равный 10^{18} см$^{-2}$.

Таблица 2 – Аннигиляционные параметры стали ЭП-502, прошедшей сложную физико-химическую обработку

Состояние материала	Вид и флюенс облучения см$^{-2}$	D_F	ΔD_F, %	FWHM МРад	ΔFWHM %
Облучение электронами E= 3 МэВ из отожженного состояния	0	1.95	-	13.45	-
	$\Phi_{e1}=10^{18}$	2.99	53	11.66	13.3
	$\Phi_{e2}=10^{19}$	3.54	82	10.80	19.7
	$\Phi_{n1}=10^{18}$	4.55	133	10.07	25.1
Облучение электронами E= 3 МэВ после обработки в расплаве лития при T=600°C, t=10^3 час.	0	2.42	24	12.10	10.0
	$\Phi_{e1}=10^{18}$	3.61	85	10.55	21.6
	$\Phi_{e2}=10^{19}$	3.98	104	10.79	19.8
	$\Phi_{n1}=10^{18}$	4.67	140	10.39	22.7
Обработка в Li из ненапряженного состояния		2.74	41	11.78	12.4
Обработка в Li из напряженного состояния		2.54	30	12.09	10.1
Наводороживание из ненапряженного состояния и обработка в Li		3.18	63	11.90	11.5
Наводороживание из напряженного состояния и обработка в Li		3.38	74	12.09	10.1
Погрешность ±		0.01	1.0	0.05	0.1

Более высокий уровень флюенса нейтронов создавал в стали значительный уровень наведенной радиоактивности, что приводил к значительным искажениям спектра УРАФ, лишившим возможности его практического использования.

Для исходного состояния стали характерны следующие значения аннигиляционных параметров, определяющих эффективность захвата позитронов структурными дефектами: D_F = 1.95 и. FWHM = 13.45 МРад. Облучение электронами E= 3 МэВ при двух флюенсах приводит к сужению спектра от 13 до 25 % при соответствующем повышении параметра D_F от 53 до 133%, что является следствием возникновения структурных нарушений. Непрерывная тысячечасовая обработка стали в расплавленном литии при T = 600°C так же увеличивает параметр D_F при одновременном сужении спектра, но на заметно меньшую величину, чем при электронном и нейтронном облучении. Вероятной причиной этого процесса может быть взаимодействие жидкого металла с твердым телом, конечный результат которого определяется диаграммой состояния. Поскольку изучаемая сталь

является многокомпонентной, то установление типа диаграммы с Li, которая зависит от многих причин и, прежде всего, от электроотрицательности металлов и размерных факторов, практически не представляется возможным. Но качественную оценку наблюдаемым явлениям дать можно.

Изучение поверхности металлов после обработки в Li в оптическим микроскопе с увеличением Х200 показало присутствие на ней ямок травления, концентрация и размеры которых зависят от многих причин. Следовательно, сталь ЭП-502 в определенной степени подвержена массопереносу в потоке расплавленного лития. На скорость массопереноса могут оказывать влияние температура расплава, длительность обработки, скорость потока и т.д. Но на результаты позитронных исследований при этом оказывает свое влияние не столько сам процесс, сколько его следствие, в результате которого происходит выщелачивание с поверхности образца атомов компонентов. Наиболее легко подверженным выщелачиванию считается никель. Не последнюю роль в процессе взаимодействия расплавленного металла с поверхностью твердого тела играет, очевидно, диффузионное внедрение атомов Li в кристаллическую решетку стали, которые могут занимать как междоузельные положения, так и сегрегировать на границах зерен. В том и другом случае, эти атомы внедрения способны связывать или высвобождать электроны основного металла, вынуждая их образовывать в решетке локализованные состояния. Последние для позитронов оказывают эффект захвата, в результате которого возрастает относительная вероятность аннигиляции с локализованными носителями заряда, что приводит к соответствующему возрастанию параметра D_F и сужению спектра. Правда, реальная концентрация внедренных атомов, следовательно, и влияние их на аннигиляционные характеристики в принципе могли быть значительно больше наблюдаемых, если обеспечить полную смачиваемость жидкости с твердым телом. Но поиск путей увеличения смачиваемости Li с нержавеющей сталью в ходе выполнения этих исследований не ставился. Тем не менее, не трудно заметить умеренную агрессивность Li к сталям этого сорта.

Облучение как ускоренными электронами, так и нейтронами деления после литиевой обработки не намного изменяет аннигиляционные характеристики материала (104 % против 81 % при облучении электронами и 139 % против 133 % при нейтронном) по сравнению с чистым облучением без предварительной обработки в Li. Следовательно, в этом случае присутствие атомов Li как на поверхности, так и внутри решетки не оказывает решающего влияния на повреждаемость металла. Но это совершенно не означает, что роль Li в этом процессе действительно незначительна. Дело в том, что облучение

электронами и нейтронами проводилось не в момент обработки образцов в расплавленном металле, что в условиях данного эксперимента практически не осуществимо, а значительно позже. Поэтому относительно небольшое приращение аннигиляционных параметров в данном случае может быть вызвано с образованием в процессе облучения связанного комплекса радиационный дефект - внедренный примесный атом.

Как известно, все элементы конструкции активной зоны реактора в процессе эксплуатации испытывают значительные внутренние напряжения вследствие циклического воздействия высокой температуры, мощного нейтронного потока, а так же подвергаются статической, динамической и вибрационной нагрузке как в результате неравномерного энерговыделения по объему, так и из-за различия в величине коэффициента теплового расширения. В связи с этим представляется не менее важным изучение процесса воздействия расплавленного металла на твердое тело из напряженного и ненапряженного состояний, а так же до и после наводороживания из этих состояний. Было установлено, что диффузионное проникновение атомов Li в кристалл и образование локализованных состояний из ненапряженного состояния происходит относительно легче, чем из напряженного, что, видимо, связано остаточными силами взаимодействия атомов напряженного металла, которые препятствуют проникновению атомов инородного металла. Наоборот, процесс наводороживания напряженного металла снижает (может быть, снимает) внутренние напряжения, созданные внешними силами, и атомы Li относительно легко диффундируют в решетку матрицы, вызывая соответствующее возрастание степени локализованного состояния ее электронов.

Заключение. В результате многочисленных и разнообразных исследований, связанных с воздействием электронного и нейтронного облучений, процессов насыщения водородом из напряженного и ненапряженного состояний, направленных на установление оптимальных условий использования жидкометаллического теплоносителя при условии применения в качестве бланкета ядерных энергетических условий, было установлено, что облучение электронами при двух флюенсах приводит к сужению спектра угловой корреляции аннигиляционного излучения от 13 до 25 % при соответствующем повышении эффективности захвата позитронов от 53 до 133%. Такие аномально высокие изменения параметров являются следствием возникновения структурных нарушений в изучаемых материалах под воздействием тех факторов, которые для сталей данного сорта являются более действенными, чем другие. Непрерывная тысячечасовая обработка стали в расплавленном литии при T = 600°C так же приводит к возрастанию параметра,

определяющего эффективность захвата позитронов возникающими структурными нарушениями. Вероятной причиной этого процесса могут быть последствия специфического взаимодействия расплавленного лития с материалами первой стенки реактора, конечный результат которого определяется диаграммой состояния между ними. Изучение воздействия расплавленного лития на нержавеющую сталь при различных условиях выявило ряд интересных моментов, важнейшим из которых является установление неоднозначности его влияния на радиационную повреждаемость металла и умеренная агрессивность на процессы корродирования стали.

Список литературы

1. Петунин В.П. Теплоэнергетика ядерных установок. – М.: Атомиздат, 1960. – 300 с.

2. Левин В.Е. Ядерная физика и ядерные реакторы. – М.: Атомиздат, 1979. – 400 с.

3. Джесси Рассел. Реактор с жидкометаллическим теплоносителем. – М.: Атомиздат, 1989. – 255 с.

4. Мукашев К.М., Мархабаева А.Е., Яр-Мухамедова Г. Ш. Радиационное материаловедение. – Алматы, 2016. – 309 с.

5. Мукашев К.М. Физика медленных позитронов и позитронная спектроскопия. – Алматы, 2010. – 510 с.

© Мукашев К.М., Курбанова Б., Мтсбекова А., 2017

ОБ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ БАКАЛАВРОВ НАПРАВЛЕНИЯ «МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ МАТЕРИАЛОВ»

Н. А. Мягкова

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

Аннотация: *Подготовка студентов технического направления будет неполной без изучения экономических дисциплин, которые дают практические знания в области организации производства в ходе выполнения комплексных экономических расчетов, в вопросах управления, а также при подготовке презентаций по результатам проведенных студентами маркетинговых исследований.*

Студенты направления «Материаловедение и технология материалов» в процессе освоения образовательной программы изучают, помимо прочего, такие экономические дисциплины, как «Организация и управление производством» и «Маркетинг инноваций».

Роль получаемых студентами знаний оценивается теми компетенциями, которые они осваивают в результате обучения. Что касается дисциплины «Организация и управление производством», то ее разделы предполагают, прежде всего, освоение вопросов организации производства, опирается на знания, полученные студентами при изучении технологии изготовления композиционных материалов. Владея этими умениями, студенты, освоив теоретические основы организации производства, получают понимание оптимального подхода к данному вопросу. Учебный процесс построен таким образом, что технология изготовления композитных изделий методом намотки представлена наглядно в виде схем, рисунков, фотографий выполняемых операций, что позволяет в условиях дефицита доступа к реальному производству и отдаленности представленного оборудования увеличить эффективность расчетов, усвоение студентами основ организации производства с учетом специфики направления, по которому обучаются студенты. Методика расчета позволяет решить аналогичные вопросы в различных сферах деятельности.

Далее на рисунке 1 представлен технологический процесс, определяющий проводимые расчеты.

Данная схема дана студентам в помощь, чтобы в ходе выполнения расчетов, неоднократно обращаясь к данному рисунку, разобраться в экономическом смысле получаемых результатов расчетов.

Практика показывает, что простое выполнение подстановки исходных данных в формулы не всегда дают верный результат, даже при наличии необходимых комментариев, сопровождающих расчеты.

Именно понимание технологической основы расчета, которое дает наглядное изображение, исключает ошибочные результаты.

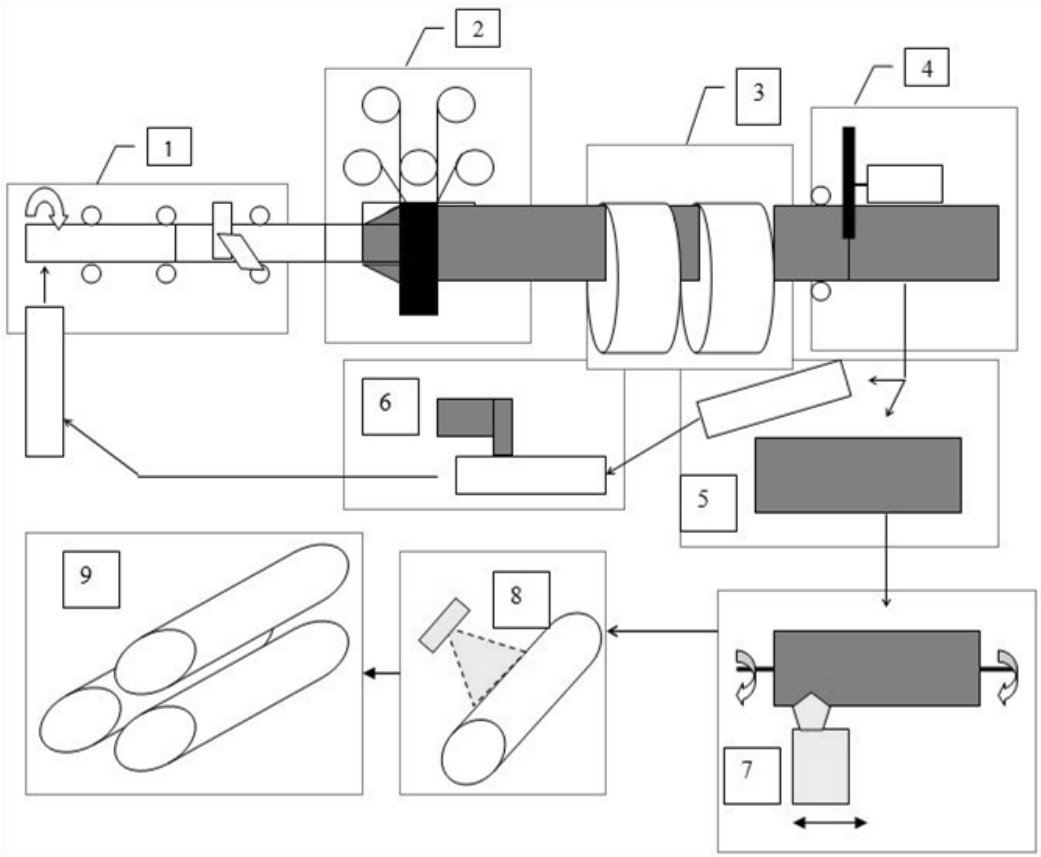


Рисунок 1 – Схема технологического процесса автоматической линии для производства труб из композиционных материалов, где 1 – установка оправки в линию намотки; 2 – намотка методом КППН; 3 – участок отверждения трубы; 4 – отрезка фрагмента трубы; 5 – снятие трубы с оправки; 6 – подготовка оправки; 7 – участок механической обработки трубы; 8 – участок контроля качества изделий (ультразвуковой, оптический, рентгеновский); 9 – складирование готовых труб [1]

Важным разделом рассматриваемой дисциплины являются вопросы управления. Основы менеджмента необходимо знать, как базовые понятия этикета, что отличает субъекта, имеющего высшее образование. С вопросами, принципами, методами управления происходит взаимодействие в любой сфере деятельности, на предприятиях любой формы собственности, при исполнении обязанностей любого уровня подчинения.

Студенты знакомятся с психологическими основами управления, знакомятся с характеристикой власти и достигают понимания, каким образом можно оптимизировать управление в организации.

Дисциплина «Маркетинг инноваций» необходима материаловедам. В целом, маркетинг стремиться выявить нужды и потребности потенциальных потребителей и

удовлетворить их. Этот подход распространяется на все сферы деятельности. Готовясь к инновационной деятельности в области создания новых материалов, придания им новых свойств, необходимо владеть навыками продвижения товара, способностью эффективно применять существующие маркетинговые инструменты. Их надо знать и, используя методические наработки, применять в соответствующих ситуациях оптимальный вариант. Студенты осваивают подходы к определению стратегии маркетинга на рынке, планированию организации сбыта и обслуживания, разработке цен и осуществлению ценовой политики, а также к разработке прогноза спроса и предложения, анализу рыночных возможностей, моделированию покупательского поведения. Выбор вида маркетинга определяет последовательность необходимых мероприятий, способствующих эффективной деятельности.

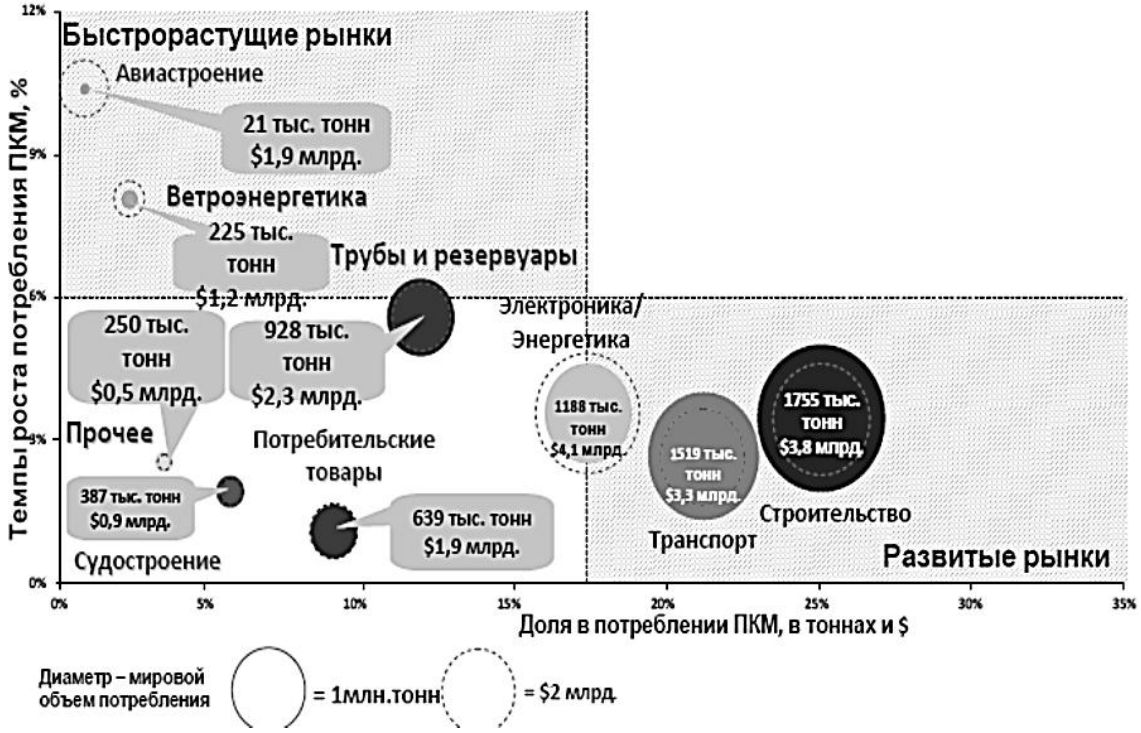


Рисунок 2 – Рынок потребления композиционных материалов [2]

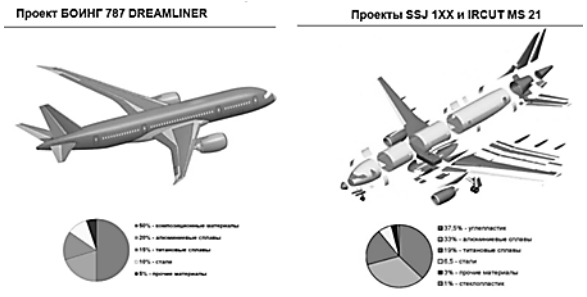


Рисунок 3 – Композитные составляющие планера современных самолетов Боинг-787 и Иркут MS-21 [3]

Кроме того, студенты получают навык подготовки и проведения презентаций. В этом случае отсутствие экономической части в выпускной квалификационной работе бакалавров компенсируются на практических занятиях дисциплины «Маркетинг инноваций». Все задания учитывают специфику

подготовки материаловедов.

На рисунках 2, 3, приведены примеры маркетинговых исследований, имеющих непосредственное отношение к композиционным материалам.

В процессе практической деятельности, выпускники, имея техническое образование, смогут выполнять экономическое обоснование своих инновационных предложений, применять способы эффективной организации процессов в различных сферах деятельности, что в итоге обеспечивает им конкурентоспособность на рынке труда.

Список литературы

1. Мягкова Н.А. Организация производства: учебное пособие / Н.А. Мягкова; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2007. – 90 с.

2. http://med.sanbright.xyz/godovoe-potreblenie-bazaltovogo-volokna-v-rossii

3. Виктор Беляев. Наконец-то "Мечта" сбылась // Авиация и космонавтика. – М., 2010. – № 1. – С. 48, 49.

© Мягкова Н.А., 2017

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОРМОЗНОГО ДИСКА С ПРИМЕНЕНИЕМ ПРОГРАММЫ SOLIDWORKS

В. М. Пацукова, Е. А. Головина

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

Аннотация: *Практический интерес вызывает дисковая тормозная система, а именно тормозной диск. Было отмечено, что очень часто в автомобилях в негодность приходят такие важные детали как, тормозной диск и колодки. Для того чтобы машина была быстрой, она должна быть легче, а привычные материалы (чугун, сталь) слишком тяжелые, чугунные тормозные диски быстро изнашиваются, ломаются из-за высокой температуры и трения, возникающего во время торможения при высокой скорости. Когда две тонны металла развивают большую скорость, то автомобиль за считанные секунды должен затормозить. Поэтому есть необходимость в использовании качественных фрикционных материалов.*

Ключевые слова: *углепластик, фенол-формальдегидное связующее, тормозная система, тормозной диск, масса конструкции, машиностроение, проектируемый материал, технологический процесс, прессование, коэффициент трения.*

Современное машиностроение дает нам неограниченные возможности в выборе материалов для изготовления различных деталей в автомобилестроении. Тормозной диск является основным элементом дисковой тормозной системы (рисунок 1).

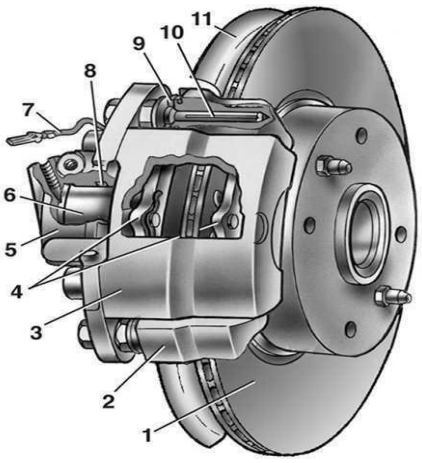


Рисунок 1 – Схема дисковой тормозной системы, где 1 – тормозной диск; 2 – направляющая колодок; 3 – суппорт; 4 – тормозные колодки; 5 – цилиндр; 6 – поршень; 7 – сигнализатор износа колодок; 8 – уплотнительное кольцо; 9 – защитный чехол направляющего пальца; 10 – направляющий палец; 11 – защитный кожух

В процессе торможения на тормозной диск оказывает воздействие тормозные колодки. Диск крутится вместе с колесом и с такой же скоростью прижимается тормозными колодками при нажатии на педаль тормоза водителем. Когда процесс торможения окончен, педаль возвращается на исходную позицию благодаря возвратной пружине. На место возвращается поршень основного тормозного цилиндра, а колодки отходят от тормозных дисков благодаря пружинным элементам [1].

Зафиксировано, что очень часто в автомобилях в негодность приходят именно тормозной диск и колодки, поэтому возникла необходимость в использовании качественных фрикционных материа-

лов, позволяющих улучшить их свойства [2, 3].

Требования, предъявляемые к материалу для изготовления тормозных дисков: высокая термостойкость (от 673,15 К); эффективное сопротивление истиранию; сопротивление к деформационным процессам; высокие прочностные характеристики. Поскольку торможение происходит за счет трения между диском и колодками, материал должен иметь достаточную прочность к истиранию, оптимальное сочетание твердости и вязкости; долговечностью.

В данной работе в качестве компонентов для материала тормозных дисков были выбраны: углепластик и карбид кремния, т.е карбон-керамические тормозные диски (рисунок 2).

Рисунок 2 – Карбон-керамический тормозной диск

Преодолев период роста, карбон-керамические тормоза оставили своих металлических коллег далеко позади. Вес тормозного диска из карбида кремния и углеродных волокон значительно меньше металлического, коэффициент трения на порядок выше, а рабочий диапазон, ограничивающийся на обычных тормозах 500…600 ^{o}C, здесь доходит далеко за отметку в 1000 ^{o}C. Карбон-керамические диски не коробятся, а снижение неподрессоренных и вращающихся масс положительно сказывается на ходовых качествах автомобиля. Тем не менее путь к обычным дорожным автомобилям таким тормозам пока что в ожидании. Стоимость комплекта таких тормозов может достигать стоимости нового автомобиля малого класса, нормально работать они начинают только после хорошего прогрева.

Расчёт нагрузок, действующих на тормозной диск

Для расчётов действующих нагрузок, были взяты характеристики автомобиля марки Nissan GTR 3.8.

Действующие нагрузки на тормозной диск:

1 **давление,** действующее перпендикулярно в зоне контакта диск – колодка; в данной тормозной системе установлены два цилиндра с подачей давления, давление в цилиндре составляет P=20 МПа, площадь цилиндра составляет S=0,628 мм; на тормозной диск с двух сторон действуют тормозные колодки, площадь одной колодки составляют S=0,39 мм. Рассчитаем рекомендуемое давление колодок на тормозной диск: $P = \frac{P \cdot S_2}{S_1} =$ 1,24 МПа. В результате действия

давления колодок на тормозной диск, осуществляется напряжение сжатия и растяжения.

2 **крутящий момент,** действующий на поверхность тормозного диска;

Крутящий момент двигателя составляет $M_{дв}$=570 Н/м; передаточное число главной пары составляет $N_{гл}$=4; передаточное число на 1-ой передаче N_1=3,6. Рассчитаем рекомендуемый крутящий момент на тормозном диске, приняв значения заданные выше: $M_{кр}=M_{дв}\cdot N_{гл}\cdot N_1$=8208 Н/м. В результате действия крутящего момента и давления, в зоне поверхности под колодкой будет возникать напряжение сдвига.

Оценка напряженного состояния с применением программы SolidWorks

Для оценки напряженного состояния в композите и подтверждении целесообразности изготовления тормозного диска из выбранных материалов.

Тормозной диск относится к ответственным изделиям и не должен иметь в себе внутренние дефекты. Для обнаружения внутренних дефектов используются различные методики контроля качества.

SolidWorks обладает возможностями анализа модели на различные напряжения, возникающие при эксплуатации проектируемой конструкции в реальных условиях. На первом этапе правильно построим структуру тормозного диска с учетом перфорации и отверстий [8]. Результаты имитационного моделирования представлены на рисунках 3, 4, 5, 6.

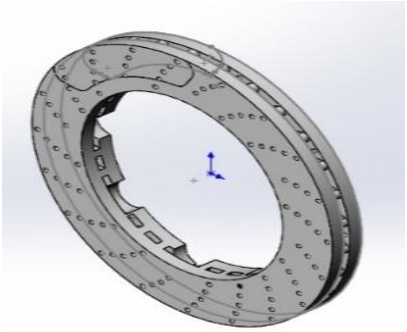
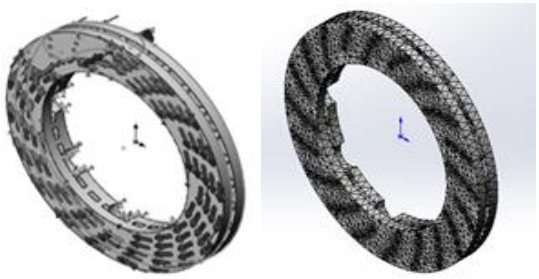


Рисунок 3 – Построение модели тормозного диска



а б

Рисунок 4 – Задание распределенной нагрузки при максимальном скоростном напоре (а) и сетка конечных элементов на модели тормозного диска (б)

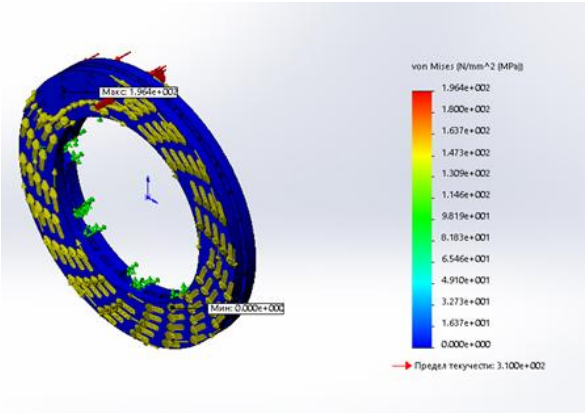


Рисунок 5 – Распределение напряжений от действия крутящего момента 8200 Н·м, действующего в объёме тормозного диска и давления 1,2 МПа, приложенного в области действия колодок

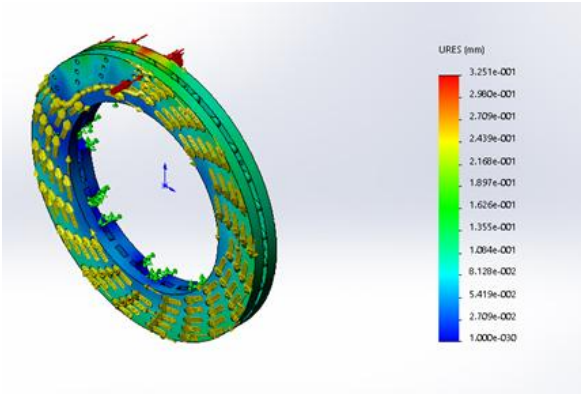


Рисунок 6 – Распределение перемещений, возникающих при действии давления 1,24 МПа

Результаты моделирования с помощью программы представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты моделирования напряженного состояния тормозного диска

Выбранный набор	Единицы измерения	Сумма по X	Сумма по Y	Сумма по Z	Результирующая
Всей модели	Н	480	262	225	591

Выводы

1 Анализ действующих нагрузок показывает, что тормозной диск работает на изгиб, кручение и сжатие. При расчете тормозной диск рассматривается как сложная конструкции, имеющая отверстия, порами служат узлы крепления ступицы.

Анализ условий эксплуатации тормозного диска показали, что максимальные нагрузки действуют в местах контакта диск – колодка при торможении. При действии максимальной нагрузки на тормозной диск действует крутящий момент – 8200 Н·м, давление в зоне контакта диск – колодка – 1,24 МПа.

2 Исход из анализа условий эксплуатации тормозного диска, были определены следующие требования к материалу: предел прочности $\sigma_в^+$ должен быть не менее 250 МПа, модуль упругости при сжатии Е не менее 200 ГПа, коэффициент теплового не менее расширения $4 \cdot 10^{-5} \cdot K$, теплопроводность при Т=100 °С не ниже 100 Вт/м^2·°С.

3 Для изготовления тормозного диска предложена структура хаотичного распределения армирующего наполнителя в матрице, состоящая из фенолоформальдегидной смолы и углеродного волокна.

4 В результате оценки напряженного состояния с применением программы SolidWorks были получены данные показывающие, что спроектированная структура и материал тормозного диска выдерживают без разрушения нагрузки превышающие максимально действующие на тормозной диск во время эксплуатации. Следовательно, спроектированный материал работает эффективно и обеспечивает требуемый запас прочности.

Список литературы:

1. Тормозная система http:// systemsauto.ru/brake/brake.html.

2. Тормозные диски: виды, типы и предназначения – http:// www. mrwolf.ru/Avtomoto/Pro4ee/6406.

3. Тормозные диски – https:// raceportal.ru/race-theory-and-practice/ tech-theory/item/255-tormoznoj-disk. html.

4. Центральный металлический портал РФ – http:// metallicheckiy-portal.ru/marki_ metallov/chu/SCH20.

5. Свойства карбида кремния – https://www.google.ru/search.

6. Свойства фенолформольдегидной смолы – http://plastinfo. ru/content/imgupload/articles/ar_pl_t 2.gif.

7. Получение и свойства фрикционных углерод-керамических материалов класса c/sic / Е.И. Крамаренко, В.В. Кулаков, А.М. Кенигфест, С.А. Ситников, В.В. Мозалев, 2011.

8. SolidWorks: [сайт]. URL: http://chem-otkrit.ru/soft/ SolidWorks.

© Пацукова В.М., Головина Е.А., 2017

ТЕПЛОВЫЕ ЭФФЕКТЫ ЦИКЛИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

М. Г. Петров

ФГУП «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С.А. Чаплыгина», г. Новосибирск, Россия

Аннотация: *Проведены испытания образцов стали 09Г2С при циклическом нагружении, режимы которого выбирались по амплитудной зависимости теплового эффекта деформирования. Проведён термоактивационный анализ долговечности образцов, имевших значительный разогрев, в результате которого их разрушение приобретало вид, характерный для циклической ползучести. Делается вывод о том, что только та часть затраченной при нагружении работы, которая изменяет внутреннюю энергию твёрдого тела, определяет скорость его разрушения.*

Ключевые слова: *ползучесть, усталость, разрушение, прочность, долговечность, неупругость.*

Введение. Любой материал является неупругой средой, и при циклическом нагружении требуется совершать работу, практически полностью переходящую в тепловую энергию. Энергия же, необходимая для разрушения материала черпается из внутренней энергии твёрдого тела, мерой которой является температура. Воспроизводя в расчётах процессы неупругого деформирования материала с помощью реологических моделей, вычисляя тепловой эффект и решая задачу теплопроводности, можно определить ту часть затраченной работы, которая переходит во внутреннюю энергию твёрдого тела и ускоряет процесс разрушения [1].

С другой стороны, тепловые эффект сами могут давать информацию о структуре материала и типе его неупругих характеристик [2]. На рисунке 1 приведён пример измерений разности температуры между серединой и краями рабочей части пластины из стали 09Г2С, подверженной циклическому нагружению. Процедура разделения теплового эффекта на релаксационную и гистерезисную части неупругого деформирования приведена в работе [3]. С амплитудой нагружения, вызывающей усталостное разрушение такого образца, связывается составляющая разности температуры, характеризующая неупругость гистерезисного типа ΔT_h. Скорость неупругой деформации в виде раскрытия петли пластического гистерезиса за период цикла нагружения, вычисленная по тепловому эффекту, связана с долговечностью, как и скорость ползучести со временем разрушения. Для материалов с низкой теплопроводностью анализировать тепловые эффекты следует на начальной стадии разогрева, экстраполируя кривую разогрева на момент времени равный нулю, чтобы методически устранить погрешности, связанные с другими путями отвода тепла [2].

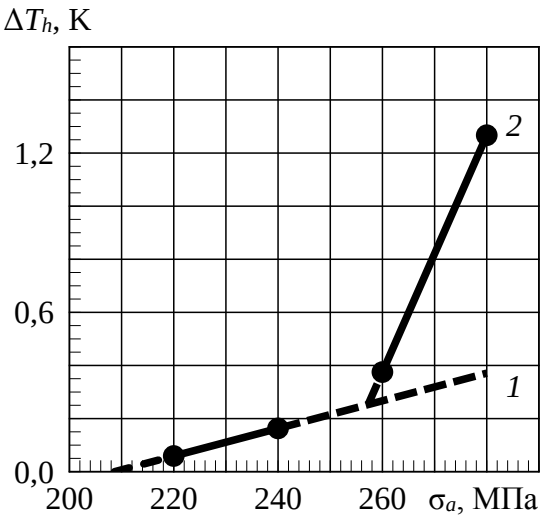


Рисунок 1 – Выбор режимов нагружения по тепловому эффекту неупругого деформирования стали 09Г2С по двум участкам прироста разности температуры, связанной с неупругостью гистерезисного типа (частота нагружения 10 Гц) [3]

Результаты испытаний. Испытания образцов данного материала (рисунок 1) при бóльших амплитудах нагружения приводят к значительному росту температуры разогрева в их средней части и переходу от процесса усталостного разрушения к разрушению в результате циклической ползучести. Вид трещин, образовавшихся в месте разрыва пластины, подтверждает характер этого случая разрушения. На рисунке 2 показан внешний вид образца, разрушившегося в результате циклической ползучести, а на рисунке 3 – вид поверхностных трещин.

При преимущественном отводе тепла в захваты испытательной машины температурное поле имеет вид параболы с максимумом в центре рабочей части образца, что полностью соответствует теоретическому расчёту [1]. О величине температуры и её распределению по длине пластины можно судить по цветам побежалости на её поверхности.

Рисунок 2 – Вид образца из стали 09Г2С, разрушившегося в результате циклической ползучести. Температура разогрева в середине пластины ~588 K

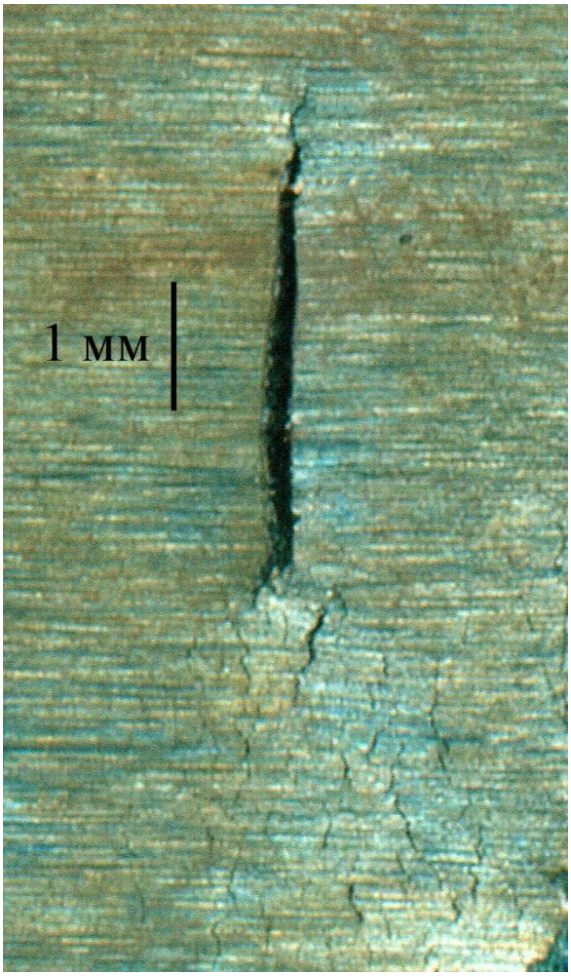


Рисунок 3 – Поверхностные трещины в образце из стали 09Г2С, разрушившемся в результате циклической ползучести. Температура разогрева в месте разрушения ~588 К (повёрнуто на 90°)

В изломе образца также можно увидеть отличительные особенности разрушения подобного вида. На рисунке 4 приведён снимок излома этого образца, на котором виден фронт развивавшихся макротрещин. Их зарождение происходило сразу в двух местах от распределённых по поверхности более мелких трещин, которые в большом количестве видны на рисунке 3. Их форма отличается от формы усталостных трещин, имеющих обычно гораздо меньшую концентрацию [1].

После проведения термоактивационного анализа тех случаев нагружения, которые вызвали такой эффект, были вычислены значения энергии активации разрушения (ЭАР), которые оказались совпадающими с силовой зависимостью ЭАР при монотонном нагружении сталей близких по химическому составу (рисунок 5) [4].

Рисунок 4 – Вид излома образца из стали 09Г2С, разрушившегося в результате циклической ползучести. Стрелками показаны места зарождения макротрещин (увеличение 8$^{\times}$)

Значения $U(\sigma)$ равны произведению универсальной газовой постоянной R на абсолютную температуру T и логарифм произведения долговечности на характерную дебаевскую частоту $\nu_0 = 10^{13}$ с$^{-1}$ [5]. При изменяющихся во времени напряжениях σ вычисляется эквивалентное значение τ, приведённое к максимальным значениям напряжений в зависимости от временной траектории нагружения [1].

Монотонное нагружение также является случаем разрушения, произошедшего в результате ползучести (то есть, во времени), как и долговечность, определённая при постоянных напряжениях [1]. Разрыв образца материала при монотонном нагружении тоже даёт тепловой эффект как результат пластического течения, распределённого по длине образца, и разрыва межатомных связей. А от поверхности разрыва распространяется тепловая волна, по характеристикам которой можно вычислить выделившуюся в месте разрыва энергию. То же происходит и при усталостном разрушении в момент распространения магистральной трещины в поперечном сечении образца.

Определив тем или иным способом скорости неупругих деформаций для данного значения установившейся температуры материала в конкретном месте конструкции, и установив их с долговечностью, получаем зависимости долговечности от параметров цикла нагружения. Рисунок 6 показывает такую зависимость для двух участков амплитудной зависимости неупругих деформаций, выбранных по тепловому эффекту циклического деформирования (рисунок 1).

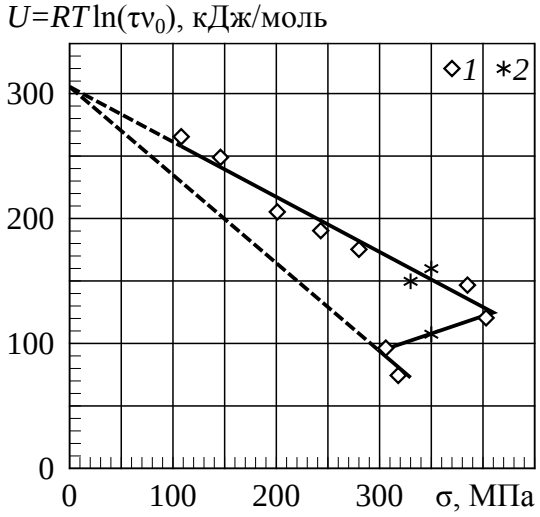


Рисунок 5 – Силовые зависимости ЭАР стали 08 при монотонном нагружении в интервале температуры 293–973 К (*1*) и стали 09Г2С при циклическом нагружении с разогревом до 389–588 К (*2*, частота нагружения 2 и 10 Гц)

То есть кривая усталости является огибающей кривых обратно пропорциональных зависимостей долговечности от приращений неупругости на каждом участке её амплитудной зависимости [1, 4]. Предполагается, что приращение неупругих деформаций связано с появлением новых мест локального пластического деформирования ввиду структурной неоднородности материала. Косвенно это подтверждается сравнением расчётных и экспериментальных значений долговечности [1].

Наиболее длительно разрушавшийся образец при амплитуде 300 МПа испытывался на частоте

2 Гц и разогрелся только до 389 K. Но его долговечность меньше, чем усталостная долговечность для этой частоты нагружения. По ЭАР этот результат соответствует перелому в её силовой зависимости, связанному с релаксационными процессами в структуре сплава (рисунок 5).

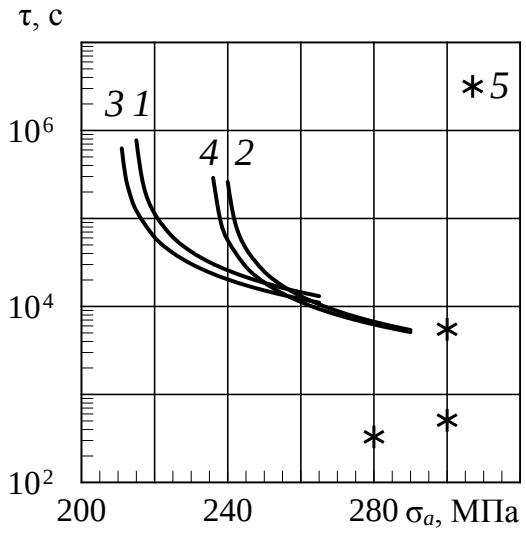


Рисунок 6 – Усреднённые амплитудные зависимости долговечности стали 09Г2С при двух значениях средних напряжений цикла: *1*, *2* – симметричный цикл ($\sigma_m = 0$); *3*–*5* – $\sigma_m = 50$ МПа (*5* – долговечность отдельных образцов с разогревом)

Другие два образца, испытывавшиеся при частоте 10 Гц, показали в результате разогрева значительно меньшую долговечность, хотя усталостное разрушение происходит обычно значительно быстрее. Кривые (*1*–*4*) на рисунке 6 получены при температуре разогрева, не превышавшей 300 K.

В.В. Фёдоровым проводились эксперименты, в которых измерялась работа, затраченная при циклическом нагружении, из которой вычиталась вся выделенная тепловая энергия [6]. Получилась разность двух очень больших чисел, имевшая большой разброс, которую автор принял за критерий разрушения. Однако количество произведённой работы зависит от амплитуды нагружения, с которой связано количество локальных объёмов, где возникают переменные микропластические деформации. Об этом свидетельствует нарастающая при увеличении амплитуды в цикле нагружения неупругая составляющая деформации гистерезисного типа. А долговечность в принципе определяется одним объёмом, в котором раньше других появится зародыш макротрещины. Поэтому нужно знать весь объём, к которому относится поглощённая энергия, и оценить погрешности измерений. Неупругие деформации тоже являются интегральной характеристикой поведения материала, но статистика их связи с долговечностью решает эту неопределённость [1].

Выводы. Таким образом, неупругие деформации, вызывающие повышение температуры материала и увеличивающие тем самым его внутреннюю энергию, должны приниматься в расчёт в зависимости от теплофизических свойств используемого материала, чтобы не было преждевременного разрушения в результате её увеличения. Затраченная же работа при циклическом деформировании твёрдого тела является сопутствующим фактором, непосредственно не связанным со скоростью его разрушения.

Микропластические деформации, вызывающие появление неупругости и тепловых эффектов, будут именно следствием процесса разрушения, области развития которого распределены по объёму материала.

Список литературы:

1. Петров, М.Г. Прочность и долговечность элементов конструкций: подход на основе моделей материала как физической среды / М.Г. Петров – Saarbrücken: Lambert Academic Publishing, 2015. – 472 с.

2. Петров, М.Г. Оценка структурного состояния композиционных материалов в процессе разрушения / М.Г. Петров // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 4 (65). – С. 61–67.

3. Гоцелюк, Т.Б. Усталостное разрушение сварных соединений из стали 09Г2С / Т.Б. Гоцелюк, О.А. Конаков, М.Г. Петров // Проблемы оптимального проектирования сооружений: доклады 2-ой Всероссийской конференции. – Новосибирск: НГАСУ, 2011. – С. 113–126.

4. Петров, М.Г. Ползучесть и усталость металлов с позиций кинетической концепции разрушения / М.Г. Петров // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Т. 4, № 1. – С. 105–111.

5. Петров, В.А. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов / В.А. Петров, А.Я. Башкарев, В.И. Веттегрень. – СПб.: Политехника, 1993. – 475 с.

6. Фёдоров, В.В. Термодинамические аспекты прочности и разрушения твёрдых тел / В.В. Фёдоров. – Ташкент: Фан, 1979. – 168 с.

© Петров М.Г., 2017

ИССЛЕДОВАНИЕ АГРЕГАЦИИ АТОМОВ УГЛЕРОДА В ПОЛЯХ БОЛЬШОЙ МОЩНОСТИ

А. В. Попов

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

Аннотация: *Исследуется влияние внешних полей на электронную структуру кластеров углерода, а также процессы агрегации конденсированных наносистем на их основе. Проведено компьютерное моделирование процесса образования малых кластеров из отдельных атомов углерода в полях большой мощности. Обнаружены метастабильные структуры малых кластеров углерода и оценены их времена жизни.*

Ключевые слова: *углерод, агрегация атомов, электронная структура, орбитальные возбуждения электронов, конденсат возбужденных состояний*

Введение. Известно, что многие физико-химические свойства вещества определяются его электронным строением. Знание электронного строения позволяет не только объяснять обнаруженное поведение вещества, но и предсказывать его свойства, создавая новые материалы с заранее заданными свойствами. Долгое время новые углеродистые материалы получали только путем диспергирования твердых веществ, например, диспергированием технического углерода. Однако в конце XX века наметился определенный интерес к созданию нанометровых материалов из отдельных атомов. Были разработаны различные физические методы осаждения слоев нанометровых толщин: лазерные, электронно-лучевые, ионно-плазменные и др.

Определенные успехи были достигнуты и в теоретическом изучении углерода, позволившие исследователям накопить знания и опыт для целенаправленного усовершенствования свойств углеродсодержащих материалов и производства новых углеродистых материалов с заранее заданными свойствами. Тем не менее, многие вопросы синтеза наноуглеродистых материалов остаются нерешенными и по сей день, в частности, отсутствует полное, четкое и ясное понимание процессов формирования наноструктур, в том числе в процессе самосборки.

Наиболее популярными на сегодняшний день являются методы расчета электронной структуры вещества в основном состоянии. Однако больший интерес представляют возбуждения: тепловые, вакансионные, примесные, электромагнитные и др., в которых пребывают электроны реального вещества. Более того, измерить какие-либо характеристики электронов, находящихся в основном состоянии, означает: оказать на них воздействие, перевести их в возбужденное состояние. К сожалению, проблема описания возбужденных

электронных состояний в многоатомных системах на сегодняшний день полностью не решена. Особую актуальность данная проблема приобретает при изучении углеродосодержащих материалов нового поколения нанометрового размера, к которым относятся фуллереноподобные наночастицы, нанотрубки, луковичные структуры и ультрадисперсные алмазы, ввиду их высокоразвитой поверхности и реакционной способности. Для их эффективного получения и последующего успешного применения необходимо иметь понимание, при каких условиях происходит стабилизация наноразмерных базовых элементов углерода.

В настоящей работе дается краткий обзор выполненных расчетов электронной структуры углерода, которые проводились с использованием нового подхода, заключающегося в применении несамосопряженных операторов для описания электронных возбуждений в открытых многоатомных системах [1, 2]. В этом подходе решение нестационарного уравнения Шредингера, описывающего поведение возбужденной системы, сводится к решению стационарного уравнения Шредингера. Это становится возможным при описании возбужденных электронных состояний, если учесть, что сами возбуждения способны спонтанно распадаться за некоторое конечное время. А, значит, и волновая функция, описывающая данную систему, должна содержать такой экспоненциальный множитель, чтобы все вероятности, определяющиеся квадратом модуля волновой функции, затухали. В соответствии с соотношением неопределенностей Гейзенберга, если некоторое квантовое состояние существует в течение некоторого времени, то оно имеет энергетический спектр шириной обратно пропорциональной этому времени. Справедливо и обратное утверждение, если некоторое состояние имеет некую ширину, то оно существует в течение времени обратно пропорционального этой ширине. Стоит отметить, что рассматриваемая задача становится существенно неэрмитовой, с комплексными значениями энергий, что позволяет по минимуму полной энергии системы отобрать реализуемые возбуждения и проследить за изменениями спектральных характеристик данной системы, обусловленными возбуждениями электронов, оценив время жизни этих возбуждений в рамках единого подхода [3].

С использованием предложенного метода [4] было показано, что атом углерода, помещенный в поле большой интенсивности, сравнимое с интенсивностью поля в самом атоме, может перейти в возбужденное состояние с полной энергией, меньшей энергии основного состояния, и пребывать в таком состоянии неограниченно долго [5].

Проведенные расчеты также показывают, что в двухатомных кластерах углерода в полях реально достижимых интенсивностей образуются долгоживущие возбуждения

при расстояниях между атомами вблизи 14 боровских радиусов. В трехатомных кластерах – при межатомных расстояниях около 26 и 38 боровских радиусов. В трехатомных кластерах долгоживущими при внешнем воздействии оказываются состояния с межатомными расстояниями около 26 и 38 боровских радиусов.

Таким образом, атом углерода, помещенный в поле двух, трех, или большего числа таких же атомов, то может образовать метастабильный возбужденный кластер, более стабильный по энергии и с более продолжительным временем жизни.

Возможно, что и кристаллизация происходит через образование ряда метастабильных возбужденных кластеров, как это было показано на примере бериллия [6, 7] и лития [8]. Однако, данное предположение, сделанное в отношении углерода, требует дальнейшей верификации.

Список литературы:

1. Попов А. В. Применение несамосопряженных операторов для описания возбуждений на примере атома водорода // Известия Алтайского государственного университета. – 2012. – Т. 2, № 1(73). – С. 154-157.

2. Попов А. В. Моделирование электронных возбуждений на примере гелия, неона, натрия и фтора / А. В. Попов, В. В. Попов – s.l.: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. – 128 с.

3. Popov A.V. Computer simulation of electronic excitations in beryllium// Mathematical Modelling and Geometry. – 2015. – V.3, No 3. P. 29-59.

4. Попов А. В. Решение спектральной задачи для электронов в атоме, учитывающей ширину энергетических уровней // Оптика и спектроскопия. – 2002. – Т. 93, № 1. – С. 5-7.

5. Попов А. В. Агрегация атомов углерода // Альтернативная энергетика и экология. – 2009. – № 7 (75). – С. 80-86.

6. Попов А. В. Конденсация кластеров бериллия // Физика твердого тела. – 2008. – Том 50, № 4. – С. 759-764.

7. Попов А. В. Вычисление неравновесной функции распределения в рамках зонной теории // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 12. – С. 62-67.

8. Попов А. В. Применение несамосопряженных операторов для описания электронных возбуждений в металлическом литии // Кристаллография. – 2016. – Т. 61, № 1. – С. 5-9.

© Попов А.В., 2017

ПРОЧНОСТНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ИНТЕРЦЕПТОРА КРЫЛА САМОЛЕТА

А. Д. Прокопец, Е. А. Головина

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

Аннотация: *Применение интерцепторов вызвано несколькими причинами: ограниченностью размеров элеронов из условия жесткости крыла и занятости хвостовой кромки крыла другими средствами механизации, потерей эффективности элеронов при концевом срыве потока, необходимостью повышения эффективности управления по крену при появлении углов скольжения, необходимостью создания дополнительного лобового сопротивления и гашения подъемной силы при посадке.*

Основная цель применения интерцепторов – при посадке самолета обеспечить увеличение нагрузок на колеса шасси и результативное использование торможения колес на всей дистанции пробега.

Ключевые слова: *углепластик, эпоксидное связующее, обшивка, интерцептор, масса конструкции, авиационные конструкции, проектируемый материал, технологический процесс, автоклав, крыло самолета.*

Крыло – несущая поверхность самолета, используемая для крепления шасси, двигателей, для размещения топлива. Данный агрегат предназначен для создания аэродинамической подъемной силы, необходимой для обеспечения полета и маневров самолета на всех режимах и принимает участие в обеспечении поперечной устойчивости и управляемости самолета [1].

Внешние формы крыла оказывают влияние не только на аэродинамические, весовые и прочностные характеристики крыла, но и на характеристики всего самолета в целом.

Интерцептор применяется в тех случаях, когда механизация имеет цель понижения посадочной скорости, при этом улучшается поперечная управляемость самолёта.

При выдвижении или отклонении интерцептора от поверхности создается интенсивный срыв потока, понижение подъемной силы и поперечный момент для управления самолетом [2-4].

Интерцепторы (рисунок 1) представляют собой подвижные части крыла в виде профилированных щитков (пластин), расположенные вдоль размаха крыла и выдвигаемые через щели в крыле по нормали к поверхности или отклоняемые на постоянный или изменяемый по воле пилота угол.

Применение интерцепторов приводит к значительному уменьшению коэффициента подъемной силы и увеличению коэффициента лобового сопротивления, что вызывает резкое снижение несущих свойств крыла и эффективности других средств механизации. Значение и знак изменения коэффици-

ентов аэродинамических сил зависят не только от угла отклонения интерцепторов или высоты их выдвижения, но и места расположения интерцептора вдоль хорды.

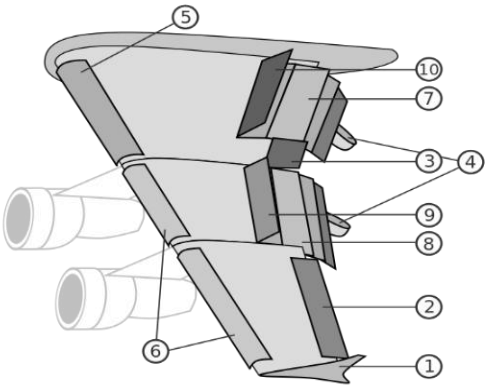


Рисунок 1 – Элементы механизации крыла: 1– законцовка, 2 – элерон, 3 – высокоскоростной элерон, 4 – обтекатели приводов закрылок, 5 – предкрылок Крюгера, 6 – предкрылки, 7,8 – закрылки, 9,10 – интерцептор

Условия эксплуатации авиационной техники обуславливают крайне жесткие требования к материалам, которые должны обеспечить прочность конструкции при минимальных удельной массе, габаритах; надежность и длительный ресурс при воздействии переменных и значительных силовых нагрузок, чередования повышенных и пониженных температур, коррозионно-активных сред.

Анализ действующих нагрузок на интерцептор крыла самолета. Правильный выбор материала для изготовления интерцептора может существенно улучшить весовые и лётно-тактические характеристики, а также снизить материальные затраты на его производство и эксплуатацию. При выборе материала учитываются его механические свойства: пределы прочности $\sigma_в$, текучести $\sigma_т$, сопротивление усталости при различных циклах изменения напряжений, модуль упругости Е, износостойкость, вязкость, теплофизические, химические свойства, коэффициент линейного расширения и др. Однако, наибольшее внимание при выборе материала уделяется удовлетворению требования обеспечения необходимости прочности и жесткости конструкции при наименьшей массе, обеспечение весовой эффективности материала. Использование композиционных материалов позволяет снизить массу конструкции самолета на 20…30 %. КМ имеют низкую чувствительность к концентраторам напряжений, обладают хорошей коррозионной стойкостью, радиопрозрачностью и др.

На крыле самолёта установлен трехсекционный интерцептор, который располагается в хвостовой части крыла между воздушным тормозом и элероном. Каждая из секций навешивается на двух кронштейнах [4].

На интерцепторы в полете действуют аэродинамические силы. Величина и распределение нагрузки определяются по результатам продувок в аэродинамической трубе при неотклоненном и отклоненном положении интерцептора. Силами тяжести конструкции интерцепторов ввиду их малости пренебрегают. При отсутствии результатов продувки используют распределение нагрузки по размаху и по хорде интерцептора [4].

На рисунке 2 представлены внешние нагрузки, действующие на крыло в полете, при взлете и посадке самолета: аэродинамические распределенные нагрузки $q^{p}_{аэр}$; массовые распределенные нагрузки от собственного веса крыла $q^{p}_{кр}$ и веса топливных баков q^{p}_{m}, расположенных в крыле; силы от веса грузов, находящихся внутри или вне крыла $G^{p}_{гр}$ [5].

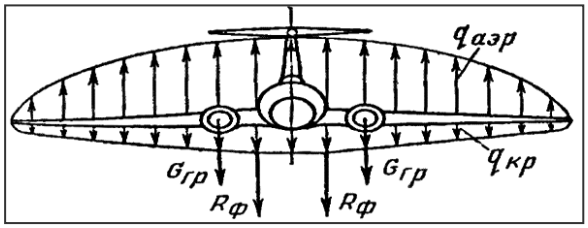


Рисунок 2 – Внешние нагрузки, действующие на крыло в полете, при взлете и посадке самолета

В общем, интерцептор работает на изгиб (рисунок 3).

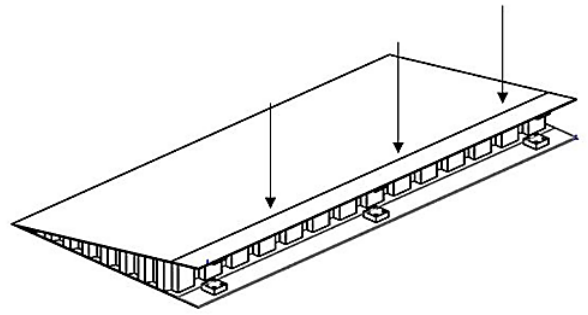


Рисунок 3 – Схема работы интерцептора на изгиб, в котором направление стрелок указывает направление действия изгибающего момента на интерцептор крыла

При расчете свободнонесущий интерцептор рассматривается как тонкостенная оболочка, лежащая на двух опорах. Опорами служат узлы крепления крыла к фюзеляжу. Опоры крепления расположим так, чтобы максимальный изгибающий момент был наименьшим [5]. Для определения нагрузок, действующие на агрегаты крыла, крыло вдоль размаха делится на N сечений (или на N-1 отсек), начиная от оси симметрии самолета. Расположение интерцептора соответствует 7-8 сечению.

Прочностное проектирование композиционного материала для изготовления интерцептора. Анализ действующих нагрузок на крыло и размеры конструктивных элементов позволяют оценить нагрузки, действующие на интерцептор (таблица 1).

Таблица 3 – Данные по нагрузке, действующей на интерцептор

Действующая нагрузка	Максимальное напряжение возникающее при действующей нагрузке, $\sigma_в^-$, МПа	Максимальное напряжение возникающее при действующей нагрузке, $\sigma_в^+$, МПа
Изгибающий момент, 15500 Н·м	3100	12400
Распределенная нагрузка на интерцептор, 608 Н/м²	125	625

Требования к материалу: жесткость интерцептора должна быть не менее 60,83 Н/м; предел прочности материала $\sigma_в^+$ (всей толщины пакета) должен быть не ниже 12,4 ГПа; предел прочности материала $\sigma_в^-$ (всей толщины пакета) не ниже 3,1 ГПа; предел прочности на изгиб всего пакета не ниже 13 ГПа; масса интерцептора должна быть не более 5,44 кг.

Оценка напряженного состояния с применением программы SolidWorks. Для оценки напряженного состояния в композиционном материале и подтверждении целесообразности изготовления интерцептора из углепластика проведем

моделирование с применением программы SolidWorks. SolidWorks обладает возможностями анализа модели на различные напряжения, возникающие при эксплуатации проектируемой конструкции в реальных условиях. На первом этапе построим структуру панели интерцептора с учетом наличия обшивок и сотового заполнителя, представленную на рисунке 4. Результаты имитационного моделирования представлены на рисунках 4–7.

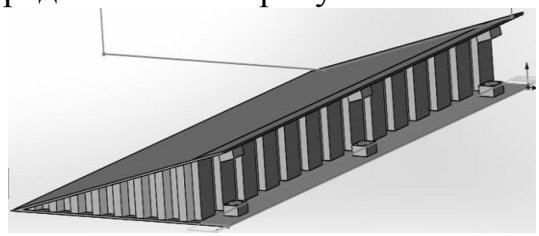


Рисунок 4 – Построение модели интерцептора

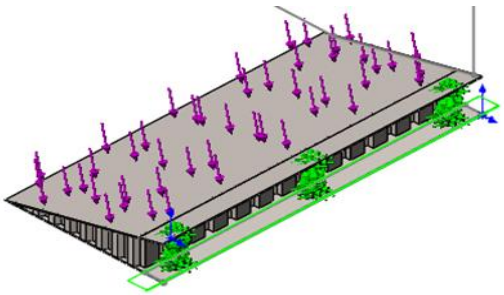


Рисунок 5 – Задание распределенной нагрузки при максимальном скоростном

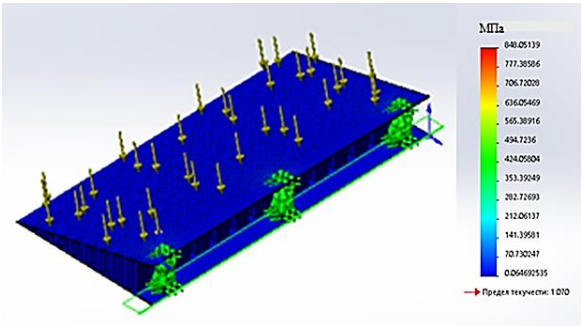


Рисунок 6 – Распределение напряжений от действия суммарного изгибающего момента 15500 Н·м, приложенного к поверхности интерцептора

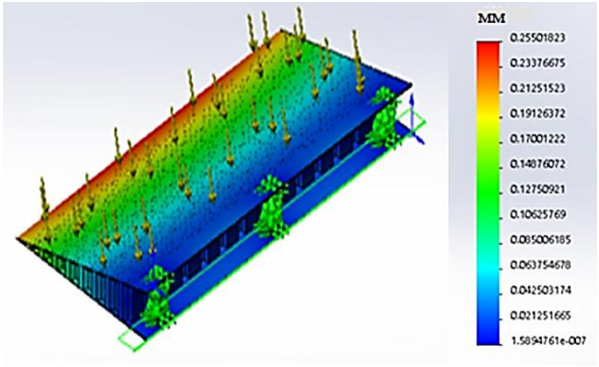


Рисунок 7 – Распределение перемещений, возникающих при действии суммарной изгибающей нагрузки 15550 Н·м

Выводы. 1. Анализ действующих нагрузок показывает, что интерцептор работает на изгиб и кручение. При расчете свободно несущий интерцептор рассматривается как тонкостенная оболочка, лежащая на двух опорах. Опорами служат узлы крепления интерцептора к крылу.

Анализ условий эксплуатации интерцептора крыла показали, что максимальные нагрузки действуют перпендикулярно панели интерцептора при спуске и торможении самолета и эти нагрузки распределены по размаху и хорде интерцептора. При действии максимальной аэродинамической нагрузки на интерцептор действует изгибающий момент – 15500 Н·м, распределенная нагрузка – 608 Н/м^2.

2. Исходя из анализа условий эксплуатации интерцептора, были определены следующие требования к материалу: жесткость интерцептора должен быть не менее 60,83 Н/м; предел прочности материала $\sigma_в^+$ (всей толщины пакета) должен быть не ниже 12,4 ГПа; предел прочности материала $\sigma_в^-$

(всей толщины пакета) не ниже 3,1 ГПа; предел прочности на изгиб всего пакета не ниже 13 ГПа; масса интерцептора должна быть не более 5,44 кг.

3. Для изготовления интерцептора предложена структура типа сэндвич, состоящая из двух обшивок из углепластика изготовленного на основе препрега ВКУ-45/3692 с толщиной монослоя 0,22 мм. Достигнуть требуемые свойства можно сформировав пакет обшивки из 13 слоев углеродной ткани, с каждой стороны, причем учитывая действие крутящего момента слои ткани будем укладывать в следующей последовательности: $[0,90,+45,-45]_s$ т.е. формируя квазиизотропную укладку.

4. В результате оценки напряженного состояния с применением программы SolidWorks были получены данные показывающие, что спроектированная структура и материал интерцептора выдерживают без разрушения нагрузки превышающие максимально действующие на интерцептор во время эксплуатации. Следовательно, спроектированный материал работает эффективно и обеспечивает требуемый запас прочности.

Список литературы:

1. Сальникова, Н.Г., Применение композиционных материалов в технике [Текст] / Н.Г Сальникова – М.: Машиностроение, 1979. – 512 с.

2. Ананьева, Е.С., Маркин В.Б. Перспективы применения углепластиков комбинированного наполнения в авиакосмической технике [Текст] / Е.С. Ананьева, В.Б. Маркин // Ползуновский вестник. – 2009. – № 4. – 4 с.

3. Гуняев, Г.М., Конструкционные эпоксидные углепластики [Текст] / Г.М. Гуняев. – М.: ВИАМ, 1984. – 16 с.

4. Колганов, И.М. Технологичность авиационных конструкций, пути повышения [Текст] / И.М. Колганов – У.: Издательство УГТУ, 2003. – 148 с.

5. Флерова, Н.И. Углепластиковые конструкции в самолете // Авиастроение. 2005. URL: http://paralay.com/starship.html (дата обращения: 28.11.2016).

6. Свойства и характеристики стеклопластика [Электронный ресурс] URL: http://www.poliuretan.ru/stekloplastik (дата обращения: 02.12.2016).

© Прокопец А.Д., Головина Е. А., 2017

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ПОЛУЧЕНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ОКСИДНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

В. В. Промахов, В. В. Платов, Н. В. Грунт, Н. А. Шульц

Национальный исследовательский Томский государственный университет, г.Томск, Россия

Аннотация: *В работе проведены исследования, направленные на разработку оригинальной конструкции устройства, предназначенного для получения сложнопрофильных изделий из технической керамики с использованием метода послойного наплавления (Fusing Deposition Modeling, FDM). На примере керамики на основе диоксида циркония ($ZrO_2(3\%Y_2O_3)$) показана принципиальная возможность получения аддитивных керамических структур без различимых границ между слоями материала.*

Ключевые слова: *аддитивные технологии, керамика, послойное наплавление, структура, свойства.*

Опираясь на мировой опыт в развитии современных подходов физического материаловедения и новых технических решений необходимо признать, что изготовление узлов и отдельных деталей из новых конструкционных и функциональных материалов без развития аддитивных технологий осуществить невозможно. Полноценное внедрение аддитивных технологий в производственный процесс обеспечит революционный прорыв в промышленности. Другие производственные процессы требуют тщательного и подробного анализа геометрии изделий, чтобы определить последовательность операций и применяемых инструментов для их изготовления. Аддитивные технологии, прежде всего, позволяют с минимальными затратами реализовать любые конструкторские и инженерные идеи в наукоёмких отраслях производства, таких, как авиастроение, двигателе- и моторостроение, ракетостроение, современные электронные приборы и др. Расширение номенклатуры стандартизированных материалов для аддитивных технологий будет способствовать их внедрению в массовое производство, что позволит в кротчайшие сроки вывести страну на новый технологический и экономический уровень.

Осуществляемое в настоящее время интенсивное освоение и внедрение аддитивных технологий ведущими странами мира связано с такими их преимуществами, как:

- возможность производства уникальных изделий произвольной, сверхсложной формы с заданными свойствами без затрат на технологическую подготовку,
- снижение расходов на логистику доставку и склад,
- снижение объемов механообработки и повышение коэффициента использования материалов,
- высокая гибкость и скорость процесса производства деталей,
- сокращение сроков изготов-

ления деталей и сокращение времени проведения научных исследований, опытно-конструкторских и технологических работ и, как следствие, значительное сокращение сроков выхода новой продукции.

Основные современные способы производства изделий с применением аддитивных технологий основываются на послойном лазерном спекании (сплавлении) металлических порошков (Selective Laser Sintering) [1]. Попытки использования порошков тугоплавких соединений в данной технологии показали невозможность получения бездефектной структуры [2]. Безусловно, разрабатываются и альтернативные подходы. В частности, в работе [3] авторы использовали принципы стереолитографии для получения образцов из керамики. Следует отметить, что в части аддитивных технологий к фотополимеру предъявляются особые требования по вязкости. При содержании порошков в фотополимере более 80 масс. % вязкость составов экспоненциально возрастает настолько, что печать становится невозможной. Это приводит к тому, что после печати и проведения технологических этапов отжига присутствует остаточная пористость, которая значительно понижает механические свойства изделий.

Таким образом, в области тугоплавких керамических материалов до сих пор не существует универсального метода получения сложнопрофильных изделий по аддитивным технологиям.

В тоже время известно [4], что существующие керамические материалы, обладают столь высокими свойствами, что могут конкурировать с рядом конструкционных материалов, в том числе высоколегированными сталями, цветными металлами и твердыми сплавами. Примером этого может служить опыт применения керамических материалов для изготовления инструментов и деталей машин. Однако развитие современной науки и техники выдвигает новые требования к керамике по линии повышения их физико-механических свойств, точности размеров и сложности конфигурации изделий. В связи с этим широких размах получили исследовательские работы по созданию новых керамических материалов, обладающих специальными свойствами (высокой диэлектрической проницаемостью, высокой механической прочностью, низкой/высокой теплопроводность, трещиностойкостью, жаропрочностью и т.д.) [5, 6]. В результате научных трудов накоплен значительный объем фундаментальных данных о закономерностях формирования структуры и свойств керамических материалов. В тоже время в технологии изготовления изделий из керамики до сих пор основными являются методы прессования с дальнейшей механической обработкой и литье в металлические формы.

В связи с этим, разработка со-

временных высокоточных устройств, адаптированных к работе с термопластичными керамическими системами является актуальной задачей, так как это позволит получать изделия сложной формы без использования дорогостоящей технологической оснастки и минимальными затратами человеческого труда.

В качестве материалов для получения керамики использовали порошки диоксида циркония частично стабилизированные диоксидом иттрия.

Из порошков готовили термопластичные суспензии. Процесс подготовки термопластичной суспензии (литейной системы) заключается в смешивании порошка со связкой при соответствующей температуре. Существует только нижний предел, определяющий минимальное количество связки, при котором из порошка при определенных условиях приготовления можно получить литейную систему. Уменьшению количества технологической связки, необходимой для образования литейной системы, способствует не только правильный подбор компонентов связки, но и создание оптимальных условий смешивания (температурный режим, длительность и интенсивность механического воздействия, порядок смешивания). Существуют три способа приготовления термопластичных масс: непрерывное, фракционное и одновременное введение порошка в связку [7]. При одновременном введении в связку всего порошка масса получается вязкой и неоднородной; при непрерывном или фракционном введении достигаются равномерное смешивание компонентов и максимальная степень заполнения объема термопластичной массы частицами порошка.

Для объёмной печати сложнопрофильных изделий из керамики была разработана оригинальная конструкция принтера (рисунок 1) и экструдера (рисунок 1, элементы 7-9), обеспечивающего экструзию термопластичных керамических суспензий через сменную фильеру. В качестве материала использовали термопластичную суспензию, предварительно нагретую до температуры в диапазоне (70÷90)^{o}C, подачу нагретой термопластичной суспензии через сопло осуществляли под давлением, которое определялось в соответствии с соотношением:

$$\Delta p = \frac{1}{\rho}\left(\frac{G}{\varphi S_{кр}}\right)^2,$$

где Δp – давление подачи, Па; G – требуемый расход термопластичной суспензии, кг/с; ρ – плотность суспензии, кг/м^3; $S_{кр}$ – площадь минимального сечения сопла, м^2; φ(T) – безразмерный коэффициент, определяющий зависимость вязкости термопластичной суспензии от температуры.

В качестве термопластичной суспензии использовали смесь тугоплавких порошков оксида алюминия с термопластичной связкой – парафин и/или церезин и воск.

При этом было реализовано быстрое охлаждение слоев затвердевающего материала путем подачи охлажденного воздуха к месту экструзии материала.

С учетом анализа данных литературных источников и экспериментальных исследований был выбран диапазона рабочей температуры экструдера в области (70÷90) ^{o}C. Выбор диапазона рабочей температуры обусловлен результатами анализа зависимости вязкости от температуры для разных термопластичных суспензий [8]. Установлено, что при t<70°C невозможно обеспечить контролируемый расход суспензии, поскольку при незначительном изменении температуры (например, за счет флуктуации), вязкость суспензии резко изменяется, что приводит к изменению φ и при заданном давлении Δp реализуется большой разброс по расходу. Верхняя граница (90°C) выбрана на основе выводов о том, что при данной температуре наблюдалась слабая зависимость вязкости суспензий от температуры μ(t), а следовательно и φ(t), что обеспечивает стабильность заданного расхода G. Дальнейшее повышение температуры обеспечивает бо́льшую стабильность, однако с ростом t возрастают энергетические затраты на нагрев, а также возможно самовоспламенение связки, что нарушает технологический режим.

На рисунке 1 представлено схематическое изображение разработанной конструкции (3D принтера).

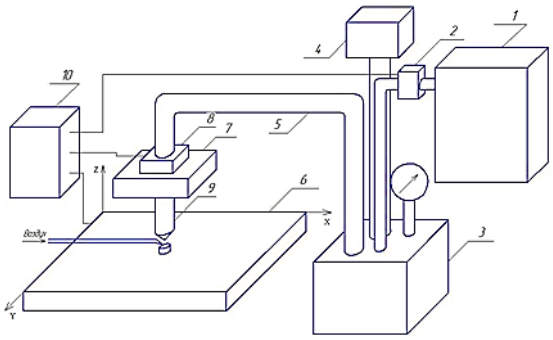


Рисунок 1 – Схема разработанного 3D принтера для печати керамики

Устройство состоит из электронного управляющего блока с установленным программным обеспечением в виде CAD/CAM пакетов – 10, который контролирует перемещение платформы 7 по заданной схеме и работу редуктора 2 для регулировки давления в системе подачи воздуха из компрессора 1. Таким образом, редуктор 2 и задвижка 8 обеспечивают контроль давления в системе подачи термопластичной суспензии по тракту трубопровода и, тем самым, определяют расход материала в каждой точке. Герметичная ёмкость 3, предназначенная для разогрева термопластичной суспензии до заданной температуры, снабжена манометром для контроля давления, нагревательными элементами и мешалкой, которая приводится в движение электродвигателем 4. Перемешивание расплавленной в емкости 3 термопластичной суспензии необходимо во избежание расслоения.

Процесс печати был реализован следующим образом. В CAD системе проектировали требуемую геометрию детали. В данном случае была выбрана геометрия тон-

костенного куба с внутренней диагональю (рисунок 2).

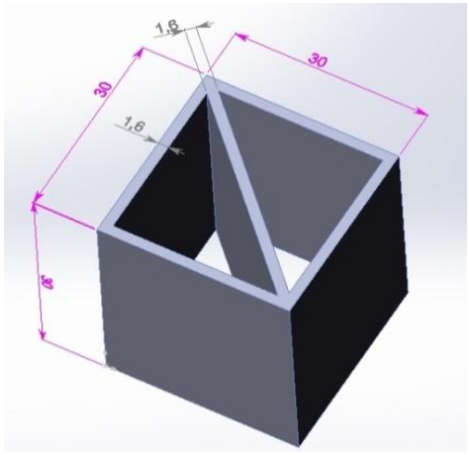


Рисунок 2 – Модель изготавливаемых образцов

Предварительно разогретая до рабочей температуры термопластичная суспензия за счет избыточного контролируемого давления в емкости 3 подавалась по подогреваемому гибкому трубопроводу 5 к печатающему блоку. Важным является контроль температуры гибкого трубопровода. Под заданными давлением и температурой термопластичная суспензия поступала к печатающему блоку, снабженному соплом. Построение заданной геометрии из термопластичной суспензии осуществлялось послойно методом наплавления. Каждый последующий слой, формируемый кончиком дозирующей головки, расположен выше предыдущего слоя на определенную и контролируемую высоту (в данном случае была задана высота 400 мкм), на которую перемещается дозирующая головка. Важным является охлаждение заданного слоя суспензии с использованием системы подачи сжатого воздуха к месту инжектирования.

На рисунке 3 представлено изображение фрагмента процесса 3D печати образца из керамики. Видно, что процесс реализуется по заданной схеме. Деламинации слоев не наблюдалось. Появление дефектов в виде «наплывов» связано с конструктивными особенностями печатающего устройства, которое требует дальнейшей модернизации технологии.

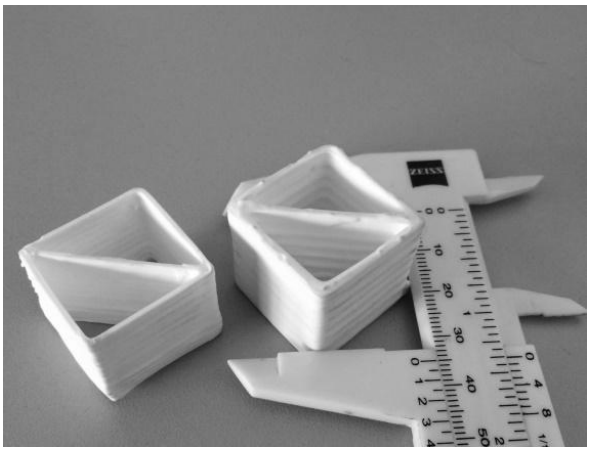


Рисунок 3 – Полученное изделие из керамики

Исследования структуры полученных образцов керамики проводили с использованием растрового электронного микроскопа PHILIPS SEM 515.

Установлено, что после спекания полученных исследовательских образцов, контролируемая высота слоя составила около 400 мкм. Особое значение имеет результат, свидетельствующий о том, что внутренняя структура керамики монолитна без различимых границ между слоями материала в образцах. Типичное изображение структуры представлено на рисунке 4.

Установлено, что прочность образцов керамики, полученной по

аддитивной технологии, на изгиб составляла (870 ± 80) МПа.

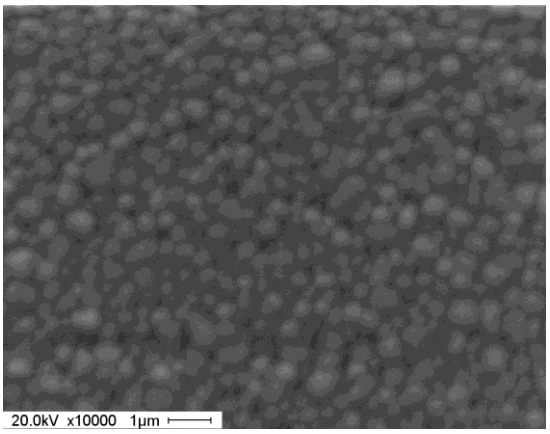


Рисунок 4 – Типичное изображение микроструктуры полученной керамики.

Это позволяет утверждать о том, что разработанный способ 3D формования изделий из технической керамики даёт возможность изготавливать изделия конструкционного и функционального назначения. Значения прочности и твердости аддитивных керамических структур не уступают параметрам образцов, полученным по традиционной технологии литья под давлением.

Таким образом, показана возможность получения аддитивных керамических структур из термопластичных суспензий с контролируемыми реологическими свойствами. Для реализации способа послойного наплавления материала разработана оригинальная система, учитывающая конструктивные особенности и массу экструдера, а также контроль параметров подачи термопластичных суспензий.

Работа выполнена при финансовой поддержке Гранта Президента МК - 2424.2017.8 договор № 14.Y30.17.2424-МК.

Список литературы

1. Enrique Juste etc. Shaping of ceramic parts by selective laser melting of powder bed // J. of Mater.Res., Vol.29, 2014, №29, P. 2086-2094.

2. Ph. Bertrand, F. Bayle, C. Combe, P. Goeuriot Ceramic components manufacturing by selective laser sintering // Appl.Surf.Sci. 254, 989, (2007).

3. Doreau F, Chaput C, Chartier T 2000 Stereolithography for manufacturing ceramic parts. Adv. Eng. Mater. 2: 493–496.

4. Промахов В.В., Буякова С.П., Кульков С.Н., Калатур Е.С., Коноваленко И.С. Структура и фазовый состав композиционных керамических материалов на основе системы ZrO_2-MgO // Известия высших учебных заведений. Физика. 2013. Т. 56. № 7-2. С. 316-320.

5. Seung K.L., Moretti J.D., Readey M.J. Thermal schock resistance of silicon nitride using an indentation quench test // J. Am. Ceram. Soc. 2002. V. 85. №1. P. 279 – 281.

6. V.V. Promakhov, I.A. Zhukov, S.A. Vorozhtsov, A.S. Zhukov and A. B. Vorozhtsov Thermal shock-resistant ceramic composites based on zirconium dioxide // Refractories and Industrial Ceramics, V.56, №6, P.610-614.

7. Грибовский П.О. Керамические твердые схемы. – М.: Энергия, 1971. – 448 с.

8. Добровольский А.Г. Шликерное литье. – М.: Металлургия, 1977. – 240 с.

© Промахов В.В., 2017

ИССЛЕДОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ ОТЛИВОК ИЗ ЖАРОПРОЧНОГО СПЛАВА, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ РАЗНЫХ УСЛОВИЯХ ВЫПЛАВКИ

Е. Н. Решоткина[1], М. К. Ибатов[2], А. С. Ким[3], С. К. Аринова[2]

[1]АО «АрселорМиттал Темиртау», г. Темиртау, Казахстан

[2]Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Казахстан

[3]Химико-металлургический институт им. Ж. Абишева, г. Караганда, Казахстан

Аннотация: *В статье показано, что, несмотря, на более высокую стоимость литья по газифицируемым моделям по сравнению с песчано-глинистым формам ЛГМ предпочтительнее для получения отливок из сложнолегированных сплавов, т.к. наиболее значимые эксплуатационные свойства, в частности, длительная прочность, повышаются на 13-15%.*

Ключевые слова: *структура, качество, ползучесть, включения, сталь, жаропрочность*

Введение. Известно, что способ выплавки отливок оказывает определяющее влияние на свойства готовой детали. Последующие технологические операции, такие как, например, прокатка, термическая обработка лишь способствуют проявлению потенциальных возможностей сплавов [1, с. 17-25].

При литье жаропрочных сплавов используются различные способы выплавки: от ПГФ (песчано-глинистые формы) до направленной кристаллизации [2, с.62; 3, с. 20]. Выбор технологии выплавки определяется как составом сплава, так и конфигурацией отливки. Для выплавки деталей несложной конфигурации, но работающей при высоких температурах в условиях постоянного нагружения, используются недорогие способы выплавки, в том числе и в ПГФ.

Литье в ПГФ характеризуется низкой стоимостью и простотой технологии, что определяет широкую распространенность метода. Однако, низкий выход годного и невысокое металлургическое качество отливки при литье в ПГФ определяют применение других способов литья, даже при условии удорожания продукции [4].

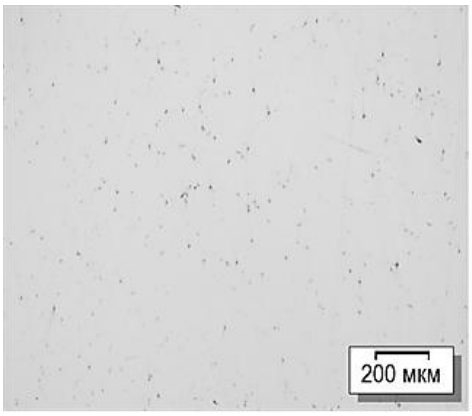
Основная часть. С целью выявления оптимальной структуры и, следовательно, свойств готовой детали были проведены исследования по влиянию способа литья на микроструктуру готовой отливки. Отливка была получена двумя различными способами: литьем в разовые песчано-глинистые формы и литьем по газифицируемым моделям (ЛГМ). В качестве экспериментального сплава использовался опытный сплав, разработанный в КарГТУ, состав которого приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Химический состав экспериментального сплава

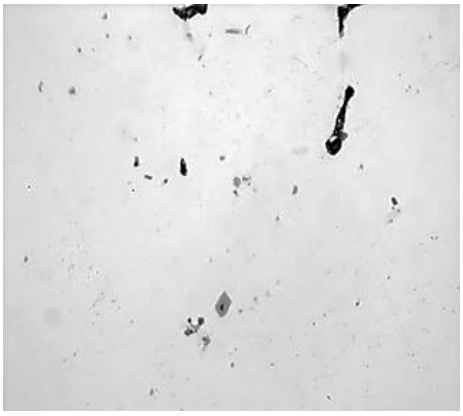
Наименование	Содержание элементов, %										
	Al	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mo	V	Ti	S	P
Образец	0,062	0,49	0,94	1,01	16,6	0,07	0,09	2,10	1,30	2,2	0,016	0,047

Микроструктура исследовалась на предмет неметаллических включений, определения балла зерна, наличия пористости.

Загрязненность неметаллическими включениями составляет 4 балла согласно ГОСТ 1778-80 [4, с. 2-4]. Неметаллические включения представлены оксидами, нитридами и карбонитридами хрома, титана, ванадия, молибдена (рисунок 1).



×100

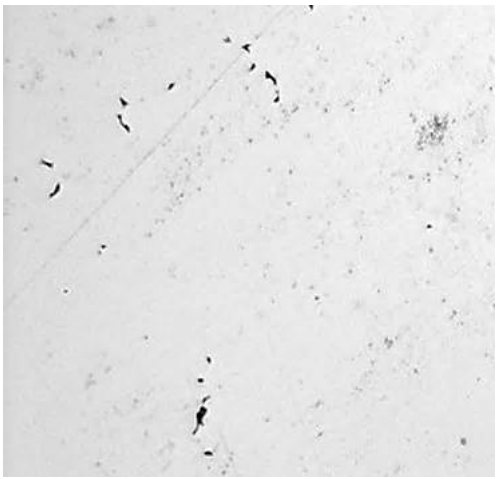


×1000

Рисунок 1 – Неметаллические включения в сплаве при разных увеличениях

Несмотря на традиционные представления о более низкой степени загрязненности неметаллическими включениями при ЛГМ [5, с. 621; 6, с.22], индекс загрязненности был практически одинаков как при литье в песчано-глинистые формы, так и при ЛГМ.

Исследования микроструктуры на наличие пористости показали, что при ЛГМ наличие и размер пористости отличается от показателей при литье в песчано-глинистые формы. Структура при ЛГМ характеризуется меньшей объемной пористостью и более тонким и однородным характером распределения пористости (рисунок 2).

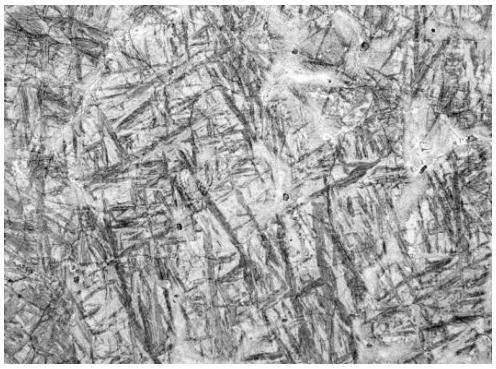


а

б

Рисунок 2 – Наличие пористости в структуре: а - ЛГМ; б - песчано-глинистая форма (× 500)

Основная структура в обеих отливках представлена бейнитоподобной матрицей с включениями комплексных карбидных фаз, твердость матрицы составляет около 53 HRC (рисунок 3).



а

б

Рисунок 3 – Микроструктура отливки: а - ЛГМ; б - песчано-глинистая форма (× 1000)

На полученных образцах из разных отливок проводились испытания на длительную прочность при температурах 600^0C – 800^0C в течение 50 часов.

Испытания проводились на испытательной машине ТРМП-50-Э. Результаты представлены в таблице 2 и на рисунке 4.

Таблица 2 – Результаты испытаний на длительную прочность

Номер образца	Предел прочности 600^0C, МПа	Предел прочности 700^0C, МПа	Предел прочности 800^0C, МПа
1 (ЛГМ)	345	312	296
2 (ПГФ)	302	286	275

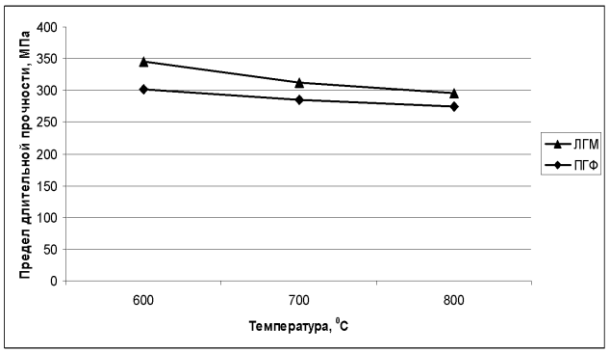


Рисунок 4 – Зависимость предела длительной прочности от температуры испытания

Как видно из данных таблицы 2 и рисунка 4 результаты по длительной прочности в указанном диапазоне для образцов, полученных методом ЛГМ лучше, чем при ПГФ.

При комплексном анализе данных таблицы 2 и результатов металлографического исследования можно сделать определенный вывод: при ЛГМ структура отливки характеризуется большей однородностью, меньшей пористостью и более высокой дисперсностью основной матрицы. Поэтому, несмот-

ря на одинаковый индекс загрязненности в обеих отливках, уровень механических свойств в отливке, полученной ЛГМ, должен быть выше, что и подтверждено экспериментально.

Заключение. Таким образом, несмотря на более высокую стоимость ЛГМ по сравнению с ПГФ стоит рекомендовать ЛГМ для получения отливок из сложнолегированных сплавов, т.к. наиболее значимые эксплуатационные свойства, в частности, длительная прочность, повышаются на 13-15%.

Список литературы

1. Гини Э.Ч. Технология литейного производства. Специальные виды литья. Изд. Академия, 2008. – 380 с.

2. Суперсплавы, жаропрочные материалы для аэрокосмической и промышленных энергоустановок, под ред. Ч.Т. Симса, Н.С. Столоффа, У.К. Хагеля. – М.: Металлургия, 1995. – 456 с.

3. Исагулов А.З., Куликов В.Ю., Квон Св.С., Щербакова Т.В., Ковалёва Т.В. Центробежное литье жаропрочных сплавов // Литейное производство. – 2016. – № 6. – С. 20-21.

4. ГОСТ 1778-70 (ИСО 4967-79) Металлографические методы определения неметаллических включений.

5. Issagulov A.Z., Kvon S.S., Kulikov V.Y., Sakbossynova A.A. Cr - Ni system alloys composition impact on durability value // Metalurgija (Sisak, Yugoslavia). – 2014. – Т. 53. – № 4. – С. 621-623.

6. Шарая О.А., Дахно Л.А. Упрочнение деталей сельскохозяйственной техники и инструмента путем модифицирования поверхности // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. – 2014. – № 4. – С.14-29.

© Решеткина Е.Н., Ибатов М.К., Ким А.С., Аринова С.К., 2017

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФЕКТНОСТИ СИЛОВОЙ ОБОЛОЧКИ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

У. А. Садиков, В. А. Шмеер

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

Аннотация. *В данной статье методами программы SolidWorks проведен анализ возникновения дефектов силовой оболочки крупногабаритных изделий из композиционных материалов, вызванных внешними факторами. С помощью акустического дефектоскопа AD-60K установлено наличие расслоений и трещин в слое ламината и внутренних слоях сетчатого стеклопластикового лейнера, а также определены положения магистральных трещин, что позволяет определить возможность эксплуатации или необходимого ремонта конструкции.*

Среди наиболее важных требований, предъявляемых к современным конструкциям, можно назвать минимальную массу, максимальную жесткость и прочность, максимальный ресурс работы конструкции в условиях эксплуатации и высокую надежность.

Всем перечисленным требованиям больше всего удовлетворяет композиционные материалы (КМ). Особенность композитов в том, что они не являются материалом в классическом смысле этого слова, таким как, например, металлы, фактически это – конструкция, создаваемая в процессе изготовления изделия. При этом композиты, выполненные из одного и того же наполнителя и связующего по одной технологии, могут иметь разные физико-механические характеристики, которые могут изменятся за счет выбора числа направлений армирования и объемных долей волокна в каждом направлении армирования. Одним из способов производства изделий из композиционных материалов является намотка (рисунок 1).

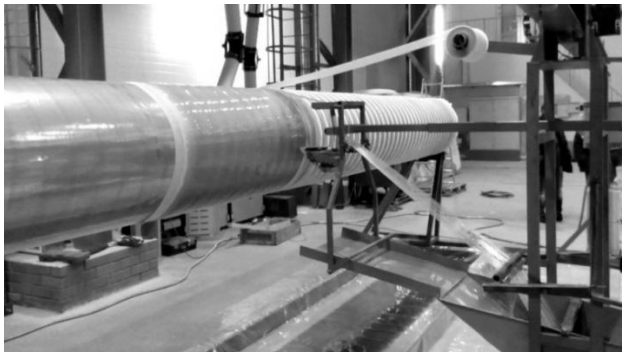


Рисунок 1 – Производственный процесс намотки стеклопластика на оправку, имеющую форму будущего изделия [1]

Процесс производства изделий методом намотки состоит из послойной и равномерной намотки волокна, на оправку (лейнер), с последующим термическим отверждением связующего. Таким методом изготавливают различные пустотелые изделия, например, емкости, бочки, цистерны и т. д.

Несоблюдение основных параметров технологического процесса при изготовлении изделий из композиционных материалов, неправильная транспортировка и

установка крупногабаритного готового изделия могут служить причиной появления дефектов в конструкциях при их эксплуатации.

Для обеспечения высокого качества конструкций из композиционных материалов необходимо применять эффективные современные методы их контроля на всех стадиях производства: проектирование, изготовление, эксплуатация.

Контроль по своим признакам может быть разрушающий, неразрушающий, аналитический, метрологический. Основное достоинство разрушающего и аналитического методов контроля является то, что они дают возможность получать объективные абсолютные параметры материалов и изделий. Например, такой важный параметр, как прочность на растяжение, наиболее эффективно определяется путем разрушения образцов с соблюдением условий соответствующего ГОСТа. Аналитические методы также являются разрушающими, так как связаны с взятием проб материала или изготовлением специальных образцов.

К основным недостаткам разрушающих и аналитических методов контроля относится: невозможность проведения сплошного контроля; невозможность выявить изменения свойств изделия или внутренние дефекты в процессе эксплуатации.

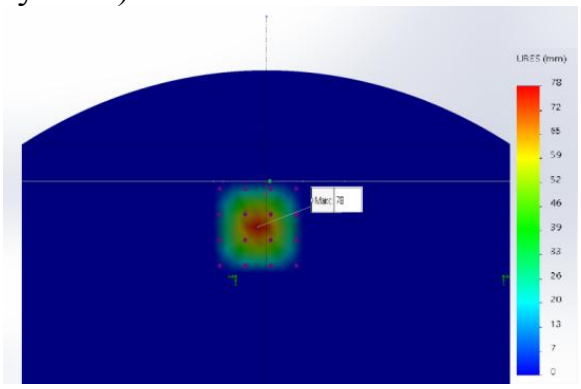
Неразрушающие методы контроля не имеют недостатков, присущих разрушающим и аналитическим методам, и наиболее применимы для обнаружения скрытых дефектов в структуре материала. Однако неразрушающие методы являются косвенными, т.е. не позволяют проводить прямой численный отчет таких параметров, как прочность и структура.

Дефекты и повреждения в конструкциях из КМ делятся на производственные и эксплуатационные. К производственным дефектам относятся: микродефекты (дефекты армирующих волокон, дефекты матрицы в промежутках между элементарными волокнами, дефекты на поверхности раздела «волокно-матрица» и др.), мини-дефекты (крутка волокна, мелкие риски, царапины, вмятины, обрыв отдельных нитей, жгутов или групп элементарных волокон, сколы и др.), макродефекты (трещины, пересекающие слои в глубь, дефекты ударного характера, расслоения, выпучивание, непроклеи, воздушные макровключения и др.) [2].

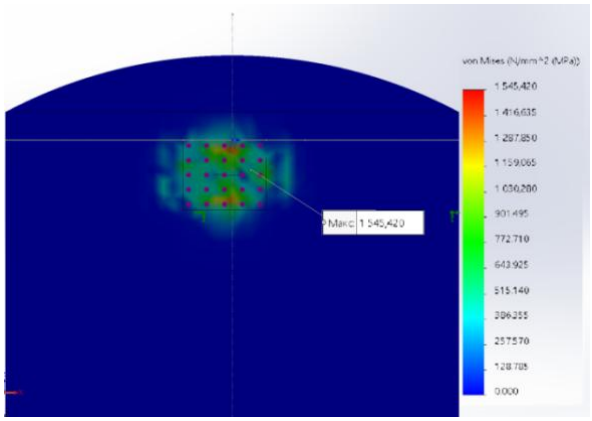
Анализ возможных причин появления дефектов силовой композитной оболочки большого размера, работающей на внутреннее и наружное давление проведен с помощью программы SolidWorks (рисунок 2).

Изделия из КМ требуют точного соблюдения инструкций по эксплуатации, транспортировке, установке. Из рисунка 2 следует, что при наличии источника напряжения в опоре оболочки (неровность опоры), он может создать в большую деформацию и разрушение материала. Для сплошного кон-

троля существующих дефектов в процессе производства и эксплуатации используют универсальный акустический и импедансный дефектоскоп, например, АД-60К (рисунок 3).



а)

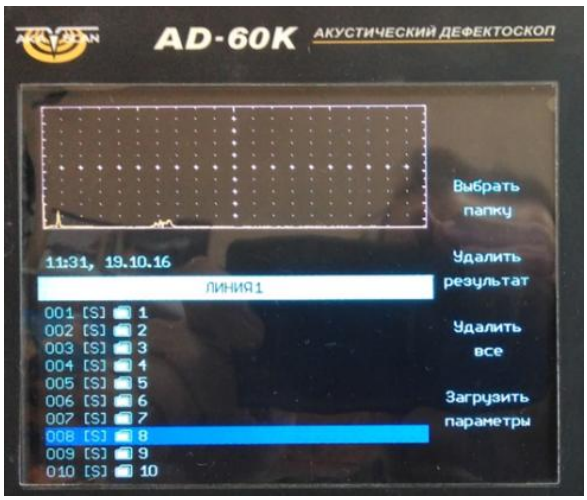


б)

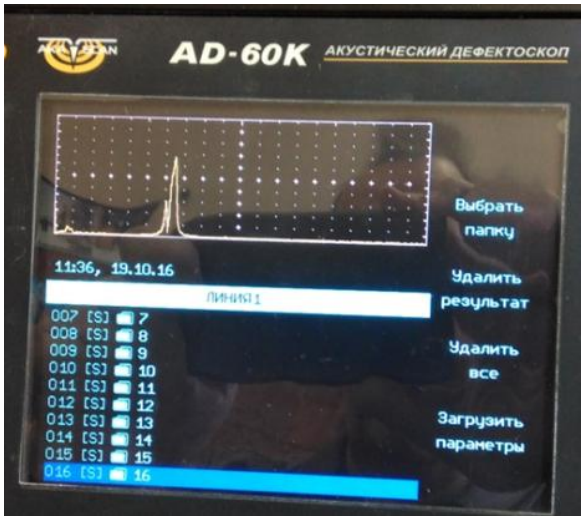
Рисунок 2 – Результат нагружения цилиндрической оболочки и распределение деформаций (а) и напряжений (б) на выделенном фрагменте (место контакта с поверхностью) для дополнительного расчета

При обнаружении дефекта структуры материала отраженная звуковая волна (частота 40-50 КГц) фиксируется приемным устройством дефектоскопа и амплитуда отраженного сигнала.

К эксплуатационным повреждениям относятся: механический износ, усталостный износ, старения и т.д. Для обнаружения таких дефектов удобно использовать портативные дефектоскопы.



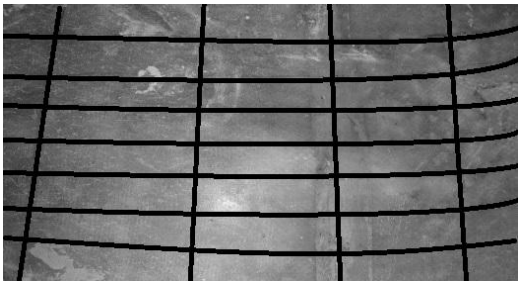
а)



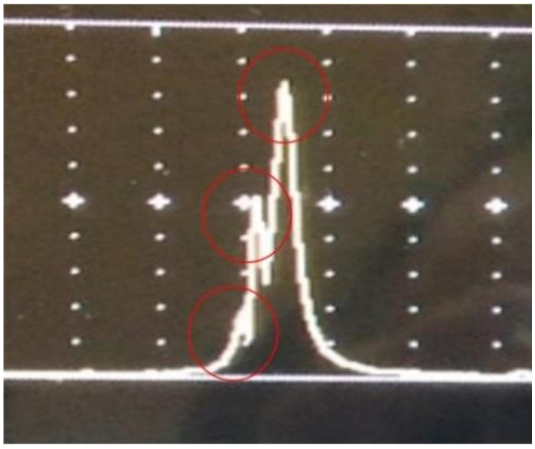
б)

Рисунок 3 – Универсальный акустический и импедансный дефектоскоп АД-60К: а – в отсутствии дефектов в структуре КМ; б – при наличии дефекта типа расслоение

До начала исследований на поверхности изделия наносится сетка, чтобы определить форму дефекта и его глубину (рисунок 4) при перемещении датчика-преобразователя прибора по линиям или по узлам пересечения линий.



а)



б)

Рисунок 4 – а - пример нанесения сетки на область дефекта; б – импульс, соответствующий дефекту структуры (характерная дефектограмма, имеющая сложную структуру, содержащую три фрагмента отраженного (выделены красными линиями)

В случае обнаружения дефекта дефектоскоп просигнализирует выводом на экран изображения импульса отраженного сигнала (рисунок 3, б).

Основные параметры проведения дефектоскопии: усиление 0,5 - 40 децибелл, полоса сигнала 50 кГц, задержка 2 мс, шаг сканирования 6,0. Отмечаются три сигнала, соответствующие: первый – отражению от дефектности поверхностного слоя (ламинирования), второй – отражению от дефекта первого слоя лейнера, третий – от расслоения в лейнере.

Полученные результаты позволяют выявить наличие расслоений и магистральных трещин силовой композитной оболочки (рисунок 5), для дальнейшего анализа и определения возможности устранения этих дефектов.

а	а	а	б	б	б	а	а	б	б	а	а	а	б	а	б	б
а	б	в	в	в	г	в	д	а	а	а	а	б	в	в	б	а
а	а	а	б	б	б	г	а	б	а	а	б	г	б	г	г	а
б	а	а	б	а	а	д	г	б	а	б	б	д	г	б	б	б
б	б	б	б	б	а	д	а	б	б	б	а	а	б	б	б	б
а	а	б	б	б	б	б	б	д	а	а	а	б	д	б	б	б
д	б	в	г	г	б	г	а	а	а	д	а	б	а	а	а	б
а	а	а	а	а	а	а	в	а	а	а	а	г	а	а	б	б

Рисунок 5 – Схема расположения расслоений в ламинате (синие области) и трещин, заходящих в область полимербетона (красные области) силовой оболочки емкости: а – уровень сигнала на границе области вспучивания; б – уровень сигнала оболочки в области вспучивания; в, г – уровень сигнала области трещины в ламинате силовой оболочки; дислокация области трещины за пределами ламината

Заключение. Смоделирован в программе Solidworks пример нагружения композитной оболочки, определена возможная причина

разрушения материала. На основании исследования дефектности структуры оболочки с помощью акустического дефектоскопа AD-60K, установлено наличие расслоений и трещин в слое ламината и внутренних слоях сетчатого стеклопластикового лейнера. Сделан вывод, что акустический дефектоскоп может использоваться для контроля качества и обнаружения дефектов как при производстве композитных емкостей, так и при их эксплуатации.

Список литературы

1. Воробей В.В., Маркин В.Б. Основы технологии и проектирование корпусов ракетных двигателей. – Новосибирск: Наука, 2003. – 164 с.

2. Воробей В.В. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций / В.В. Воробей, В.Б. Маркин. – Новосибирск: Наука, 2006. – 190 с.

© Садиков У.А., Шмеер В.А., 2017

ПРОЕКТИРОВНИЕ ОБЛИЦОВОЧНОЙ ПЛИТКИ НА ОСНОВЕ РЕЧНОГО ПЕСКА И СВЯЗУЮЩЕГО

С. С. Сафрайдер, Е. А. Головина

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

Аннотация: *Отделочные материалы – это материалы, которые применяют для наружной и внутренней отделки и облицовки зданий и сооружений. Раньше для облицовки строительных объектов традиционно использовался ограниченный круг материалов: штукатурные растворы, краски, лаки, древесина, природный камень и керамика. Применение облицовочных плиток вызвано несколькими причинами: облицовочные работы несут защитные, санитарно-гигиенические и декоративные функции конструктивных элементов зданий и сооружений.*

Ключевые слова: гиперпрессование, эпоксидное связующее, речной песок, облицовочная плитка, проектируемый материал.

Облицовочная плитка является отделочным материалом, функции которого обозначают следующим образом: эстетическая, так как используется для оборудования помещений, и техническая, поскольку она представляет собой стройматериал, способный, не ломаясь и не теряя своих изначальных качеств, противостоять различным воздействиям среды [4].

Плитка – это пластины различного формата и относительно небольшой толщины, изготовленные из керамики, стекла, природного камня и др. [1].

Облицовочные работы несут защитные, санитарно-гигиенические и декоративные функции конструктивных элементов зданий и сооружений [3].

Плитка применяется в самых разнообразных условиях. Она может выдерживать довольно большие нагрузки. В зависимости от условий эксплуатации виды плиток бывают: по условиям выполнения – на наружные и внутренние; по расположению конструкций – на горизонтальные и вертикальные [3].

Наиболее важными техническими параметрами, является следующие: водопоглощение; размер и внешний вид; механические характеристики; износостойкость; устойчивость агрессивным воздействием веществ; морозоустойчивость.

Геометрические размеры облицовочной плитки. Проектируемая плитка будет иметь размеры, указанные на рисунке 1.

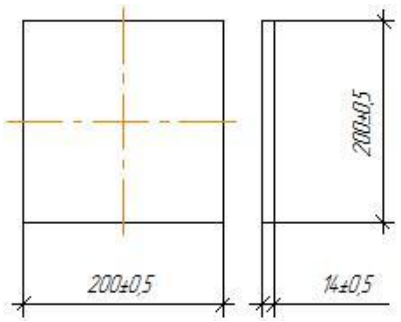


Рисунок 1 – Геометрические размеры облицовочной плитки

Для оценки характеристик бу-

дущего изделия, изготовлены образцы на прессе «Револьвер GT-20» по компонентному составу, указанному в таблице 1.

Таблица 1 – Состав смеси образцов

Исходные компоненты	Состав смеси образца			
	1	2	3	4
Смола ЭД-22, г	48,8	31,1	61,6	-
Полиэфирная смола ПН-1, г	-	-	-	60,2
Отвердитель ПЭПА, г	5,4	3,5	6,2	-
Отвердитель М-50, г	-	-	-	1,8
Инициатор (гипериз), г	-	-	-	6,1
Растворитель (ацетон), г	29,8	14,8	14,9	-
Фракция 0,6 мм (песок), г	435,0	478,5	625,5	-
Фракция 0,25 мм (песок), г	186,0	204,6	268,9	262,1
Фракция 0,05мм (силикат глыба), г	19,3	21,3	24,03	46,1
Фракция 1 мм (известняк), г	-	-	-	609,5

Определение гранулометрического состава песка ситовым методом. Ситовой анализ – один из методов определения гранулометрического состава порошков и сыпучих материалов. Метод заключается в механическом разделении материала на фракции с частицами определенной крупности: ячейки сита с размерами от 1,0 до 0,063 мм. Просеяли песок и силикат глыбу и получили нужные фракции для испытаний.

Продолжительность ручного сухого просева зависит от плотности, размеров и формы частиц, от объема просеиваемого материала, интенсивности просева, размеров отверстий сита, площади закупоренных отверстий сит и влажности воздуха. В случае тонких сит (0,04…0,06 мм) время просева достигает 60…120 мин. При расчете плотности упаковки и пустот использовали ступенчатый подбор фракций (метод Фурнаса).

В итоге получили три фракции d_1=0,6 мкм; d_2=0,25 мкм и d_3=0,05 мкм. Смешав фракции в расчетных соотношениях, получили максимальную долю твердой фазы в наполненной композиции: наполнителя 87 % и по объему пустот оценили количество связующего 13 %.

Определение теплопроводности высоконаполненных образцов осуществлялось с помощью устройства ИТС-1, предназначенного для измерения теплопроводности и теплового сопротивления строительных и теплоизоляционных материалов методом стационарного теплового потока в соответствии с ГОСТ 7076-99, данные представлены на рисунке 2.

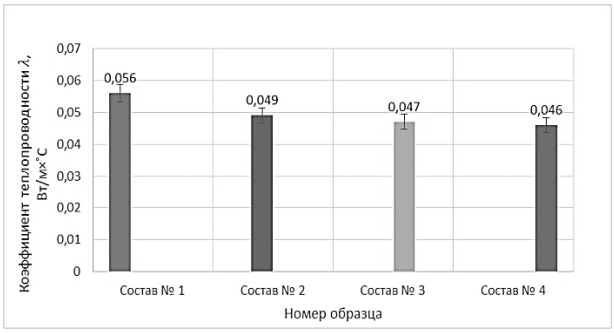


Рисунок 2 – Зависимость теплопроводности (λ) от состава смеси образца

По результатам испытаний можно сделать вывод, что при со-

ставе смеси номер 1, теплопроводность материала увеличивается, а при составах 2, 3 и 4 теплопроводность уменьшается.

При определении водопоглощения при полном погружении образца в воду, влажности, плотности, предела прочности, морозостойкости использовался ГОСТ 27180-2001.

Водопоглощение. Получили значения водопоглощения при полном погружении проектируемого материала $Wп_1$ = 1,8 %; $Wп_2$ = 4,4 %; $Wп_3$ = 3,9 %; $W_{п(ср)}$ = 3,6 % (рисунок 3).

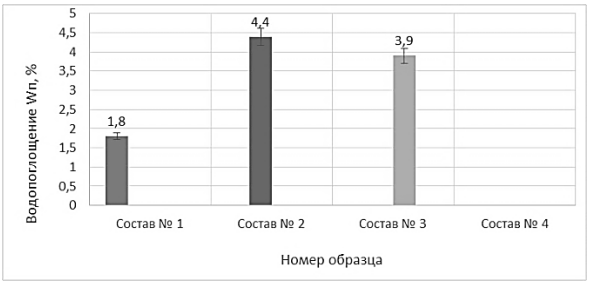


Рисунок 3 – Зависимость водопоглощения ($W_п$) испытуемого образца от его состава смеси

При анализе результатов испытаний на водопоглощение, можно сделать следующий вывод: проницаемость влаги должна быть не более 3…5 % и составы смеси 1, 2, 4 водопоглощение не превышает допустимых значений. В составе образца номер 4 содержится полиэфирная смола и известняк, после 24 часов выдержки в воде произошло его полное разрушение образца (он рассыпался).

Влажность. Влажность образцов равна: W_1 = 1,7 %; W_2 = 3,8 %; W_3 = 3,9 %; $W_{ср}$ = 3,1 %.

Плотность. Получили значения плотности для проектируемого материала ρ_1 = 1,63 кг/м^3; ρ_2 = 1,69 кг/м^3; ρ_3 = 1,42 кг/м^3; $\rho_{ср}$ = 1,58 кг/м^3.

Определение предела прочности образцов на сжатие при Т=23 ^{o}С и после испытания в климатической камере. Испытания на сжатие проводились на машине марки 3369 фирмы Instron. Для оценки образцов на морозостойкость использовалась климатическая камера СМ-60/100 ТХ (ТХВ). Испытания проводились в восемь циклов, температура цикла задана от +50 до -40 ^{o}С.

Для анализа предела прочности построили гистограмму (рисунок 4).

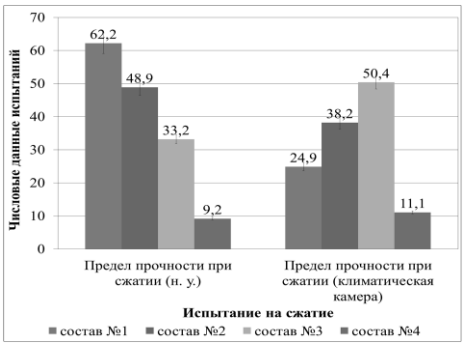


Рисунок 4 – Зависимость предела прочности от состава смеси образца

Проанализировав зависимость предела прочности от составов смеси образцов, можно сделать вывод, что 1 состав достигает максимума, а при составах 2, 3, 4 предел прочности снижается при нормальных условиях. При воздействии цикличности температур и повышенной влажности в климатической камере хорошо проявил себя состав 3. На результаты могли повлиять:

упаковка частиц в момент гиперпрессования, содержание растворителя, неравномерное смачивание частиц малых количеством связующего условия отверждения композиции.

Выводы. По результатам проведенных испытаний, на образцах различного состава выявлен оптимальный компонентный состав, который удовлетворяет требованиям к изготовлению облицовочной плитки. Оптимальным составом для производства служит состав № 2, который имеет следующие характеристики: коэффициент теплопроводности λ=0,049 Вт/(м× ˚С); предел прочности при сжатии $\sigma_в^-$ =48,9 МПа; предел прочности при сжатии после циклических температурных испытаний $\sigma_в^-$ =38,2 МПа; водопоглощение *W*п=4,4 %

Список литературы:

1. Гурьева, В.А. Проектирование производства изделий строительной керамики. – Оренбург: ОГУ, 2013. – 179 с.

2. Керамическая плитка. Состав, производство, основные характеристики: [сайт]. URL: http://www.kayros.biz/stati/keramicheskaya-plitka-sostav-proizvodstvo-osnovnye-harakteristiki.

3. Фурсов, В. В. Определение гранулометрического состава грунтов. – Томск: Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2007. – 21 с.

4. Керамическая плитка. Технология производства и предложения: [сайт] URL: http://bent.ru/modules/Articles/article.php?storyid=356.

5. Толмачев, С. Н. Структура и стойкость гиперпрессованных строительных изделий на основе местного сырья. – Харьков: Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, 2006. – 35 с.

© Сафрайдер С.С., Головина Е.А., 2017

МОДИФИКАЦИЯ ШПОНА ИНЖЕНЕРНОЙ ДОСКИ ЭЛАСТОМЕРОМ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ ЕЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ

С. А. Хапёрских, Е. А. Головина

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

Аннотация: *В последние годы можно наблюдать возрастающий интерес к улучшению качества пиломатериалов. Модификация шпона низковязким раствором на основе EPDM-каучука, как один методов улучшения эксплуатационных свойств инженерной доски до сих пор не проводилось, в связи с этим следует считать актуальной задачу исследования модифицированного шпона эластомером с последующим изготовлением из него инженерной доски.*

Ключевые слова: *шпон, инженерная доска, модификация, влагопоглощение, предел прочности, твердость, статический изгиб.*

В настоящее время основные проблемы совершенствования технологии изготовления инженерной доски направлены на повышение экологичности производственных процессов, а также на получение готового продукта с низкой токсичностью, повышенной долговечностью и с минимальной формоизменяемостью в условиях влажностно-температурных воздействий. Модификация верхнего слоя слоеной фанеры является важной стадией технологического процесса производства инженерной доски. Модифицированная древесина благодаря изменениям, произошедшим с ней на молекулярном уровне, приобретает такие уникальные свойства, как повышенная водооталкиваемость, низкая гигроскопичность, устойчивость к гниению и воздействию вредителей.

Древесина – классический пример конструкционного композиционного материала. В ней целлюлозные волокна являются силовым каркасом, а лигнин и полиозы – связующим. Классификация композитов основана на их матрице. Древесные волокнистые композиты – это материалы, полученные в результате объединения разного сырья. Основной компонент – дерево.

Рисунок 1 – Классификация древесно-волокнистых композитов (ДВК)

Инженерная доска производится согласно ГОСТ 862.1-85.

Рисунок 2 – Структура инженерной доски

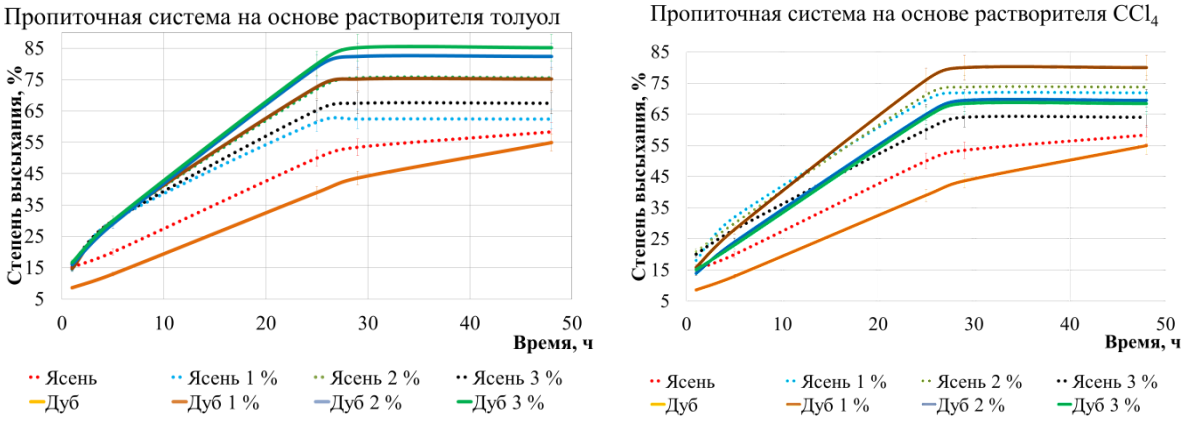
Как любое изделие она обладает достоинствами: выдерживает нагрузки до 15 МПа; выдерживает перепад температур от 50 до «минус» 15; остается стабильной при изменении температур, влажности помещения (40-60 %), химических воздействиях (использование чистящих средств), проходит циклевание до 7 раз; долговечна: средний срок службы 20 лет, максимальный – 40 лет и недостатками: нижний слой доски и пазы гидрофильны; недостаточная твердость на стыках (образование сколов); недостаточное сопротивление разрушению поверхностного слоя при растяжении в поперечном направлении и при изгибе; дороговизна.

Основываясь на требованиях к эксплуатации инженерной доски и ее составляющих, были предложены средства модификации шпона раствором эластомера на основе EPDM-каучука в толуоле и тетрахлорметане (CCl_4), которые бы смогли улучшить характеристики материала. В качестве основных пропиточных растворов были выбраны системы с концентрациями 1 %, 2 % и 3 % EPDM-каучука.

Испытания на водопоглощение проводились согласно ГОСТ 20800-75. По результатам эксперимента следует отметить, что влагопоглощение образцов шпона, пропитанных низковязким раствором EPDM-каучука в толуоле снизилось относительно стандартных образцов на 8-12 %, а в тетрахлорметане на 7-13% (рисунок 3 а, б).

Эксперимент на определение предела прочности при растяжении проводился согласно ГОСТ 20800-75. Образцы шпона исследовались на растяжение в продольном, поперечном направлениях, а также под углом в 45°.

Испытывая шпон вдоль волокон, была получена зависимость предела прочности шпона ясеня и дуба от концентрации пропиточного раствора на основе эластомера, данные которой представлены на рисунках 4 и 5.



а б

Рисунок 3 – Водопоглощение и сушка шпона после модификации

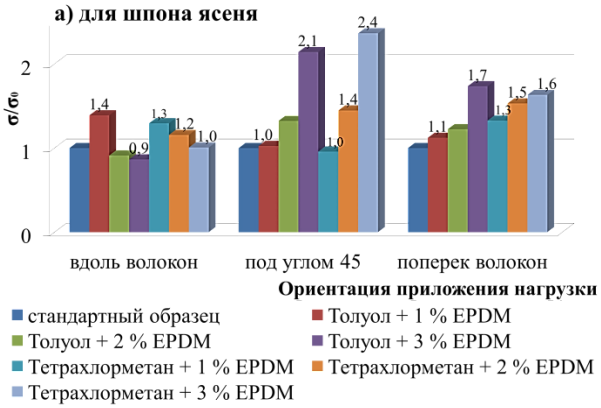


Рисунок 4 – Зависимость относительного предела прочности на растяжении образцов ясеневого от концентрации пропиточного раствора на основе EPDM-каучука

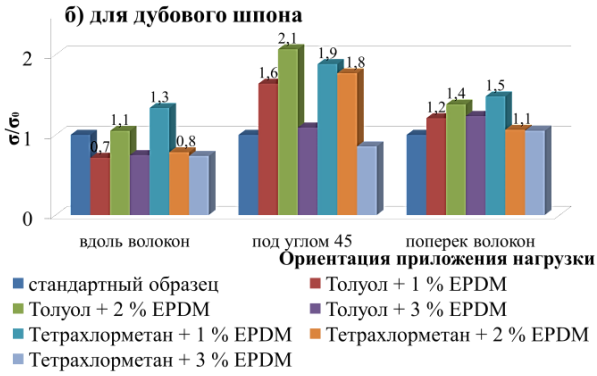


Рисунок 5 – Зависимость относительного предела прочности на растяжение образцов дубового шпона от концентрации пропиточного раствора на основе EPDM-каучука

Таким образом, максимальная прочность исследуемых образцов ясеня при растяжении вдоль волокон получена при концентрация раствора 1%; при максимальном относительном удлинении – 2,7%. Вместе с тем произошло увеличение предела прочности шпона в сравнении с контрольными образцами для ясеня на 29-39 %, а для дуба на 4-33 %.

Эксперимент на растяжение шпона с расположением волокон под углом 45 °С проводился аналогичным образом, как и для шпона вдоль волокон. Максимальный предел прочности на растяжение получен при концентрация раствора 2%; при максимальном относительном удлинении – 1,1%. Рост показателя составил для ясеня на 2,5-37 %, для дуба в 2,1 раза.

Испытывая образцы поперек волокон, максимальных результатов достигли при концентрации EPDM-каучука 2 % в толуоле.

Описывая экспериментально метод определения на прочность шпона, представим зависимость значений твердости по методу Роквелла от концентрации пропиточного раствора эластомера, в котором растворителем является толуол (рисунок 6) и тетрахлорметан (рисунок 7).

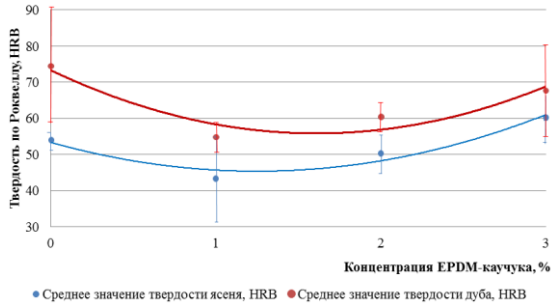


Рисунок 6 – Зависимость значений твердости шпона по методу Роквелла от концентрации EPDM-каучука (растворитель – толуол)

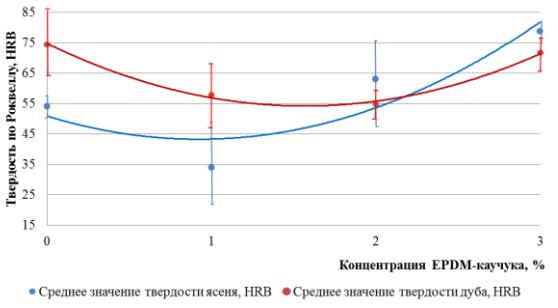


Рисунок 7 – Зависимость значений твердости шпона по методу Роквелла от концентрации EPDM-каучука (растворитель – тетрахлорметан)

Данные рисунка 6 свидетельствуют об увеличении показателя только для ясеня, пропитанного 3 % раствором эластомера в толуоле на 13 % и в тетрахлорметане на 17 % при 2 % эластомера. Для дуба показатели снижены относительно стандартного образца.

Для дубового шпона показатели твердости возрастают с повышением концентрации каучука в эластомере, но они являются недостаточными по сравнению со стандартным образцом.

Таким образом, применение пропиточной системы на основе EPDM-каучука с растворителем толуол актуально только для ясеня при минимальной концентрации 3 %, а с тетратхлорметаном – для ясеня при концентрации 2-3 %. Вместе с тем, если целью модификации шпона служит только повышение твердости поверхности, то дубовый шпон не применим для данных пропиточных систем.

Проведено исследование на определение предела прочности при трехточечном изгибе, при этом использовалась клеевая композиция на основе эпоксидной смолы ЭД22 и отвердителя ПЭПА в отношении 100:12 соответственно.

Основные результаты испытаний на статический изгиб (при постоянной скорости нагружения образцов равной 2 мм/мин, влажности 31 % и температуре 24 ^{o}C) образцов шпона в составе клеевой композиции из фанеры марки ФК Е1 представлены на рисунке 8.

Стандартные образцы шпона имеют низкое значение изгибающего напряжения при максимальной нагрузке относительно образцов, пропитанных низковязким раствором эластомера, также как, деформация и модуль Юнга.

В целом, рост предела прочности для ясеня относительно стандартного образца в толуоле составил 20-33 %, а в тетрахлорметане – 30-36 %. Для дуба увеличение составило 10-19 % и 1-8 % в толуоле и тетрахлорметане соответственно.

Стоит отметить, что пропорционально изгибающему напряжению для каждой из концентраций пропиточной системы, претерпели увеличение деформация и модуль Юнга.

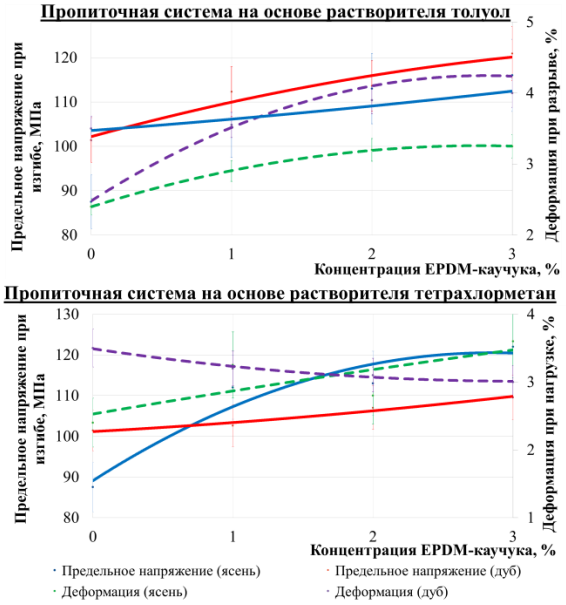


Рисунок 8 – Зависимость предела прочности при статическом изгибе от концентрации пропиточной системы

Максимальное увеличение предела прочности приходится на шпон ясеня при использовании растворителя тетрахлорметан. Дуб, в свою очередь, менее подвержен модификации.

Из приведенного анализа видно, что модификация шпона эластомером на основе EPDM-каучука значительно снижает водопоглощение, повышает предел прочности при растяжении, повышает твердость при определенных концентрациях раствора пропитки. Именно поэтому, применение низковязкого раствора позволит расширить применение инженерной доски, в том числе и для влажных помещений, и для конструкций, испытывающих нагрузки.

Список литературы:

1. Хапёрских С.А. Способы снижения водопоглощения лущеного дубового шпона / С.А. Хапёрских, Е.А. Головина // Горизонты образования: материалы 13 Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь – 2016» Алт. гос. техн. ун-т, АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2016. – Выпуск 18. – С. 63-68. – Режим доступа: http://edu.secna.ru/media/f/new_material_tez_2016.pdf.

2. Хапёрских С.А. Влияние эластомера на водопоглощение шпона / С.А. Хапёрских, Е.А. Головина // Горизонты образования: материалы 13 Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь – 2016» Алт. гос. техн. ун-т, АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – Барнаул, 2016. – Выпуск 18. – С. 96-100. – Режим доступа: http://edu.secna.ru/media/f/new_material_tez_2016.pdf.

3. Хапёрских С.А. Модификация ясеневого шпона посредством снижения его гидрофильности / С.А. Хапёрских, Е.А. Головина //

Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности 2016 / Бийский технологический институт. – Бийск, 2016. – С. 123-128.

4. Хапёрских С.А. Исследование влияния модификация шпона эластомером на предел прочности при растяжении / С.А. Хапёрских, Е.А. Головина // Ползуновский вестник. – 2017. – №1 – С. 106-110.

5. Хапёрских С.А. Упрочнение лущеного шпона посредством его пропитки эластомером / С.А. Хапёрских, Е.А. Головина // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности 2017. – Бийск : Бийский технологический институт, 2017. – С. 123-128.

6. Хапёрских С.А. Исследование предела прочности дркевесноволокнистого композита при трехточечном изгибе / С.А. Хапёрских, Е.А. Головина // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности 2017. – Бийск : Бийский технологический институт, 2017. – С. 128-132.

7. Хапёрских С.А. Влияние модификации лущеного шпона эластомером на твердость композиционного материала / С.А. Хапёрских, Е.А. Головина // Горизонты образования: материалы 14 Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь – 2017». – Барнаул : Алт. гос. техн. ун-т, АлтГТУ им. И.И. Ползунова, 2017. – Выпуск 19. – С. 60-65. – Режим доступа: http://edu. secna.ru/publication/5/release/147/attachment/39.

© Хапёрских С.А., Головина Е.А., 2017

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДИФИКАЦИИ ПОЛИПРОПИЛЕНА ЧАСТИЦАМИ ТАЛЬКА

И. С. Шахурина, Е. А. Головина

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

Аннотация: *Основой технического прогресса в настоящее время в важнейших областях промышленности: автомобилестроении, авиации, приборостроении, машиностроении, электронике, строительстве, производстве современных предметов быта и прочего, безусловно, являются синтетические полимерные материалы. Лидирующее положение среди них занимают пластмассы, получаемые на основе термопластичных полимеров – полиолефинов.*

Ключевые слова: *композиционный материал, полипропилен, модификация, дисперсный наполнитель, тальк, степень наполнения, проектируемый материал.*

Полиолефины являются наиболее доступными и востребованными из всего ассортимента выпускаемых промышленностью полимеров. Поэтому поиск технических решений, направленных на упрощение переработки полиолефинов и создание новых типов композиционных материалов на их основе, – является актуальной задачей.

Одним из способов улучшения механических свойств полиолефинов является введение наполнителей, часто показывающих высокую эффективность при относительно невысоком содержании в композиционном материале, что позволяет рассчитывать на значительную экономическую целесообразность такого подхода.

Объектом исследования в данной работе является композиционный материал на основе полипропилен марки PP H030 GP наполненного микрочастицами талька серии «Супер» марки МИТАЛ® 96 с различной степенью наполнения: 15 %, 20 %, 30 %, 40 %.

Оценка предела прочности при растяжении. Была проведена серия опытов образцов с разной степенью наполнения полипропилена тальком. Определение прочности материала при растяжении проводилось по стандарту ГОСТ 11262-80 на испытательной машине марки 3369 фирмы Instron. По полученным данным были построен график зависимости (рисунок 1).

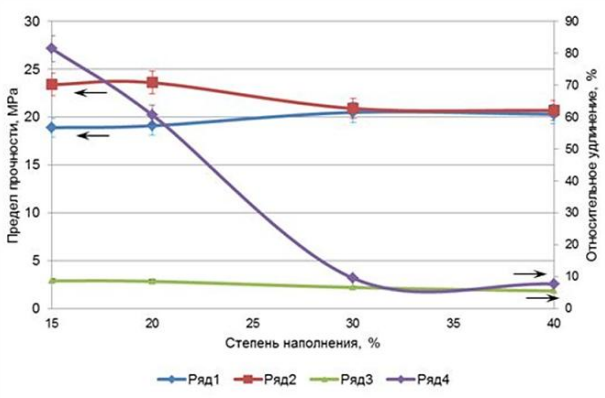


Рисунок 1 – Зависимости предела прочности и относительного удлинения от степени наполнения от степени наполнения, где ряд 1 – предел прочности при разрыве от степени наполнения,

ряд 2 – предел прочности при растяжении от степени наполнения, ряд 3 – относительное удлинение при максимальной нагрузке от степени наполнения, ряд 4 – относительное удлинение при разрыве от степени наполнения

Из анализа графика следует, что при малых степенях наполнения и малых размерах частиц (до 0,1 мкм), дисперснонаполненные системы можно отнести к дисперсноупрочненным. Частицы, введенные в матрицу, служат барьером для распространения линейных дислокаций, тем самым упрочняя материал. Так же, можно сказать, что при высокой степени наполнения в системе могут возникать кластерные структуры линейного кольцевого кластерного типа, поэтому при разрушении образца требуется дополнительная энергия для того, чтобы разрушить и эти агломераты. Поэтому наблюдается увеличение предела прочности при разрыве при высокой степени наполнения.

С увеличением степени наполнения значение относительного удлинения при разрыве уменьшается, а относительное удлинения при максимальной нагрузке остается практически неизменным.

Качественный анализ стандартных образцов и образцов, наполненных тальком с различным процентом наполнения показал, что предел прочности снизился: разрушающее напряжение при растяжении ненаполненного полипропилена равно 30–32 МПа, а после наполнения – 20–23 МПа.

Это говорит о том, что концентрация талька 15–40 % не обеспечивает повышения разрывной прочности, следовательно, есть смысл провести подобное испытание образцов со степенью наполнения до 15 %.

Можно сделать вывод, что данные степени наполнения позволяют не только удешевить получаемый композиционный материал, но и увеличить жесткость и уменьшить усадку.

Влияние степени наполнения тальком на ударную вязкость. Была проведена серия опытов образцов с разной степенью наполнения полипропилена тальком. В ходе испытаний образцы № 1 и № 2 со степенью наполнения 15 % и 20 % соответственно не разрушились при нормальных условиях испытания, поэтому было принято решение подвергнуть эти образцы температурному воздействию. Для этого образцы были выдерживались в климатической камере при температуре минус 30 °С. По полученным данным был построен график зависимости (рисунок 2).

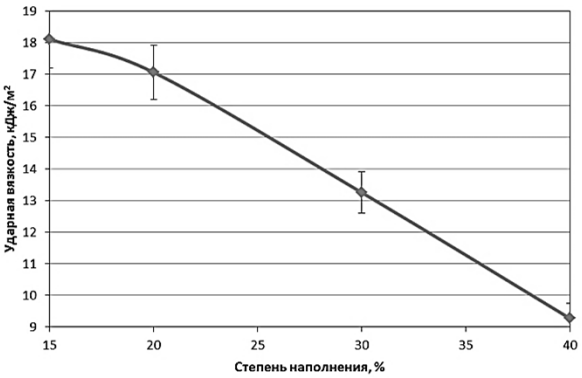


Рисунок 2 – Зависимость ударной вязкости от степени наполнения

С повышением степени наполнения значение ударной вязкости уменьшается. Таким образом, добавление талька в полипропилен снижает ударную прочность при нормальных условиях испытания в образцах со степенью наполнения 30 % и 40 %, следовательно, образцы с 15 % и 20 % наполнением являются более ударопрочными.

Влияние модификации полипропилена тальком на показатель текучести расплава. Исходя из условий определения показателя текучести расплава термопластов, приведенных в Приложении 1 ГОСТ 11645-73, испытания проводились при температуре равной 180 °С; время прогрева – 240 с, способ отсечения отрезков автоматический, интервал между отсечениями 10 с.

Показатель текучести расплава термопластов ПТР $_{(T,\ P)}$ в г/10 мин вычисляется с точностью до двух значащих цифр:

$$\text{ПТР}_{T,P} = \frac{t \cdot m}{\tau},$$

где Т – температура испытания, К (°С); Р – нагрузка, Н; t – стандартное время, с; m – средняя масса экструдируемых отрезков, г; τ – интервал времени между двумя последовательными отсечениями отрезков, с.

Была проведена серия опытов: № 1 – ненаполненный полипропилен, № 2 – полипропилен с 15 % наполнением, № 3 – полипропилен с 30 % наполнением, № 4 – полипропилен с 40 % наполнением. Экструдируемые отрезки полипропилена в каждой серии взвешивались индивидуально, затем проводилась статистическая обработка результатов (средние массы $m_{ср}$ и ПТР). Относительная погрешность не превышала 3-4% (рисунок 3).

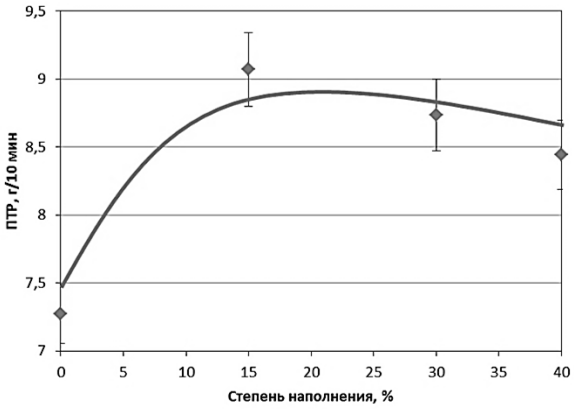


Рисунок 3 – Зависимость показателя текучести расплава полипропилена от степени наполнения его микрочастицами талька

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что для данного компонентного состава показатель текучести расплава монотонно возрастает до степени наполнения тальком 15 %, а дальнейшее наполнение приводит к снижению этой технологической характеристики. Следовательно, можно предположить, что введение слоистого наполнителя приводит к снижению вязкости композиции, это происходит именно благодаря хлопьевидному строению талька:

– повышается размерная стабильность (поскольку он ориентируется вдоль линий течения при формовании);

– уменьшается проницаемость;

– укорачивается цикл литья под давлением благодаря нуклеации.

Соответственно тальконаполненный полипропилен в зависимости от степени наполнения и показателя текучести расплава можно использовать для производства различных видов изделий, получаемых как экструзией, так и литьем под давлением.

Выводы. В ходе экспериментальной оценки эффективности модификации полипропилена частицами талька на механические и реологические свойства были получены следующие результаты: предел прочности снизился: разрушающее напряжение при растяжении ненаполненного полипропилена равно 30–32 МПа, а после наполнения – 20–23 МПа. Это говорит о том, что концентрация талька 15–40 % не обеспечивает повышения разрывной прочности, следовательно, есть смысл провести подобное испытание образцов со степенью наполнения до 15 %;
с повышением степени наполнения значение ударной вязкости уменьшается. Таким образом, добавление талька в полипропилен снижает ударную прочность при нормальных условиях испытания в образцах со степенью наполнения 30 % и 40 %, следовательно, образцы с 15 % и 20 % наполнением являются более ударопрочными; для данного компонентного состава показатель текучести расплава монотонно возрастает до степени наполнения тальком 15 %, а дальнейшее наполнение приводит к снижению этой технологической характеристики. Следовательно, можно предположить, что введение слоистого наполнителя приводит к снижению вязкости композиции, это происходит именно благодаря чешуйчатому (хлопьевидному) строению талька.

Список литературы:

1. Крыжановский, В.К. Технические свойства полимерных материалов [Текст] / В.К. Крыжановский, В.В. Бурлов, А.Д. Паниматченко, Ю.В. Крыжановская. – СПб.: Профессия, 2005. – 248 стр., ил.

2. Кац, Г.С. Наполнители для полимерных композиционных материалов [Текст]: справочное пособие / Г.С. Кац, Д.В. Милевски, пер. с англ. под ред. П.Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1981. – 735 с., ил.

3. Кербер, М.Л. Физические и химические процессы при переработке полимеров [Текст]: учебник для вузов / М.Л. Кербер, А.М. Буканов, С.И. Вольфсон и др. – СПб.: Научные основы и технологии, 2013. – 320 с.

4. ГОСТ 11262-80 «Пластмассы. Метод спытания на растяжение» [Электронный ресурс] // – Электрон.данные. Режим доступа: http://www.cad.dp.ua/gost/files/GOST11262-80. – Загл. с экрана.

© Шахурина И.С., Головина Е.А., 2017

РАДИОПРОЗРАЧНЫЕ ПАНЕЛИ ДЛЯ УКРЫТИЯ АНТЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ

В. А. Шмеер, В. Б. Маркин

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

Аннотация: *В наши дни современный театр боевых действий диктует всё новые требования к техническим характеристикам экипировке личного состава подразделений. Одной из таких требований является скрытность. В качестве средства позволяющего, незаметно для противника, передвигаться по полю можно назвать. В зависимости от применяемых материалов для их изготовления, различаются их маскирующие способности.*

Ключевые слова: *современные антенные комплексы, радиопрозрачный обтекатель антенны.*

Современные антенные комплексы нуждаются в изоляции антенного оборудования и излучателей от внешней среды, способной влиять на мощность и поляризацию электромагнитного излучения высокой частоты. В этом направлении хорошо зарекомендовали себя композиционные материалы на основе стеклянных волокон и полимерных связующих эпоксидной группы, способных кроме основных свойств радиопрозрачности, обладать характеристиками, позволяющими работать в жестких условиях механических и климатических воздействий [1]. За стеклопластиковыми обтекателями носовых частей самолетов и вертолетов скрываются антенны радарных устройств различного назначения, а наземные средства помещаются внутрь защитных сфер, выполненных также из стеклопластика (рисунок 1).

Для современных наземных антенных комплексов защитные покрытия из стеклопластика имеют довольно большую массу, поэтому требуют повышенной прочности конструкции. Имеются сведения о том, что такие защитные покрытия могут быть облегчены за счет применения сотового заполнителя [2].

В примере осуществления изобретения в виде 3-слойного РПУ с толщиной d=1 мм тонких слоев 1_1, 1_2 и высотой D=15 мм слоя-наполнителя 2 получены следующие электрические характеристики:

- эквивалентная диэлектрическая проницаемость тонких слоев ε_1=3,5;
- тангенс угла потерь тонких слоев $tg\delta_1$=0,01;
- эквивалентная диэлектрическая проницаемость слоя-наполнителя ε_2=1,08;
- тангенс угла потерь слоя-наполнителя $tg\delta_2$=0,0007.

Тонкостенные оболочечные конструкции широко используются в аэрокосмических аппаратах, объектах транспортного и химического машиностроения, строительных сооружениях. Обладая легкостью,

пространственная тонкостенная система – оболочка представляет собой исключительно жесткую конструктивную форму.

а

б

Рисунок 1 – Радиопрозрачный обтекатель антенны строевого истребителя Японии F-2 (а) и радиопрозрачное укрытие доплеровского метеорологического радиолокатора СССР (б)

Стремление получить конструкцию с наименьшей массой приводит к использованию подкрепленных оболочек, одним из видов которых является сотовое заполнение [3].

Структура сэндвич-панели, содержащей сотовый заполнитель, представлена на рисунке 2. Она представлена двумя несущими слоями (стеклопластик толщиной 0,5 мм) и сотовым заполнителем, выполненным из стеклоткани, пропитанной полиамидным связующим.

Применение конструкций такого типа требует обязательного анализа параметров напряженно-деформированного состояния, сопровождающего любое из внешних воздействий. К таким воздействиям в реальных условиях можно отнести ветровую нагрузку, ударное сосредоточенное усилие, изменение температуры и пр. Для расчета применяются классические методы строительной механики композитных конструкций [4,5], а также различные программные продукты, среди которых можно отметить пакет SolidWorks.

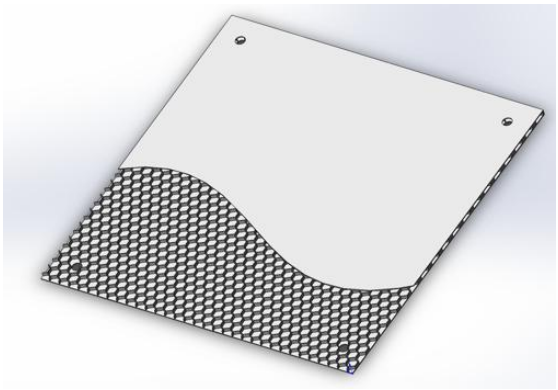


Рисунок 2 – Схема структуры сэндвич–панели

Модуль SolidWorks позволяет осуществлять анализ прочности, жесткости, устойчивости и выносливости изделий широкого спектра сложности и назначения. Математическим аппаратом SolidWorks Simulation является метод конечных элементов, основная идея которого состоит в том, что любую

непрерывную величину, такую как температуру и перемещение, можно аппроксимировать дискретной моделью, строящейся на множестве кусочно-непрерывных функций, определенных на конечном числе подобластей. Кусочно-непрерывные функции определяются с помощью значений непрерывной величины в конечном числе точек рассматриваемой области. Нами был применен этот модуль для расчета параметров напряженно-деформированного состояния двух видов стеклопластиковых панелей: сплошной стеклопластик и стеклопластик с сотовым заполнителем.

Для расчета были выбраны идентичными размеры фрагмента панели, материал (стеклопластик) для сплошной панели и несущих слоев сэндвич-панели, способы их закрепления, а также вид и величина внешнего воздействия. На рисунке 3 представлен внешний вид квадратного фрагмента панелей, расчет которых проведен в модуле SolidWorks на действие ветровой (распределенной) нагрузки, соответствующей максимальной скорости ветра 50 м/с.

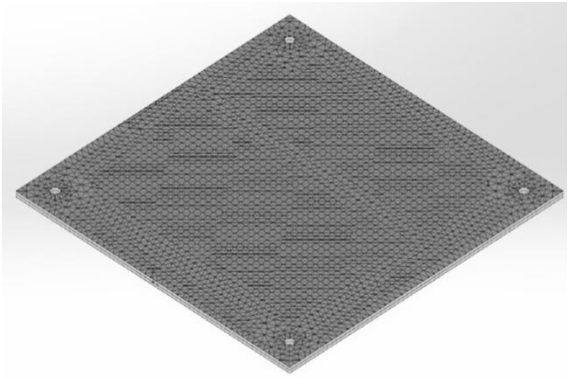


Рисунок 3 – Вид поверхности фрагмента панели

В таблицах 1 и 2 приведены основные физико-механические свойства материалов двух типов панелей.

Таблица 1 – Физико-механические характеристики используемых пластиков

Предел текучести, N/m^2	Предел прочности при сжатии, N/m^2	Модуль упругости, N/m^2	Коэффициент Пуассона	Массовая плотность kg/m^3	Модуль сдвига N/m^2
$6.5\cdot10^8$	$3.2\cdot10^8$	$6\cdot10^{10}$	0.32	1850	$4\cdot10^9$

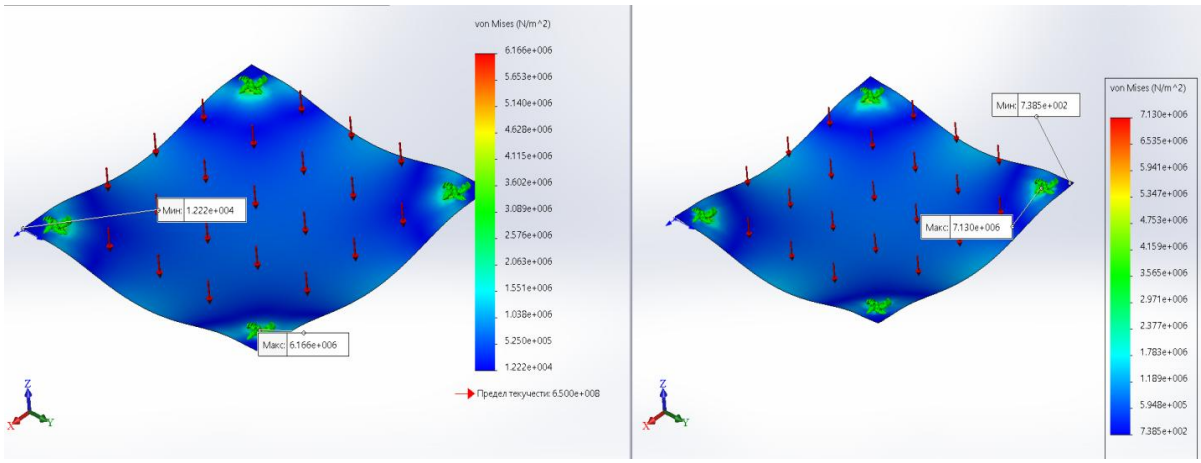
Таблица 2 – Физико-механические характеристики панели с сотовым заполнителем

Предел текучести, N/m^2	Модуль упругости Ex, N/m^2	Модуль упругости Ey, N/m^2	Модуль упругости Ez, N/m^2	Массовая плотность, kg/m^3	Модуль сдвига Gxy, N/m^2	Модуль сдвига Gyz, N/m^2	Модуль сдвига Gxz, N/m^2
$2.19\cdot10^8$	$2.58\cdot10^6$	$2.58\cdot10^6$	$2.19\cdot10^8$	100	$6{,}26\cdot10^4$	$4.59\cdot10^7$	$4.59\cdot10^7$

В результате расчета получены следующие значения сил реакции в местах крепления панелей, представленных в таблице 3, а на рисунках 4-7 показаны распределения напряжений и деформаций в панелях под действием распределенной ветровой нагрузки.

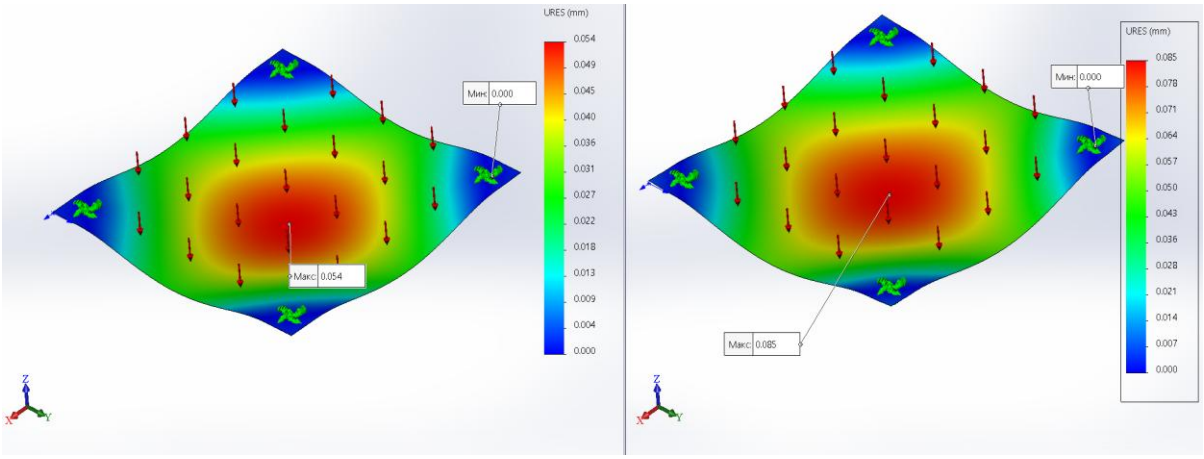
Таблица 3 – Силы реакции панелей в местах крепления на ветровую нагрузку

Компоненты	X	Y	Z	Результирующая
Сила реакции (сплошной стеклопластик), N	$1.5 \cdot 10^{-12}$	$2.6 \cdot 10^{-12}$	97.75	97.75
Сила реакции (пластик с сотовым заполнителем), N	$-3.3 \cdot 10^{-12}$	$2.17 \cdot 10^{-13}$	97.75	97.75



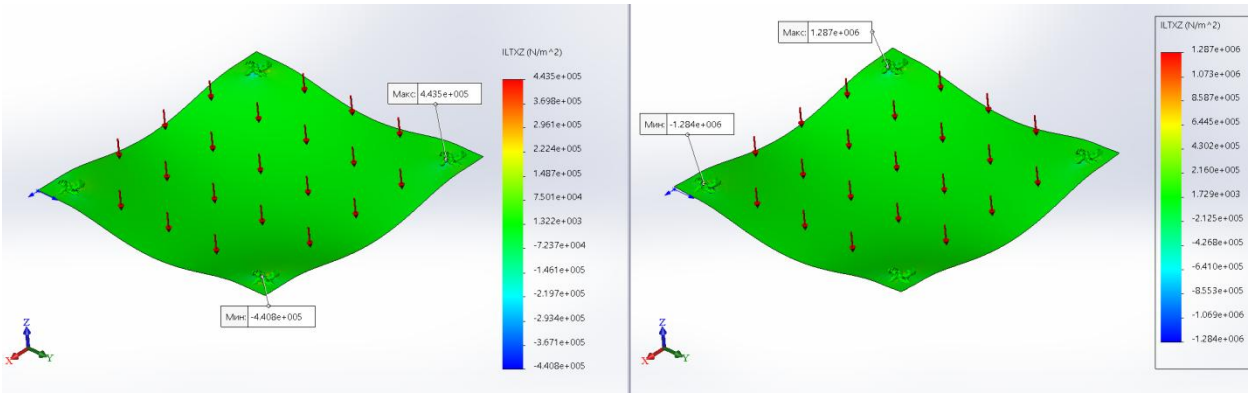
а б

Рисунок 4 – Распределение напряжений в панелях при действии ветровой нагрузки: а - сплошной стеклопластик; б - пластик с сотовым заполнителем.



а б

Рисунок 5 – Распределение результирующих перемещений в панелях при действии ветровой нагрузки: а - сплошной стеклопластик; б - пластик с сотовым заполнителем



а б

Рисунок 6 – Распределение напряжений межслоевого сдвига в плоскости XZ: а - сплошной стеклопластик; б - пластик с сотовым заполнением

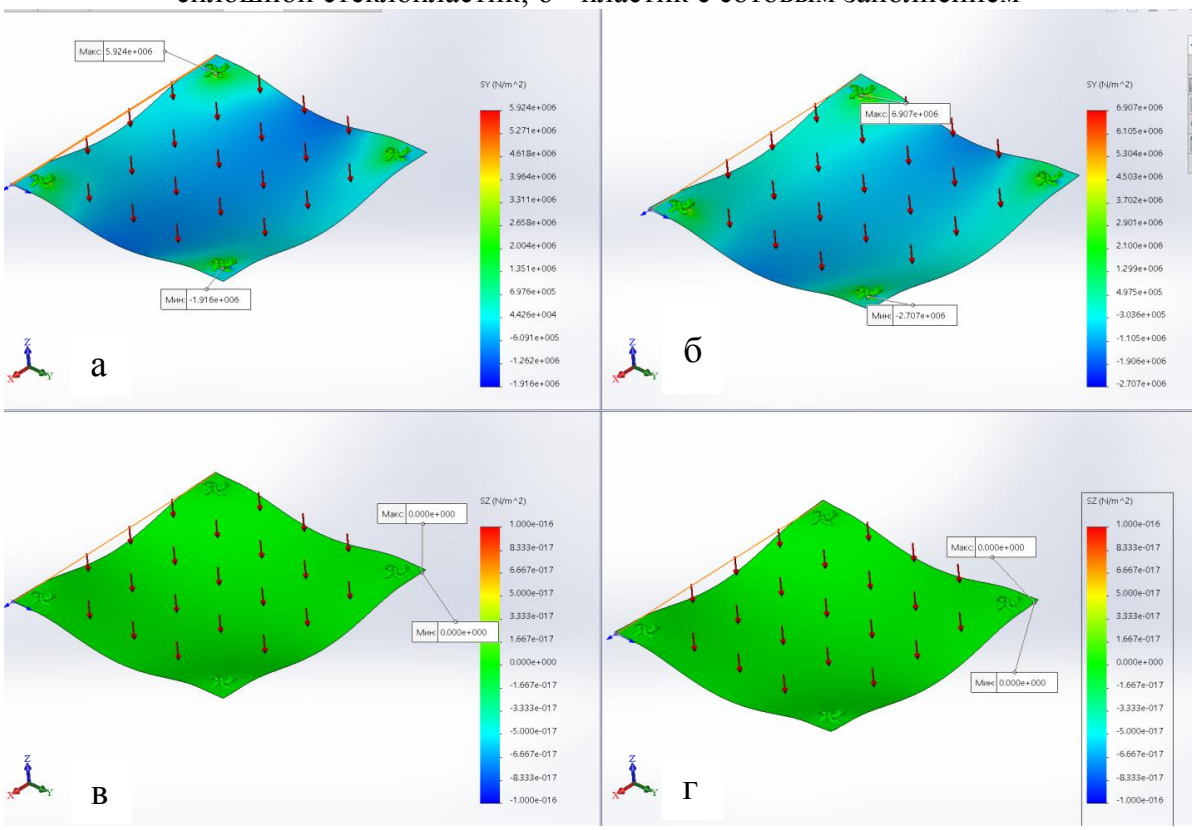


Рисунок 7 – Распределение нормальных напряжений в панелях при действии ветровой нагрузки: σ_x – в сплошном стеклопластике (а) и в пластике с сотовым заполнителем (б); σ_z – в сплошном пластике (в) и в пластике с сотовым заполнителем (г)

Таким образом, проведенные в модуле SolidWorks расчеты панелей из стеклопластика и стеклопластика с сотовым заполнителем показали, что при действии ветровой нагрузки основные показатели напряженно-деформированного состояния остаются практически на одном уровне, определяющем целостность конструкции. С учетом того, что массы панелей отличаются более чем в 4 раза (при учете разницы количества слоев стеклопластика в панелях), показана целе-

сообразность разработки и создания конструкций для панелей защитных укрытий антенных устройств радиолокаторов из стеклопластика с сотовым заполнителем.

Список литературы.

1. Голубцов М. Е., Клишин А. Н., Литун В. И. и др. Особенности проектирования и изготовления защитных укрытий антенн - в журнале Наука и образование (МГТУ им. Н.Э. Баумана) (электронный журнал), № 06 DOI.

2. Гращенко Ю.Г., Малютин Е.В., Виниченко Ю.П., Туманская А.Е. http://www.findpatent.ru/patent/231/2314609.html.

3. Композиционные материалы: Справочник / В.В. Васильев, В.Д. Протасов, В.В. Болотин и др.; под общ. ред. В.В. Васильева. Ю.М. Тарнапольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.

4. Маркин В.Б. Строительная механика композитных конструкций: учебное пособие – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2004. – 180 с.

5. Маркин В.Б. Оптимальное проектирование конструкций из композиционных материалов: учебное пособие / В.Б. Маркин; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2016. – 144 с.

© Шмеер В.А., Маркин В.Б., 2017

ПРЕИМУЩЕСТВА ПОЛИЭТИЛЕНОВЫХ ТРУБ ДЛЯ ВОДОСНАБЖЕНИЯ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ПУТЕМ ЭКСТРУЗИИ

М. В. Костицына, Е. А. Головина

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

Аннотация: *Бурное развитие органической химии привело к появлению труб из полимерных материалов. Важнейшее их преимущество перед металлическими трубами в том, что они не подвержены коррозии. Трубы из полимерных материалов можно назвать трубами XXI века. Они являются детищем своего времени, так как вобрали в себя все преимущества ранее известных труб и приобрели совершенно новые качества, которые делают их действительно современными. Основные параметры и требования к полимерным трубам регламентируются нормативно-технической документацией.*

Ключевые слова: *полиэтилен низкого давления (ПНД).*

В последние годы трубы из полиэтилена высокой плотности, он же полиэтилен низкого давления (ПНД), постепенно приходят на смену стальным и чугунным трубопроводам: полиэтилен обладает высокой степенью связанности между молекулами структурной сетки, что повышает его износоустойчивость, он не ржавеет, не гниет, невосприимчив к блуждающим токам и является одним из самых инертных материалов, проще в эксплуатации, по прочности не уступают аналогам из металла. При нагреве он принимает любую форму, пластичен и позволяет выпускать продукцию с предсказуемыми свойствами. Срок эксплуатации стальных труб – до 25 лет, но по факту их приходится менять каждые 6-8 лет. Полимерные служат не менее 50-ти лет, что доказано на практике (эксперты дают до 100 лет), транспортировка проста из-за небольшого веса, их монтаж гораздо дешевле и требует совсем немного времени, трубы устойчивы к гидроударам и экологически безопасны.

Рисунок 1 – Трубы водонапорные ПЭ 80

Производство труб ПНД – не загрязняет окружающую среду, не отличается трудоемкостью и длительностью. Не требует большого числа квалифицированного персонала. В среднем для одной технологической линии полного цикла, по производству полиэтиленовых труб ПНД, требуется 100 квадратных метров производственной площади.

Трубы из полиэтилена низкого давления применяются в легкой и тяжелой промышленности. Широко используются на пищевых, химических, нефтегазовых и медицинских производствах и, конечно, приме-

няются в хозяйственно – бытовых нуждах.

Основные марки полиэтиленовых труб, применяющихся для водопроводов, газопроводов и канализации – это ПЭ 63, ПЭ 80 и ПЭ 100. Отличие состоит в марке полиэтилена, из которого они изготовляются (гранулированный полупрозрачный бесцветный полимер, имеющий высокую степень кристалличности, высокие физико-механические свойства, стойкость к образованию и развитию усталостных трещин, твердость, хорошие антифрикционные свойства, высокую теплостойкость и хорошие диэлектрические показатели).

Трубы ПНД марок ПЭ 80 и ПЭ 100 – это абсолютно новые материалы, обладающие значительно более высокими характеристиками по сравнению с ПЭ 63. Используемый материал более прочный, выдерживает давление 16 атм (вместо 10 атм для материала ПЭ 63). Вместе с тем, у полиэтилена ПЭ 80 параметры прочности, пластичности и устойчивости к внешним факторам ниже, чем у ПЭ 100 (особенности молекулярной структуры).

Полиэтилен ПЭ-100 даёт следующие возможности:

- Плотность - 954 кг/м3, высота этого показателя позволяет изготавливать из ПЭ-100 особенно прочные изделия, выдерживающие значительные нагрузки;
- Температура плавления – 130 ºС;
- Температура хрупкости – - 60 ºС;
- Предел прочности внутреннего растяжения – 1000 часов (для ПЭ-80 это всего 700 часов);
- Материал является отличным диэлектриком;
- Обладает стойкостью к растрескиванию и царапинам,
- Стоек к радиационным излучениям;
- Химически и биологически инертен;
- Не пропускает жидкости и газы;
- Срок его службы при соблюдении стандартных условий эксплуатации может превышать 60-80 лет.
- Соединение полиэтиленовых труб осуществляют всеми видами сварки, т.к. материал труб в отличие от всех остальных полимерных материалов хорошо сваривается, обуславливая образование однородного материала. При испытании на внутреннее давление разрыв трубы, как правило, не происходит по месту сварки.

Технологическая основа процесса производства труб ПНД – экструзия.

Технология производства заключается в гомогенизации, контролируемом расплавлении и размягчении (пластикации) полимерного сырья в экструдере. Затем следует формирование готового изделия с помощью рабочей головки экструдера (фильеры), дальнейшее охлаждение и окончательная калибровка.

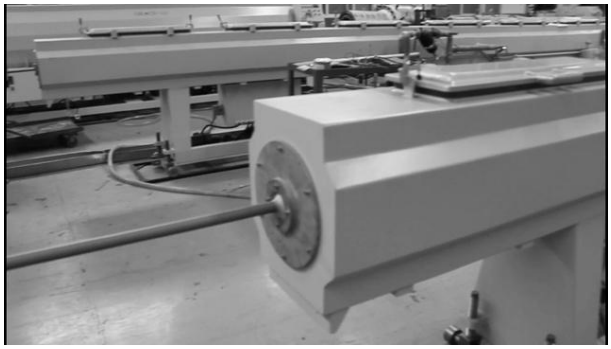


Рисунок 2 – Линия по производству труб (экструдер)

Производство труб ПНД начинается с загрузки гранулированного сырья в приемный бункер экструдера, откуда оно попадает в оснащенный нагревательными элементами рабочий цилиндр. Перемещаясь от зоны загрузки, сырье последовательно проходит к более горячим секциям цилиндра. Соответственно, различают три рабочих зоны цилиндра экструдера: зона подачи, зона пластификации полиэтилена, где происходит сжатие, гомогенизация и расплавление гранул сырья и зона выталкивания (метеринг-зона), где расплав окончательно гомогенизируется, сглаживаются пульсации подачи расплава, перед его непосредственным выходом в формующую головку (фильеру).

Форму готовой продукции определяет фильера. Качественная формовка обеспечивается благодаря различным конструкционным решениям. В общем виде, технология производства полимерных изделий требует, что бы при прохождении расплава, фильера имела фиксированную температуру. В зависимости от конструкции фильер применяются плоские или патронные нагревательные элементы. При прохождении внешней матрицы и формообразующего дорна заготовка уже приобретает вид готовой продукции. Далее, в процессе калибровки, заготовка попадает в вакуумную ванну, где окончательная формировка трубы происходит в результате давления, прижимающего заготовку к калибровочной форме.

После этого, чтобы готовое изделие не деформировалось, пройдя камеру охлаждения труба попадает на конвейер ленточного или гусеничного типа, как правило, оборудованный пневматическими зажимами траков.

Заключительный этап производства полиэтиленовых труб – стандартная нарезка и укладка труб в бухты. Для этого, в зависимости от диаметра и толщины стенок труб, используются гильотинные резаки или дисковые пилы.

Таким образом, получение напорных труб для водоснабжения путем экструзии является более выгодным вариантом.

Основные преимущества:

1. затраты на транспортировку ПНД труб для водоснабжения в два раза меньше, чем на транспортировку стальных;

2. масса ПЭ трубы для водопровода более чем в 8 раз меньше массы металлических аналогов;

3. стоимость выполнения строительно-монтажных работ даже при использовании традицион-

ных открытых методов сокращается до 2–2,5 раз;

4. большая эластичность, что позволяет легко вписывать их в повороты трассы;

5. возможность использования щадящих методов прокладки, сокращающих расходы на монтаж, а также уменьшающих отрицательное воздействие на окружающую среду;

6. значительное сокращение сроков ведения работ – скорость прокладки полиэтиленовых сетей может превышать скорость прокладки стального эквивалента до 10 раз и более;

7. труба водопроводная полиэтиленовая обладает высокой антикоррозийной стойкостью ко всем минеральным кислотам, стойкость к щелочам, что позволяет отказаться от изоляции, не требует устройства систем электрохимической защиты;

8. полиэтиленовые трубы для водопровода обладают большей пропускной способностью (до 10–15% выше, чем у стальных) вследствие высокой гладкости;

9. отсутствие необходимости применения дорогостоящих методов проверки и контроля качества сварных соединений.

Список литературы:

1. ГОСТ 18599-2001. Трубы напорные из полиэтилена. – Минск, 2001.

2. «Трубопласт-А» [электронный ресурс] URL: http://truboplast-a.ru/?page_id=2.

© Костицына М.В., Головина Е.А., 2017

УДК 620.22–419.8:621.642.17

КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ИЗДЕЛИЯХ СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНИКИ

В. Б. Маркин, М. В. Маркин

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

Аннотация: *В современной технике нашли широкое применение изделия, представляющие собой емкости (баллоны) высокого давления, к которым предъявляются высокие требования по прочности, герметичности и весовому совершенству. Одно из главных требований, определяющих эти конструкции, связано с минимизацией веса и обязательного безосколочного действия в случаях механического разрушения. В конструкциях летательных аппаратов такие изделия применяют в качестве баллонов сжатого газа, газовых аккумуляторов, топливных баков или прямо- и криволинейных трубопроводов, системах пневмоавтоматики, наддува, терморегулирования, управления и жизнеобеспечения. Баллоны давления нашли широкое применение в наземном транспорте, в частности, для газобаллонных автомобилей, а также в дыхательных аппаратах, переносимых на спине человека (для служб МЧС, подводного плавания и т. п.).*

Ключевые слова: *баллон давления, прочность, герметичность, весовое совершенство.*

Перспективным направлением науки и техники XXI века по праву считается сфера высоких технологий, базирующаяся на современном материаловедении. Нельзя представить технический прогресс без расширения класса конструкционных материалов, которые, как правило, появляются в результате исследований, проводимых учеными-материаловедами на различных уровнях: макро-, микро-, мезо-, и нано. Совокупность фундаментальных и прикладных исследований позволяет решать сложные материаловедческие проблемы, приводить их на уровень разработки и инновационного внедрения технологических решений. Результатом таких исследований можно считать новые рецептуры высококачественных сталей, новые технологии создания композиционных материалов и покрытий, успехи медицинской техники, электроники и компьютерной техники. Особенно хотелось бы остановиться на проблемах материаловедения, возникающих при подготовке новой техники, поскольку значимость этого направления особенно явно проявилась в авиационной, ракетной и ракетно-космической отраслях промышленности. Как выяснилось, перечень требований, предъявляемых здесь к конструкционным материалам, оказался достаточно широк, поэтому большинство традиционных материалов, известных в 50-60-е годы, могли им соответствовать только частично. Самыми «модными» становились удельные характеристики, т.е. отнесенные к значениям плотности. Это было связано с необходимостью снижения веса конструкции при сохранении необ-

ходимых прочностных характеристик и жесткости. И такие материалы появились. Они получили название композиционных, т.е. сложных, материалов. Сложных потому, что состоят как минимум из двух компонентов или фаз, имеющих явно выраженную границу раздела, но получающие при этом свойства, отличающие их от свойств составляющих материалов.

Объем производства композитов в промышленно развитых странах увеличивается с каждым годом и многие ученые считают, что XXI век станет веком композитных материалов. Появление таких материалов как углепластики, органопластики и боропластики существенно расширило объемы применения композитов в летательных аппаратах, стеклопластиковые конструкции получили существенный задел в «приземленных» областях техники [1].

Изделия из композиционных материалов изготавливаются в основном методом намотки нитей или жгутов и лент из стеклянных, органических или углеродных волокнистых материалов. Получение конструкций методом намотки явилось подлинным прогрессом в технологии производства изделий из полимерных композиционных материалов. Это закономерно, поскольку метод заключает в себе огромные возможности совершенствования, многие из которых уже реализованы сегодня.

Намотка – это технологический процесс, при котором непрерывный армирующий наполнитель в виде нитей, лент, жгутов и тканей пропитывается полимерным связующим, подается на оправку, имеющую конфигурацию внутренней поверхности изделия, и укладывается на её поверхность в заданном направлении. После получения необходимой схемы армирования, заданной структуры и толщины материала производится отверждение изделия и удаление оправки. В некоторых случаях оправка может быть элементом данной конструкции, например, герметизирующей оболочкой. Такой способ изготовления изделий из композиционных материалов имеет ряд преимуществ. Важнейшие из них связаны с наиболее полной реализацией в изделиях высокой прочности армирующих волокон на растяжение и возможностью обеспечения высокой степени автоматизации технологического процесса на станках с программным управлением.

Методом намотки изготавливаются изделия, имеющие форму тел вращения: баллоны давления, баки, корпуса ракетных двигателей, головные части, отсеки ракет, транспортно-пусковые контейнеры, корпуса подводных аппаратов, стволы орудий и корпуса снарядов, жидконаливные цистерны, трубопроводные магистрали, коробчатые шпангоуты, воздухозаборники самолётов, лопасти винтов вертолётов, различные профили, изогнутые трубы и т. д. [2].

Основным элементом перечисленных конструкций является

силовая оболочка. Структура материала стенки оболочки создаётся в результате намотки *n*-го количества слоев, которые образуют узор намотки или схему армирования оболочки (рисунок 1).

Наиболее эффективна укладка волокон и нитей в направлении действий главных напряжений, появляющихся в материале вследствие действий силовых нагрузок, а также, если эти волокна одинаково натянуты и прочно скреплены между собой. Одинаково натянутыми волокна оказываются лишь при намотке нитей на тела, имеющие выпуклую поверхность типа цилиндра, сферы, овалоида, изотенсоида, тора и других им подобных, называемых телами вращения.

Создание конструкций из композитных материалов неразрывно связано с созданием самого материала, параметры которого в основном зависят от относительного и абсолютного соотношения между волокнистым (армирующий наполнитель) и изотропным (полимерная матрица) компонентами и рисунка укладки волокнистого материала в структуре создаваемой конструкции. То есть, создание конструкций из волокнистых композиционных материалов неразрывно связано с одновременным созданием материала и технологии изготовления изделия. Причем технология изготовления конструкции существенно влияет как на механические и физические характеристики получаемого композиционного материала, так и на конструктивные параметры создаваемого изделия.

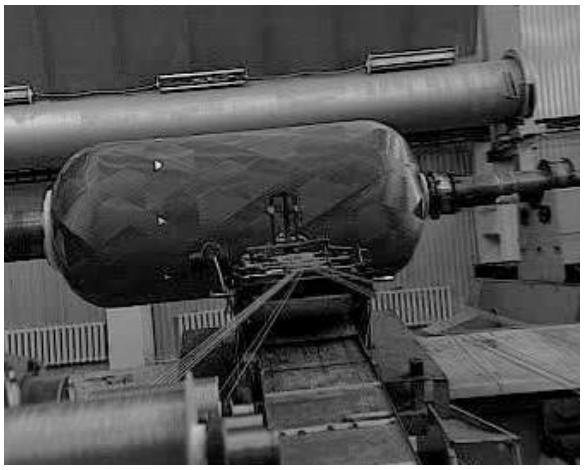


Рисунок 1 – Процесс намотки композитного баллона давления, при котором образуется специфический узор жгутов на поверхности оправки

Основными параметрами, определяющими свойства полимерных композиционных материалов (ПКМ), в соответствии с законом аддитивности, являются характеристики компонентов и объемное содержание $V_в$ волокон в композите:

$$\sigma_{\text{к}} = V_{\text{в}}\sigma_{\text{в}} + \ 1 - V_{\text{в}} \ \sigma_{\text{св}}^{*}. \qquad (1)$$

Здесь $\sigma_к$, $\sigma_в$, $\sigma^*_{св}$ – прочности композита, волокна и связующего соответственно.

Объемное содержание волокон в полимерном композите всегда меньше массового содержания вследствие наличия пор и воздушных включений в материале. Соотношение между объемным и массовым содержанием волокон определяется выражением (2)

$$V_{\text{в}}^{\text{об}} = \frac{V_{\text{в}}^{\text{мас}}}{V_{\text{в}}^{\text{мас}} + \ 1 - V_{\text{в}}^{\text{мас}} \ \rho_{\text{св}}\rho_{\text{в}}}, \qquad (2)$$

где $\rho_{св}\rho_в$ – плотность связую-

щего и волокна, соответственно.

Предельные значения коэффициента армирования зависят от геометрии упаковки волокон. Так, для круглых волокон в зависимости от схемы их упаковки (рисунок 2) предельные значения $V_в^{опт}$ = 0,907 (гексагональная укладка), $V_в^{опт}$ = 0,785 (тетрагональная укладка). Другое ограничение связано с выбором минимального значения толщины прослойки связующего между волокнами.

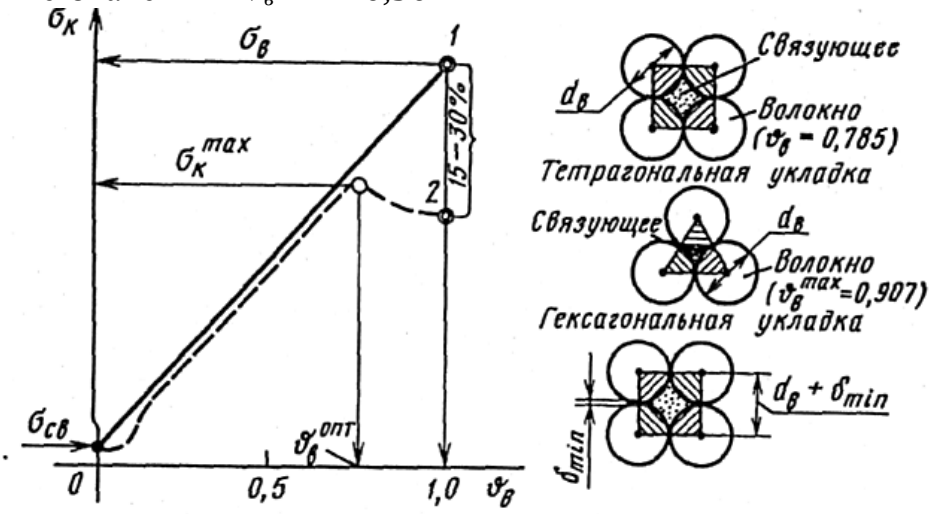


Рисунок 2 – Качественная зависимость прочности ПКМ от коэффициента армирования: 1 – теоретический предел прочности ПКМ; 2 – практический предел прочности ПКМ

Как известно [3], для каждого вида армирующего волокнистого наполнителя существует оптимальное, с точки зрения прочности формируемого композиционного материала, процентное содержание его в единице объема. Для большей части применяемых при намотке наполнителей оптимальное содержание составляет примерно 50...70 %.

Изменение этого технологического параметра неизбежно приводит к снижению прочности материала. В свою очередь объемное содержание армирующих нитей в изделии зависит от многих параметров процесса получения намоточной ленты: вязкости полимерного связующего, скорости протягивания нитей через пропиточную ванну, количества и плотности упаковки одновременно пропитываемых волокон, а также их способности к смачиванию данным типом связующего.

Изготовление нитевых конструкций стало возможным после создания намоточных станков с программным управлением. Автоматизированная непрерывная укладка (намотка) лент, прядей, жгутов армирующего материала обеспечивает при большой промышленной производительности максимальную реализацию прочностных и физических свойств используемых материалов в создаваемых изделиях промышленного назначения [4]. На рисунке 3 пока-

зан процесс намотки композитного баллона давления на четырехкоординатном станке, обладающем четырьмя степенями свободы механизмов, управляющих намоткой армирующего волокна.

Как уже отмечалось выше, при работе станка в общем случае для реализации укладки армирующих нитей или волокон по некоторым заданным траекториям на оправках с поверхностями общего вида используют следующие движения его исполнительных органов:

- вращательное движение оправки (характеризуется угловой координатой $\pm\xi$);
- поступательно-возвратное движение центра раскладочной головки вдоль оси вращения оправки (характеризуется координатой $\pm x$);
- поступательно-возвратное движение центра раскладочной головки в плоскости, перпендикулярной оси вращения оправки (характеризуется координатой $\pm y$);
- поступательно-возвратное движение центра раскладочной головки в плоскости, перпендикулярной оси вращения оправки (характеризуется координатой $\pm z$);
- поворот раскладочной головки относительно оси y (характеризуется угловой координатой $\pm a$);
- поворот раскладочной головки относительно оси z (характеризуется угловой координатой $\pm\beta$).

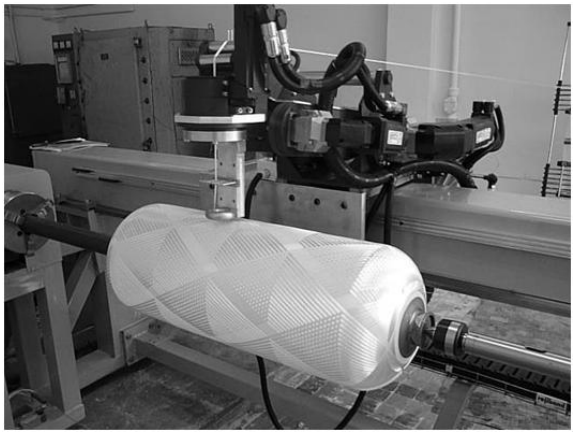


Рисунок 3 – Процесс намотки композитного баллона давления на четырехкоординатном станке

Определение точек траектории укладки нитей на поверхности **оправки** по некоторому закону изменения угла армирования $\varphi = \varphi(x)$ сводится к следующему алгоритму, вытекающему из геометрических соображений (рисунок 4):

$$r d\xi = ds_1 sin\varphi; \quad (3)$$

$$ds = ds_1 cos\varphi = (1 + r'^2)^{1/2} dx; \quad (4)$$

$$d\xi = \frac{(1+r'^2)^{1/2} tg\varphi}{x} dx; \quad (5)$$

$$ds_1 = \frac{(1+r'^2)^{1/2} tg\varphi}{cos\varphi} dx. \quad (6)$$

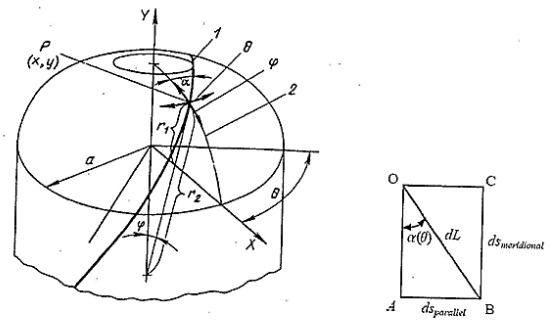


Рисунок 4 – Определение точек траектории укладки нитей на оправку

Уравнения (3)-(6) позволяют после интегрирования получить си-

стему уравнений, управляющих намоткой и позволяющих составить программу для исполнительных органов намоточного оборудования:

$$x = \int_0^s \frac{cos\phi}{(1+r'^2)^{1/2}} ds_1, \quad (7)$$

$$r = \int_0^s \frac{r'cos\phi}{(1+r'^2)^{1/2}} ds_1, \quad (8)$$

$$\xi = \int_0^s \frac{sin\varphi}{r} ds_1. \quad (9)$$

Для реализации движения исполнительных органов намоточного станка необходимо наличие предварительной информации, получаемой расчетным путем по вышеприведенным зависимостям с учетом геометрических, статических и других ограничений, накладываемых на будущую траекторию укладываемых нитей на заданной поверхности.

Для построения расчетной программы задается форма поверхности, на которой производится намотка нити. Форма поверхности может задаваться в произвольном виде: аналитически или в виде числового массива (таблично). Причем, форма может быть задана в любой системе координат, связанной с частью рассматриваемой поверхности. В конечном итоге задание формы приводится к некому числовому массиву.

Последующим этапом работы программы является подпрограмма аппроксимации, полученной в виде матричного задания, формы образующей с использованием известных интерполяционных процедур, например, по методу Лагранжа или с использованием кубических сплайнов. В качестве контроля программа должна выдавать сравнение заданной формы с ее интерполяционным вариантом описания.

В настоящее время одной из наиболее распространенных программ, реализующих алгоритм расчета траекторий намотки, является программный комплекс CADWIN. Данный комплекс представлен в удобном для пользователя интерфейсе и позволяет получать графическое отображение настройки и процесса намотки армирующей ленты на оправку (рисунок 5).

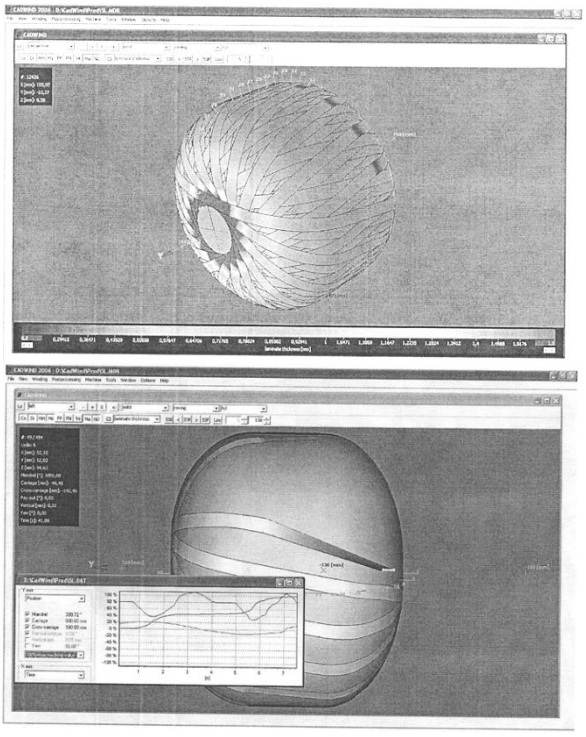


Рисунок 5 – Графическое отображение в программе CADWIN настройки и процесса намотки ленты на оправку

Приведенные выше соображения позволили провести расчет, изготовление и испытание металлокомпозитных баллонов давления,

предназначенных для хранения и транспортировки сжатых до высокого давления газов. В баллонах такого типа внутренняя герметизирующая оболочка (лейнер) выполняется из металла (нержавеющая сталь, алюминий), а основную нагрузку несет композитная оболочка, выполняемая из стеклянных (баллон БК-7) или углеродных волокон (баллон БК-8) и эпоксидного связующего методом намотки. Данные по структуре этих баллонов и результаты их испытаний на разрушение приведены в таблице 1.

Результаты механических испытаний образцов баллонов БК-8 показали, что использование тонкостенных лейнеров (до 0,5 мм) и углеродных жгутов (типа Торнел Т-700) позволяют создать сверхлегкий баллон массой до 3,0 кг с теми же прочностными характеристиками, как и у стеклопластикового баллона БК-7, т.е. получить двойное снижение массы баллона. Технология изготовления сравниваемых баллонов является типовой и отличается используемыми армирующими материалами, но при этом применяется одно и то же эпоксидное связующее – ЭДУ (может применяться любое аналогичное).

Одной из приоритетных задач развития транспортной инфраструктуры в мире является так называемая «газомоторная революция», сущность которой заключается в переводе автомобильного транспорта с жидкого на газомоторное топливо. В России, например, предполагается к 2020 году перевести на газ половину общественного и коммунального транспорта городов-миллионников.

Таблица 1 – структура металлокомпозитных баллонов давления и результаты их разрушающих испытаний [5]

Тип баллона	Масса баллона, кг	Масса лейнера, кг	Рабочее давление, МПа	Число циклов нагружения при 690 МПа	Разрушающее давление, МПа
БК-7	5,93	2,86	29,4	5000	78,1
БК-7	6,02	3,09	29,4	5000	79,4
БК-8	2,86	1,45	29,4	5000	78,3
БК-8	2,91	1,49	29,4	5000	80,8

Причинами, способствующими активному внедрению газомоторного топлива, являются следующие его преимущества:

- уменьшение количество вредных выбросов в выхлопных газах в 10–15 раз (выбросы парниковых газов снижаются более чем на 25 %);
- сокращение затрат на моторное топливо, по сравнению с нефтепродуктами на 30–60 %, в зависимости от вида топлива;
- повышение безопасности (газ легче воздуха, и в случае утечки он тут же улетучивается, что значительно снижает риск возгорания);

- увеличение ресурса работы двигателя в 1,5–2,0 раза;
- положительный мировой опыт использования.

Реализация этого проекта невозможна без разработки и производства баллонов высокого давления, которые служат емкостями для хранения и транспортировки сжатых или сжиженных газов. Баллон давления должен обеспечивать безопасную эксплуатацию и удовлетворять требуемым прочностным характеристикам. При выборе материала и технологии изготовления таких изделий необходимо руководствоваться принципом оптимальности, в котором целевой функцией выступает минимизация массы баллона. Малый вес баллона позволяет увеличить грузоподъемность транспортного средства, сократить затраты на его транспортировку и экономить топливо непосредственно при его эксплуатации [6].

Баллоны давления для хранения сжатого природного газа можно изготавливать как из традиционных, так и из композиционных материалов, удельные характеристики которых представлены на рисунке 6.

Как видно из рисунка, композиционные материалы обдают более высокими значениями удельной прочности и удельной жесткости, по сравнению с металлами и сплавами. Это свидетельствует о том, что масса готового изделия, выполненного из композита, будет меньше в 2–5 раз, чем масса аналогичного металлического баллона. Это является важным фактором при выборе материалов для баллонов давления, применяемых в системах газомоторного топлива.

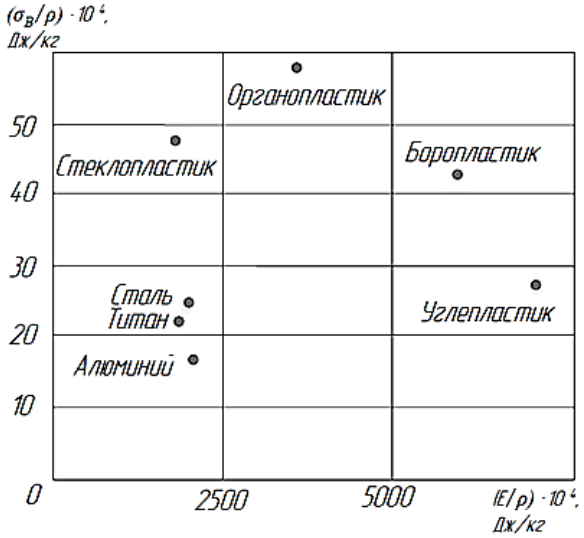


Рисунок 6 – Зависимость удельных характеристик конструкционных материалов, где $\sigma_в/\rho$ – удельная прочность, E/ρ – удельная жесткость

Таким образом, полимерные композиционные материалы находят все большее применение в современном машиностроении, способствуют значительному снижению металлоемкости и материалоемкости изделий и конструкций. Можно считать эти материалы материалами XXI века, соответствующими уровню пятого технологического уклада.

Список литературы:

1. Братухин А.Г., Сироткин О.С., Сабодаш П.Ф. Материалы будущего и их удивительные свойства. – М.: Машиностроение, 1995. – 128 с.

2. Буланов И.М., Воробей В.В. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов: учебник для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1998. – 516 с.

3. Воробей В.В., Маркин В.Б. Основы технологии и проектирование корпусов ракетных двигателей: монография / В.В. Воробей, В.Б. Маркин. – Новосибирск: Наука, 2003. – 164 с.

4. Воробей В.В. Контроль качества изготовления и технология ремонта композитных конструкций: монография / В.В. Воробей, В.Б. Маркин. – Новосибирск: Наука, 2006. – 190 с.

5. Воробей В.В. Основы проектирование и технология сверхлегких композитных баллонов высокого давления: монография / В.В. Воробей, В.Б. Маркин. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2014. – 166 с.

6. Маркин В.Б. Механика разрушения композитов с углеродным волокнистым наполнителем // Динамика стационарных трибосистем. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 1995. – С.19-24.

© Маркин В.Б., Маркин М.В., 2017

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОДИФИКАЦИИ СВЯЗУЮЩЕГО УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ НА СВОЙСТВА ОДНОНАПРАВЛЕННЫХ ОБРАЗЦОВ

К. И. Танкова, Е. С. Ананьева

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

Аннотация: *При армировании ПКМ высокомодульными волокнам из-за низкой вязкости разрушения эпоксидной матрицы, их прочностные характеристики могут реализовываться не полностью, что увеличивает материалоёмкость производства. Решение данной проблемы позволит создать материалы с более эффективной реализацией прочностных свойств армирующих элементов, тем самым получив материалы с более высокой прочностью и сроком эксплуатации.*

Ключевые слова: *армирование, углеродные нанотрубки, модификация, эпоксидная матрица.*

Структура определяет свойства материала. Одним из важнейших способов формирования структуры является модифицирование полимерной матрицы ультрадисперсными частицами.

В качестве основы в работе использовался Эпоксидиановый олигомер ЭД-22, отвердитель горячего отверждения изометилтетрагидрофталевый ангидрид (Изо-МТГФА), ускоритель УП-606/2, углеродное волокно УНК/5000, а так же углеродные нанотрубки TUBALL. На рисунке 1 изображена микрофотография углеродных нанотрубок «TUBALL™».

Технология изготовления образцов. Были изготовлены микропластики для испытания на разрыв, прямоугольные образцы чистого связующего для определения ударной вязкости и цилиндрические образцы для определения плотности связующего.

Из-за высокой поверхностной энергии и длины нанотрубки склонны к образованию крупных агломератов, которые являются концентраторами напряжений и снижают качество материала, поэтому после хранения и транспортировки производят механическое диспергирование материала в мешалке закрытого типа.

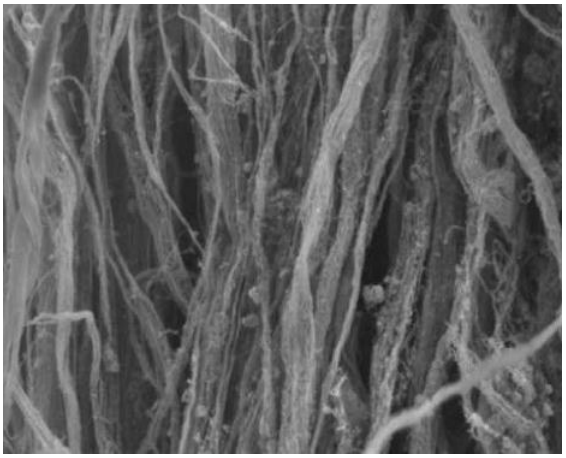


Рисунок 1 – Изображение растровой электронной микроскопии ультрадисперсного наполнителя «TUBALL™»[5]

Для удобства дозирования УНТ используется методика концентрированных мастербатчей. Материал вводится в среду с

наименьшей вязкостью (отвердитель). Для большего удобства дозирования и большей технологичности процесса готовится концентрированная суспензия отвердителя с массовый содержанием УНТ 1 %. Для уменьшения количества агломератов, образовавшихся после смешивания, производится ультразвуковая обработка мастербатча. После обработки концентрат разбавляется отвердителем до нужной концентрации и смешивается со смолой ЭД-22, которая предварительно была подогрета и дегазирована. Во время смешивания композиция насыщается воздухом, который необходимо удалить. Предварительно подогрев, смесь также дегазируют

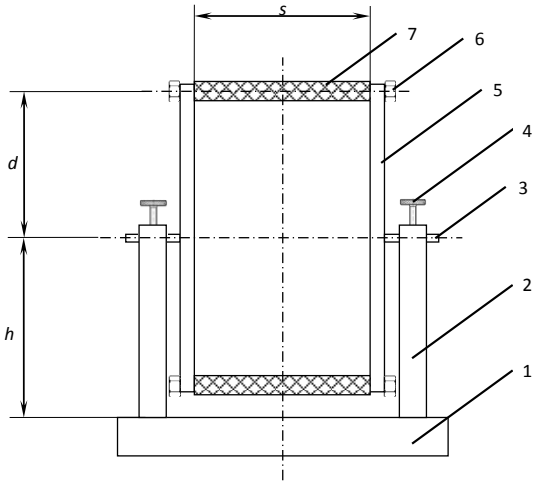


Рисунок 2 – Устройство для получения микропластиков, где 1 – станина; 2 – опора; 3 – ось вращения рамки; 4 – стопорный винт; 5 – рамка; 6 – гайка; 7 – фторопластовая втулка, s – ширина рамки; d – межосевое расстояние между осью вращения и осью фторопластовой втулкии; h – высота центра вращения рамки

Намотка сухого волокна производится на жёсткую оправку, с последующим натяжением до 50% от разрывной нагрузки. Волокно пропитывается связующим пенополиуретановой губкой, затем выставляется в печь при 60 °С на 15 минут. После прогрева с волокна убираются образовавшиеся капли излишков связующего. Связующее заливается в цилиндрическую и прямоугольные формы аккуратно, без образования пузырьков. Отверждение производится в 3 стадии:

I: T=80±2 °C, t=60 мин;

II: T=150±2 °C, t=90 мин;

III: T=180±2 °C, t=60 мин.

Для снятия остаточных напряжений после охлаждения образцов до комнатной температуры производится отжиг в печи в течение 1 часа при 180 °С, затем образцы кондиционируются при комнатной температуре 24 часа.

Цилиндрические образцы обрезают на токарном станке для придания им более точной формы.

Использование специальных накладок в зажимах испытательной машины не исключает выскальзывание тонких микропластиков при испытании, поэтому был разработан следующий способ закрепдения образцов:

В инсулиновые шприцы набирается перемешанная и дегазированная смесь смолы ЭД-22 с отвердителем холодного отверждения ТЭТА (Триэтилентетрамин) в соотношении 10:1, концы микропластика помещается в шприц, таким

образом, чтобы длинна свободного микропластика составляла 150 мм, образцы центрируются в шприцах и оставляется для отверждения на 16 часов, далее кондиционируется при нормальных условиях 24 часа.

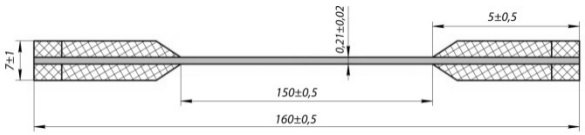


Рисунок 3 – Схематическое изображение приспособления для закрепления микропластиков в испытательной машине где a – толщина микропластика; b – длина шприца; d – диаметр шприца; l – длина рабочей части образца; l_1 – длина образца

Для определения напряжений в образце при испытании необходимо знать диаметр микропластиков. Был разработан аналитический метод определения условного диаметра образцов. Для этого микропластик принимается как условный цилиндр, и расчет сводится к определению условного диаметра:

$$d_{мк} = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{мк}}{\pi \cdot l_{мк}}} = 2\sqrt{\frac{V_{мк}}{\pi \cdot l_{мк}}}, \qquad (1)$$

где $V_{мк}$ – объем получаемого микропластика, мм^3; $d_{мк}$ – условный диаметр микропластика, мм, $l_{мк}$ – его длина.

Объем микропластика равен сумме объемов его компонентов – углеродного волокна и связующего (из-за малого наполнения ультрадисперсный наполнитель в расчет не принимается).

$$V_{мк} = V_{ув} + V_{св} = \frac{m_{ув}}{\rho_{ув}} + \frac{m_{св}}{\rho_{св}}, \qquad (2)$$

где $V_{ув}$ – объем углеродного волокна, мм^3; $m_{ув}$ – масса углеродного волокна, г.; $\rho_{ув}$ – плотность углеродного волокна, г/мм^3; $V_{св}, m_{св}, \rho_{св}$ – соответствующие характеристики связующего.

определение массового содержания связующего $\upsilon_{св}$, определяемое как разность между массой микропластика и массой углеродного волокна, отнесенная к массе микропластика:

$$\upsilon_{св} = \frac{m_{мк} - m_{ув}}{m_{мк}}, \qquad (3)$$

где $\upsilon_{св}$ – массовая доля связующего; $m_{мк}$ – масса полученного микропластика, г.; $m_{ув}$ – масса углеродного волокна в микропластике, г.

Массу углеродного волокна можно определить как произведение длины микропластика на линейную плотность углеродного волокна:

$$\upsilon_{св} = \frac{m_{мк} - T_{ф} \cdot l_{мк} \cdot 10^{-3}}{m_{мк}}, \qquad (4)$$

где $l_{мк}$ – длина полученного микропластика, м; $T_{ф}$ – линейная плотность углеродной нити, Текс (г/км).

Массу связующего и волокна можно рассчитать, используя известную массу микропластика и массовое содержание связующего.

$$V_{мк} = \frac{m_{мк} \cdot (1 - \upsilon_{св})}{\rho_{ув}} + \frac{m_{мк} \cdot \upsilon_{св}}{\rho_{св}}. \qquad (5)$$

Подставляя данное выражение в формулу В.15, получаем:

$$d_{мк} = 2\sqrt{\frac{m_{мк}}{\pi \cdot l_{мк}} \cdot \left(\frac{\upsilon_{св}}{\rho_{св}} + \frac{1-\upsilon_{св}}{\rho_{ув}} \right)}. \quad (6)$$

Через его объём выражен диаметр, который в уравнении 4 представлен, как сумма объёмов связующего и волокна. Используя массовое содержание связующего в микропластике, которые вычисляется по формуле 7, и плотность обоих компонентов, вычислим диаметр микропластика по формуле 5

Экспериментальное исследование

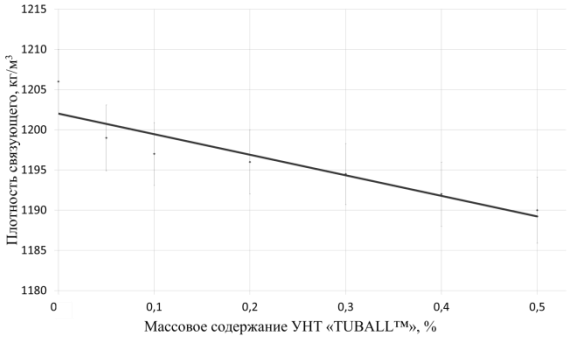


Рисунок 4 – Зависимость плотности связующего от содержания УНТ

На графике изображена зависимость плотности получившегося вязующего от содержания УНТ. Добавление УНТ в композицию теоритически не должно нести большого вклада в её плотность вследствие слишком малого содержания компонента(0,05–0,5%). Такое изменение плотности может быть объяснено тем, что при увеличении степени наполнения вязкость композиции возрастает, а значит усложняется перемешивание смеси и диспергирование. Это приводит к появлению в материале агломератов ультрадисперсных частиц, которые не могут заполниться связующим за счёт капиллярных эффектов и остаются заполненные воздухом.

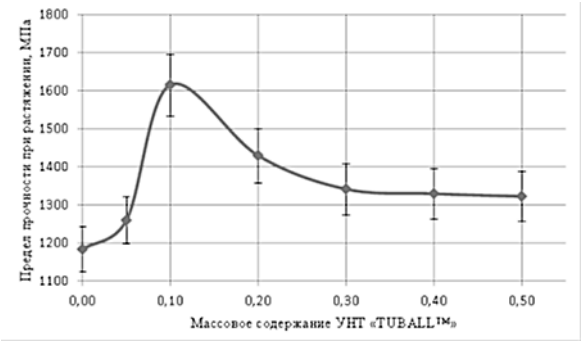


Рисунок 4 – Зависимость прочности микропластиков от содержания УНТ

Микропластик представляет собой тонкую комплексную нить, внутри которой связующее находится в плёночном состоянии, но большая часть матрицы находится снаружи жгута, ближайшие к волокну слои сильно ориентированы, они находятся под влиянием поверхностной энергии волокна. Этот слой оказывает влияние и на ближайшие к нему слои матрицы, но существует поверхностный слой, на который волокно не оказывает влияния, он сохраняет исходные свойства матрицы: а именно низкую вязкость разрушения и низкую трещиностойкость.

Таким образом, можно говорить, о том, что УНТ создают локальное объёмное ориентирование матрицы, замедляя распространение фронта трещин, меняя их направление, что увеличивает их длину и требуемую энергию на разрушение, тем самым увеличивая её прочность. Так же можно гово-

рить о дополнительном упрочнении однонаправленных образцов длинными нанотрубками, имеющими высокую разрывную прочность.

Эффективной является концентрация 0,10%, дальшейшее увеличение концентрации приводит к появлению агломератов, которые являются концентраторами напряжений. Данная модификация в количестве 0,10% может быть использована для изготовления однонаправленных ВПКМ конструкционного назначения (например, намоткой или пултрузией

Список литературы:

1. Кербер, М. Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология. – СПб.: Профессия, 2009. – 556 с.

2. Бартенев Г. М. Прочность и механизм разрушения полимеров. – М.: Химия, 1984. – 280 с.

3. Альфред М. П. Эпоксидные соединения и эпоксидные смолы: справочник по поксидным смолам: учебник. – М., 1962. – 964 с.

4. Нильсен, Л. Н. Механические свойства полимеров и полимерных композиций / пер. с англ. Л. Н. Нильсен. – М.: Химия, 1978. 312 с.

5. Сертификат Intertek: [сайт]: URL: http://ocsial.com/assets/ documents/OCSiAl_COA-W663-001_14_May_2014_.pdf.

© Танкова К. И., Ананьева Е. С., 2017

КДК 620.22 – 033.6 – 034

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЯ ДЛЯ ПОЗИТРОННЫХ МИШЕНЕЙ

А. Г. Никифоров, Ю. С. Евдокимова

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

Аннотация: *В электрон-позитронном ускорителе для получения позитронов важную роль играет мишень, которая может выдерживать предельную мощность порядка 10^{12} ГэВ/мм^2 за импульс, сохраняя при этом свои механические свойства. В работе рассмотрены требования к материалу мишени и ее конструкция. В программном комплексе GEANT4 проведено моделирование взаимодействия мишени с пучком электронов. Изучены свойства материалов, используемых в конструкции мишени. Установлено, что ковар и керамика различного состава удовлетворяют требованиям, предъявляемым к материалу мишени. Предложена технология получения соединения металл-керамика для позитронных мишеней.*

Ключевые слова: *позитронная мишень, ковар, карбид бора электронно-лучевая пайка, динамические нагрузки.*

В линейных электро-позитронных ускорителях нового поколения используются позитронные источники высокой интенсивности. Проблема, которая ограничивает получение пучков позитронов требуемой интенсивности, требует разработки мишеней, устойчивых к большим термомеханическим нагрузкам, которые возникают в ней при падении первичного электронного пучка [1]. Возможное решение данной проблемы – использование в мишени жидкого свинцово-оловянного сплава. Материалом входного и выходного окон мишени является карбид бора. Корпус мишени изготовлен из сплава 29НК (ковар) [2]. Соединение окон с корпусом осуществляется пайкой с использованием припоя CuStTi. Структура соединения керамика-припой-ковар во многом определяет качество и герметичность мишени.

Мишень представляет собой канал прямоугольного сечения из ковара, с двумя отверстиями диаметром 8 мм.

Первое – в месте падения первичного электронного пучка, второе – в месте выхода вторичного пучка из мишени. В эти отверстия впаяны окна из керамики карбида бора толщиной 5 мм. Керамика способна выдерживать большие механические нагрузки, которые возникают при импульсном нагреве материала мишени. Вся система теплоизолирована и прогревается до температуры ~300°С. Для того чтобы избежать окисления свинца, весь контур находится в вакууме [3].

На электрон-позитронных коллайдерах следующего поколения требуется на несколько порядков большая производительность позитронного источника. В этом случае средняя тепловая мощность, выделяющаяся в мишени, приводит к необходимости использовать в ка-

честве конверсионной мишени вращающееся колесо или поток жидкого металла [3].

Пайка мишени осуществлялась припоем на медной основе с добавлением титана в качестве активного металла, взаимодействующего с керамикой. Нагревание компонентов припоя проводилось со скоростью 40 град/мин до 800 °С с последующей выдержкой в течение 40 минут. Затем припой прогревался до температуры 1100 °С и выдерживался в течение 10–15 минут, охлаждение осуществлялось со скоростью 25 град/мин до комнатной температуры. Подготовка шлифа осуществлялась с помощью механической обработки и химического травления [4].

Характерная микроструктура паяного соединения ковар 29НК – керамика B_4C до и после травления показана на рисунке 1.

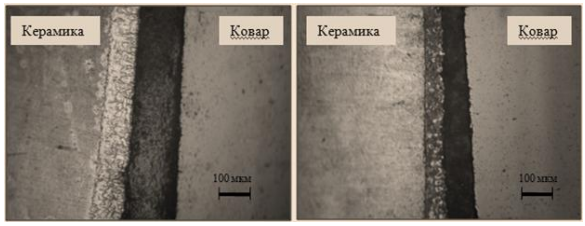


Рисунок 1 – Микроструктура зоны шва паяного соединения, а – до травления, б – после травления

На некоторых участках соединения была обнаружена неоднородность распределения компонентов припоя рисунок 2. В области шва возможно также образование интерметаллидов.

Измерение микротвердости проводилось для различных участков паяного соединения.

Структура шва в области неоднородности, позволяет выделить зоны с различной твердостью. Зона 1 – неоднородная по ширине с микротвердостью 2,34 ГПа, средняя зона 2 неоднородная по ширине с микротвердостью 1 ГПа, зона 3 взаимодействия припоя с керамикой с микротвердостью 5,5 ГПа.

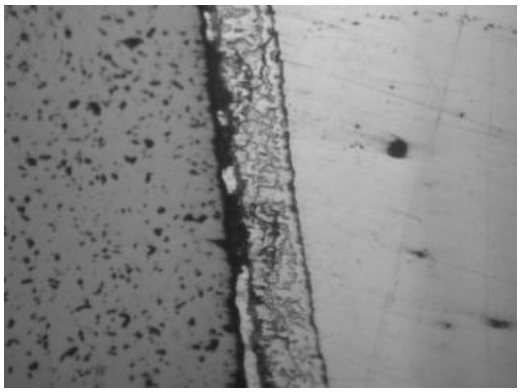


Рисунок 2

Микрофотография представлена на рисунке 3.

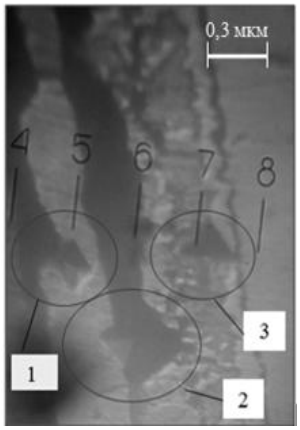


Рисунок 3 – Микроструктура паяного соединения с отпечатками индентора (1,2,3). Зона 1 – неоднородная по ширине с микротвердостью 2,34 ГПа, средняя зона 2 неоднородная по ширине с микротвердостью 1 ГПа, зона 3 взаимодействия припоя с керамикой с микротвердостью 5,5 ГПа.

Таким образом, структура паяного соединения представляет собой слой переменной жесткости. Плавное увеличение жесткости от ковара к керамике может способствовать релаксации и уменьшению остаточных напряжений в паяном

шве, что повышает его механическую прочность. Неоднородность отдельных участков соединения приводит к снижению качества соединения. Для получения соединения, удовлетворяющего эксплуатационным требованиям, необходимо определить оптимальные режимы пайки и состав припоя.

На рисунке 4 представлен график зависимости микротвердости от направления.

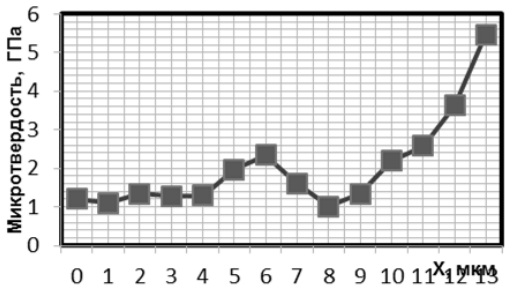


Рисунок 4 – График зависимости микротвердости от координаты в направлении, перпендикулярном шву

Для определения усредненных значений микротвердости ковара и припоя проведены измерения в направлении вдоль шва. Из рисунка 7 видно, что шов имеет сложную структуру. Измерения проводились в зоне 1 (ковар в области шва), зоне 2 прилегающей к ковару, в зоне 3.

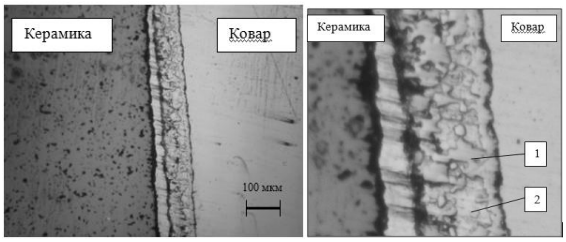


Рисунок 5 а) структура шва, б) область, в которой определялась микротвердость.

Графики зависимости микротвердрсти от координаты в направлении вдоль шва представлены на рисунках 6-7.

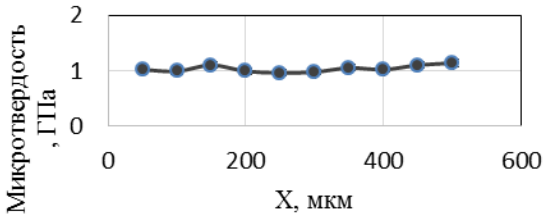


Рисунок 6 – График зависимости микротвердости ковара в направлении, параллельном шву.

Из графика видно, что изменение микротвердости незначительно, это свидетельствует об однородности материала.

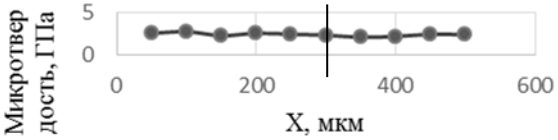


Рисунок 7 – График зависимости микротвердости в зоне припоя от направления вдоль шва.

Расчет прочности паяного соединения металл-керамика проводился при следующих условиях: прилагаемая нагрузка 250 Н, скорость нагружения 0,8 мм/мин, Результаты испытания на прочность представлены на рисунке 8.

Рисунок 8 – График зависимости удлинения от нагрузки

Напряжение при разрыве составляло 19,9 МПа.

На рисунке 9 представлена микрофотография образца после разрыва.

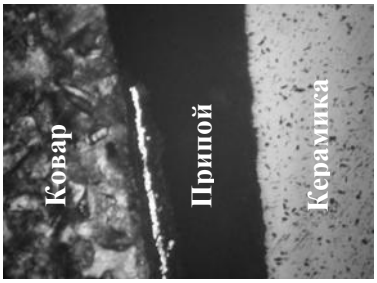


Рисунок 35 – Разрыв соединения металл-керамика по месту припой–керамика

По результатам проведения испытания проверки прочности соединения металл-керамика можно сделать вывод о том, что максимальная нагрузка составляет 250 Н, напряжение 19,9 МПа, разрыв наблюдается по припою, то есть произошло адгезионное разрушение материала, что можно устранить металлизацией керамики титаном.

Из рисунка видно, что разрыв происходит по границе припой-керамика. Это свидетельствует о недостаточной адгезии материала припоя с керамикой. Данная проблема может быть решена с помощью предварительной металлизации керамики титаном.

Таким образом в работе определены режимы пайки соединения металл-керамика, методом оптической микроскопии исследована микроструктура соединения ковар-керамика. Неоднородность микроструктуры может быть обусловлена наличием фаз различного состава, в области шва обнаружены области с различной твердостью. Микротвердость соединения изменялась в пределах от 1 до 5,5 Гпа, испытания прочности соединения металл-керамика показали, что разрушение паяного соединения происходит по границе припой-керамика. Прочность соединения может быть повышена с помощью предварительной металлизации керамики титаном

Список литературы

1. Starostenko A. A.*, Logatchev P. V., Meshkov O. I., Nikiforov D. A., Andrianov A. V., Levichev A. E., Emanov F. A., Astrelina K. V., Blinov M. F., Tsyganov A. S., Berkaev D. E., Koop I. A., Bolkhovityanov D. Yu., and Dorokhov V. L. Status and prospects of the injection complex of the Budker Institute of Nuclear Physics, Physics of Particles and Nuclei Letters 13(7):957-961·December 2016.

2. Международный линейный коллайдер [Электронный ресурс] // URL: http://www.linearcollider.org /ILC/Publications/Reference-Design-Report.

3. Ковар. Свободная энциклопедия – 2016. – (https://ru.wikipedia.org /wiki/%D0%9A%D0%BE%D0%B2 %D0%B0%D1%80).

4. Баранова Л.В., Демина Э.Л. Металлографическое травление металлов и сплавов: справочник. – М. : Металлургия; 1986. – 252 с.

© Никифоров А.Г., Евдокимова Ю.С., 2017

СВОЙСТВА ПОЛИМЕРБЕТОНА И СРАВНЕНИЕ ЕГО С ОБЫЧНЫМ БЕТОНОМ

Н. О. Трусов, Е. А. Головина

Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул, Россия

Аннотация: *Полимербетон – это бетон, вяжущим веществом в котором служат синтетические полимеры. Полимербетон значительно отличается по своим свойствам от обычных бетонов и, таким образом, является новым строительным материалом. Полимербетоны необходимы в тех случаях, когда требуются особо высокая химическая стойкость, повышенная прочность на удар, износостойкость, морозостойкость.*

Ключевые слова: *полимербетон, химическая стойкость, прочность на удар, износостойкость, морозостойкость*

Полимербетон. Применять полимербетон в строительстве начали сравнительно недавно, отчасти в связи с увеличением производства полимеров и сбором новой информации о свойствах этого материала.

Таблица 1 – Классификация полимербетонов

Класс полимербетонов	Вид полимербетона	Синтетическая смола	Отвердитель
1. Фурановые	Фурфуролацетоновый ФА или ФАМ, ФАМ-М, ФАМ-Ф	Фурфуролацетоновая смола ФА или ФАМ и другие	Бензолсульфокислота (БСК), серная кислота СККП и другие
	ФАЭД	Фураново-эпоксидный компаунд	Полиэтиленполиамин (ПЭПА), ДЭТА, ГМД и другие
	Фураново-меланиновый	Фураново-меламиновый компаунд	БСК
	Фуриловый ФС	Фуриловый спирт	Хлорное железо, БСК
2.Полиэфирные	Полиэфирмалеинатный ПН	Полиэфирные смолы: ПН-1, ПН-3, ПН- 62, ПМС-609-22М и другие	Инициаторы перекиси и гидроперекиси. Ускорители: нафтенат кобальта и другие
	Полиэфиракрилатный	Полиэфирные смолы МГФ-9, ТГМ-3 и др.	То же
3. Фенолформальдегидные	Фенолформальдегидные ФФС	Фенолформальдегидные смолы СФЖ-3032, СФЖ-3016 и другие.	БСК, контакт Петрова и другие
4. Мочевино-формальдегидные	Мочевино-формальдегидный МФ	Мочевино-формальдегидная смола	Солянокислый анилин и другие
5. Ацетоноформальдегидные	Ацетоноформальдегидный АЦФ	Ацетоноформальдегидная смола АЦФ-2, АЦФ-23	ПЭПА и 25% NaOH
6. Виниловые	Виниловые ММА	Мономер метилметакрилат ММА	ПЭПА, УП-633М и другие
7. Эпоксидные	Эпоксидный ЭД	Эпоксидные смолы ЭД-16, ЭД-20 и др.	Полиамидные смолы ПО-200 и другие
	Эпоксидный ЭП	Эпоксидно-полиамидный компаунд	То же

Составляющие полимербетонов. Вяжущие. Из полимеров для получения полимербетонов используют преимущественно термо-

реактивные, до отверждения находящиеся в жидком состоянии. К ним относятся эпоксидные, полиэфирные и фурановые полимеры.

Эпоксидные полимеры – являются лучшими видами вяжущих веществ для полимербетона, однако массовому производству существенной помехой является их высокая стоимость. Эпоксидные полимеры отверждаются при обычных температурах, не выделяя побочных продуктов. Отвержденные полимеры обладают высокой прочностью как при сжатии, так и при растяжении, высокой ударной прочностью, относительно низкой деформацией и хорошей стойкостью к истиранию и химической агрессии. Они надежно совмещаются практически со всеми строительными материалами. Для снижения хрупкости в эпоксидные полимеры вводят пластификаторы: внешние (например, диоктилфталат) или внутренние (отвердитель-пластификатор полисульфидный каучук-тиокол).

Ненасыщенные полиэфиры (полиэфирмалеинаты, полиэфиракрилаты) более доступны, хотя у них отсутствуют высокие показатели по прочности, адгезии и истираемости, которыми обладают эпоксидные полимеры. Так же стойкость к воздействию воды и щелочей у них пониженная. Полиэфиры при отверждении дают большую усадку (до 9%).

Фурановые полимеры – одни из самых дешевых видов полимеров, преимущественно применяемых для получения полимербетонов. Особое распространение среди фурановых полимеров получил полимер на основе фурфуролацетонового мономера (ФА), отверждаемого сильными кислотами (процесс отверждения идет на холоде).

Фурановые полимеры отличаются высокой и универсальной химической стойкостью (за исключением действия органических растворителей и сильных окислителей) и хорошей теплостойкостью (до 200°). Механические свойства фурановых полимеров несколько ниже, чем у эпоксидных и полиэфирных. Недостатком этих полимеров является выделение воды в качестве побочного продукта при отверждении.

В качестве вяжущего в полимербетонах можно применять также фенолоформальдегидные, мочевиноформальдегидные и другие полимеры.

Особенности технологии полимербетонов. Свойства полимербетона преимущественно зависят от подбора его состава. Состав полимербетона подбирают для обеспечения минимального расхода полимерного вяжущего при получении требуемых физико-механических свойств бетона (прочности, плотности, стойкости и т. п.).

Экономия составных частей этого материала диктуется не только высокой стоимостью полимеров, но и ухудшением некоторых показателей полимербетона при увеличении расхода вяжущего сверх оптимального.

Уменьшить расход вяжущего вещества можно правильным подбором зернового состава заполнителей. Обычно применяют тощие полимербетоны с соотношением полимера к наполнителю от 1:5 до

1:12 (по весу), что соответствует расходу 100–200 кг полимера на 1 м³ бетона.

Полимербетон перемешивают и укладывают теми же методами, что и обычный бетон, с помощью стандартного оборудования. В ряде случаев для перемешивания полимербетонной смеси требуется подогревать ее.

Требуемые условия и продолжительность твердения полимербетона зависят от вида полимера, вида и количества отвердителя. Твердеть полимербетон может при обычной температуре («холодное» отверждение) и в условиях нагревания до 40–80°. В последнем случае бетон твердеет быстрее и достигается большая степень отверждения полимера.

Приобретение полимербетоном эксплуатационной прочности, как правило, продолжается не более суток. До момента полного отверждения полимербетон очень чувствителен к действию воды. Не допускается использовать влажные сырьевые компоненты или наносить полимербетон на влажное основание. В первом случае сильно понижаются механические свойства полимербетона (например, использование песка с влажностью 3–4% понижает прочность полимербетона на полиэфирном связующем в 5 раз). Во втором случае резко уменьшается сцепление полимербетона с основанием.

Свойства полимербетонов. Объемная масса полимербетонов, которая зависит в основном от вида и количества заполнителя, находится обычно в пределах 1800–2200 кг/м³.

Прочность полимербетонов определяется их составом и в некоторой степени режимом твердения.

Сравнение механических свойств полимербетонов и обычных бетонов показывает, что прочность при сжатии у полимербетонов выше в 2–3 раза, прочность при изгибе выше в 6–10 раз, полимербетоны характеризуются меньшей разницей между прочностью при изгибе и при сжатии; удельная ударная вязкость полимербетонов выше в 5–10 раз. Модуль упругости полимербетонов в 1,5–2 раза ниже вследствие высокой ползучести, присущей всем полимерным материалам. При обычных температурах полимербетоны неспособны длительно выдерживать нагрузки, составляющие более 40–50% от разрушающих, так как начинаются незатухающие деформации ползучести, приводящие через некоторое время к разрушению бетона. При температуре 60–90° (зависит от вида полимера) незатухающая ползучесть начинает появляться уже при небольших нагрузках (10–15% от разрушающих). При температурах выше 90° полимербетоны постепенно полностью теряют несущую способность.

Неоценимым качеством полимербетонов по сравнению с цементными является низкая истираемость, в особенности бетонов на эпоксидных и фурановых полимерах.

Полимербетоны обладают отличной адгезией к большинству сухих строительных материалов. Наибольшей адгезией обладают эпоксидные полимербетоны. Например, прочность сцепления их

с цементным бетоном выше, чем прочность последнего при растяжении.

Плотное строение и водостойкость составляющих полимербетона придают ему практически полную водонепроницаемость. Водопоглощение полимербетонов не превышает 0,5–1%. Как следствие водонепроницаемости и низкого водопоглощения, у полимербетонов очень высокая морозостойкость (более 300–500 циклов).

Одним из главных преимуществ полимербетонов, определяющим область их применения, является высокая химическая стойкость.

В отличие от обычного цементного бетона полимербетон обладает высокой стойкостью к действию кислот, растворов солей и нефтепродуктов. Стойкость полимербетона в той или иной среде зависит от вида полимерного вяжущего вещества, стойкости заполнителей и ряда других факторов. Например, для кислотостойких бетонов необходимо применять кислотостойкие заполнители (кварц, андезит, графит и т. п.). Для обеспечения высокой стойкости, просто незаменима плотная структура полимербетона.

Влияние полимерного связующего сказывается и на термических свойствах полимербетона. Коэффициент температурного расширения полимербетонов выше, чем у обычного бетона, вследствие высокого коэффициента температурного расширения полимерного связующего, равного $0{,}5\text{-}1{,}0\cdot10^{-3}$ 1/град, что в 5-10 раз выше, чем у стали и цементного камня. Поэтому для снижения температурных деформаций полимербетона следует уменьшать расход полимерного связующего. Теплопроводность полимерных бетонов ниже, чем у цементных.

Как было показано выше, существенным недостатком полимербетонов является сравнительно низкая термостойкость. Предельные температуры, в которых можно эксплуатировать конструкции из полимербетонов, не превышают 150-180 °С (таблица 2).

Эти характеристики указывают на высокую долговечность и прочность нового вида материала. Что касается его знаменитой химической пассивности, то ее определяет ГОСТ25246-82.

Главное преимущество композита:

- повышенная устойчивость к проникновению влаги внутрь композитного массива. Водные капли быстро испаряются с поверхности материала, не успеваю насытить его разрушающей влагой.
- стойкость к значительным температурным перепадам, позволяющая полимерному бетону сохранять целостность, независимо от продолжительности и количества циклов замораживания.
- устойчивость материала к агрессивным веществам, химическим реагентам, позволяющая применять полимербетон в различных областях без защиты поверхности с помощью специальных покрытий.
- возможность восстановления поврежденных механическим путем участков композитного массива с использованием реставрационной смеси.

Таблица 2 – Свойства полимербетонов

Параметр	Значение
Плотность, кг/м^3	от 300 до 3000
Противостояние сжатию, МПа	от 50 до 110
Противостояние изгибу, МПа	от 3 до 11
Истирание, г/см^2	от 0,02 до 0,03
Температурные пределы, °С	от 60 до 140
Коэффициент теплопроводности, Вт/м·К	от 0,05 до 0,85
Упругость, МПа	от 10000 до 40000
Поглощение воды в сутки, %	от 0,05 до 0,5
Максимум циклов заморозки	от 300 до 500

•повышенные прочностные характеристики при относительно небольшой массе композита, позволяющие производить различную продукцию, с расширенными эксплуатационными свойствами.

•отсутствие шероховатости на идеально гладкой, абсолютно не скользкой поверхности материала. Такое свойство позволяет искусственному камню длительное время оставаться чистым, а, при необходимости, различные загрязнения несложно удаляются с поверхности материала.

•расширенная цветовая гамма полимерного бетона, имитирующего природный мрамор, малахит, гранит. Созданный искусственный камень сложно отличить от настоящего, что позволяет обеспечить широкую сферу применения композита.

• возможность вторичной переработки, использования при изготовлении технологических отходов, что значительно снижает себестоимость продукции, выпускаемой в условиях безотходной технологии.

Таблица 3 – Компонентный состав полимербетонов

№п. п.	Составляющие	Размер фракций, мм	Состав 9		Состав 10	
			Тяжелый полимербетон ММА		Полимербетон ММА на пористых заполнителях	
			расход составляющих, в процентах по массе	расход составляющих кг/м^3	расход составляющих, в процентах по массе	расход составляющих кг/м^3
1	Гранитный щебень	20-40	46-47	1100-1130	-	-
2	Гранитный щебень	10-20	3-4	70-95	-	-
3	Пористый щебень	10-20	-	-	22-23	390-415
4	Пористый щебень или гравий	5-10	-	-	15-16	270-290
5	Песок кварцевый	0,15-5	30-32	720-770	32-34	575-610
6	Наполнитель	Менее 0,15	8-9	190-215	16-18	290-320
7	Метилметакрилат	-	8-8,5	190-205	10,5-11,5	190-205
8	Парафин нефтяной	-	0,5% от массы ММА	1-1,1	0,5% от массы смолы	0,9-1
9	Эмульсионный полистирол	-	0,4-0,5	10-12	0,5-0,55	9-10
10	Диметиланилин	-	0,2-0,25	5-6	0,2-0,3	3,5-5,5
11	Паста из перекиси бензоила и дибутилфталата	-	0,6-0,7	14-17	0,6-0,8	11-14,5
12	Пластификатор	-	0,5-1% от массы мономера	1-2	0,5-1% массы мономера	1-2

Наряду с положительными моментами у полимерного бетона имеются недостатки:

- восприимчивость к воздействию открытого огня и повышенной температуры, вызывающая разрушение материала;
- повышенная, если сравнивать с бетоном, цена, что обусловлено затратами на приобретение специальных смол.

Список литературы:

1. Христофорова И.А., Глухоедов В.В., Христофоров А.И. Полимербетоны на основе поливинилхлоридного связующего // Физико-химия процессов переработки полимеров: Тез. докл. 2 Всеросс. науч. конф. 14–16 октября 2002 г. − Иваново: ИГХТУ, 2002. − С. 51−52.

2. Абдуллин И.А., Тимофеев Н.Е., Косточко А.В., Филиппов Ю.М., Савагин В.Н., Белобородова О.И., Абдуллин А.И. Композиционные материалы полимерной матрицей: учебное пособие, 2006. – 120-123 с.

3. http://stroyres.net/beton/polimerbeton/ponyatie-vidyi-proizvoditeli.html.

4. http://topbeton-nn.ru/?page_id=235.

5. Соломатов В. И. Технология полимербетонов и армополимербетонных изделий. – М., 2004.

© Трусов Н.О., Головина Е. А., 2017

ABSTRACT

PERSPECTIVE MATERIALS OF CONTEMPORARY MACHINE INDUSTRY

Markin V. B.

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Contemporary machine industry is one of the promising technologies which have as a main objective to reduce materials and metals consumption. Particularly with regard to aircraft industry, rocket-powered industry, automobile construction, setting the technical development. It's impossible to imagine technical progress without expansion of the number of constrictive materials, which, as usual, are discovered by scientists at various levels: macro-, micro-, meso-, nano-.

MORPHOLOGY OF SHIFT MARKINGS IN FCC–SINGLE CRYSTALS AND ALLOYS.

C. A. Alfyorova[1], D.V. Lychagin[2]

1 National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia

2 National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

The article deals with quantitative analysis of strain-annealed relief submitted slip markings and pack markings in FCC-single crystals and alloys with using two- and three-dimensional roughness parameters. Had been led the distinction between morphology and quantitative characteristics of strain-annealed relief formed in FCC-single crystals (Al, Ni) as is also in ordered and disordered alloys Ni3Fe.

FORMATION OF AUTHOR'S CASTING BY GASIFIABLE PATTERN CASTING.

A. M. Dostaeva[1], J. C. Amankeldina[1]

1 Karagandinskij State Technical University, Karaganda, Kazakhstan

Submitted the formation of author's casting by gasifiable pattern casting and considered merits and demerits of casting method.

SELF-PROPAGATING HIGH-TEMPERATURE SYNTHESIS OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MAX-PHASE NB2ALC AND NB4ALC3.

N. I. Afanasyev, O.K. Lepakova, V. D. Shulpekov

Federal State Budgetary Institution of Science Tomsk Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences

Submitted the results of the micro-structure and phase state of SHS-materials research based on max-phase NB2ALC and NB4ALC3 and electrically conducting properties of film-sample on basis of them.

BACKGROUND SPECTRUM RESEARCHING OF BEGEAS

Y. M. Basalaev, A.V. Kopytov, I. S. Ryabchikov

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

The article deals with background spectrum calculation for the most symmetric points and Brillouin zone directions and vibrational state density in the model of Keating for BeGeAs2 with a chalcopyrite lattice.

RADIATION RESISTANCE OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS.

S.A. Belyakovich, E.A. Golovina

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Radiation resistance is an ability of materials to preserve structure and properties in time of radiation effects and after it. The significant influence on radiation resistance exerts type of radiation, the size of radiation doze, characteristics of environment, material properties.

CHANGING THE STRUCTURE OF POLYMER MATERIALS BY MEANS OF COLD DRAWN

S.A. Belyakovich, E.A. Golovina

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Orientation stretching is a common technical device in which squeezed polymer material is stretch out in 10-100 times. There are processes of rebuilding chain molecules and supermolecular structure inside stretched material. Induced by stretch force molecular bonds break down so molecular conformations straighten along the draw axis. That may be possible if enough flexibility of the molecule in rubbery state. In compliance to grid model of polymers the idea of orientation stretching is that force passed through knots of grids stretches out and turns areas of molecules between knots along the draw axis. The process is possible to fixed knots and also to their significant changed content and form. Availability of superstructures has great influents on orientation stretching process.

THE DYNAMIC OF ORTHORHOMBIC CRYSTAL'S LATTICE IN THE MODEL OF KEATING

K. A. Gordienko, A.V. Kopytov,

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

The article deals with background spectrum calculation for the most symmetric points and bril-louin zone directions in the model of keating for LiInS2 and LiInSe2 in orthorhombic phase. Researched dependence of phonon spectrum on changing of crystals compounds.

PROPAGATION ANISOTROPY OF ELASTIC WAVES IN ORTHORHOMBIC LIGAS2 AND AGINS2

I.N. Zagvozdin[1], A.V. Kopytov[1], V. M. Pedikov[2]

1Kemerovo State University, Kemerovo, Rus-sia

2 Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk. Russia

Propagation anisotropy of elastic waves in LiGaS2 and AgInS2 was analyzed by method numerical solution of Christoffel's equations. There were defined special directions. There are five or six longitudinal normal and three or five acoustic axes within irreducible sector of Brillouin zone. Also were spotted directions of shear-wave propagation and characteristics of interior conical refraction.

CHANGING OF INTERFACE-ROUGHNESS PROFILE AND SPREADING METALLIC MATERIALS COEFFICIENT WITH INCREASING OF DOSE IONIC RADIATION

A.N. Karpikov, S.B. Kislitsin,M.S. Kozyreva

The Republican State Enterprise "Institute of nuclear physics, Almaty, Republic of Kazakhstan

In the present model of spreading interface-roughness based on distinction between local fragments, changings of profile have been calculated and the consequent in the form of changing of global spreading coefficient with increasing of dose ionic radiation.
It has been established that in case of normal dropping of ionic stream the interface-roughness profile has a tendency to smoothing. The calculations have been made for two-segment symmetric surface of wolfram illuminated by helium ions with 100keV with different instantaneous roughness noise amplitude.

METAL-COMPOSITE COMPOUNDS IN CONTEMPORARY TECHNICAL DESIGN.

V.B. Markin[1], R.R. Ibragimova[2]

[1]Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

[2]Kazakh State Technical University, Almaty

Main objective of using polymer composite material in contemporary technical design is reducing of specific quantity of metal and rising weight perfection of it. However the total replacement metals by composites materials is linked with big technical troubles, so, that's why the issue of creating mating elements allowing setting the connection between them is so actual. Were considered ways of forming connections of metals and composites and their features. It's better to use solid compounds for high-rate constructions. By the example of oil-producing articles showed the opportunity of replacement steel rods by glass-reinforced unidirectional rods created by pultrusion method. As the result we can see the weight reducing and anticorrosive characteristics raising.

SYMMETRY CORRELATIONS BETWEEN CRYSTALLINE STRUCTURES OF ALKALI METALS' AMIDES

E. B. Kayzer, N.G. Kravchenko, A.S. Poplavnoj

Kemerovo State University, Kemerovo, Russia

The article deals with symmetry analysis of crystalline structures of alkali metals' amides MeNH2 (Me = Li, Na, K). Submission scheme of space groups are structured by the principle: space groups→ maximal nonisomorphic subgroups. For including all structures being under discussed in literature it is necessary to enter intermediate dimensional groups, which are able to match metastable state and it's also possible to realize stable strictures with predicted symmetry.

THE INFLUENCE OF PRESSING AND CAKING REGIME ON THE KERMET CELLULAR STRUCTURE'S PARAMETERS BASED ON CARBIDE TITANIUM

S.S. Kvon, I.E. Medvedeva

Karagandinskij State Technical University, Karaganda, Kazakhstan

The report presents the results of the influence of pressing and caking regime on the kermet cellular structure's parameters based on carbide titanium researches. Cellular structure was analyzed with mercury porosimetry method. Compacting pressure, gravimetric consist and caking parameters for making prescribed open-cellularity of kermet were experimentally explored.

INFLUENCE OF UNSTEADY-STATE PRESSING ON SANDY-PITCHY SHAPES' STRENGTH

V. Y. Kulikov[1], E.N. Eryomin[2], T.V. Kovalyova[2]

[1]Karagandinskij State Technical University

[2]Omsk State Technical University

It is determined that in order to increase the density and strength of the resulting shell mold, the pressure on the mixture does not remain constant throughout the process of forming the shell mold, but changes during the shaping process: first, the initial pressure is 0.25-0.30 MPa, then increases by a value of 0,05-0,10 MPa after 15-20 seconds, at the end of the formation of the shell thickness of 10-15 mm pressure is reduced to zero.

THE PHASE CONSTITUTION OF AL-TI-B SYSTEM'S SHS-LIGATUR AND THE INFLUENCE OF THEM ON MECHANICAL PROPERTIES OF ALUMINUM-ALLOYS

A.E. Matveev[1], I.A. Zhukov[1.2], V.V. Promahov[1.2], Y. A. Dubkova[1]

[1]National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

[2] Institute of Problems of Chemical and Energy Technologies SB of the RAS, Biysk, Russia

The article deals with the phase constitution of powder composites materials Ti-B-Al obtained by SHS-method. The gotten composites materials were used as ligatures for aluminum alloy 6082. Particles of titanium diboride introduction of 1% in aluminum alloy leads to raising cast-alloy strength 100 MPa to 160 MPa.

STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF STEEL 10C18N10T-VA AS THE RESULT OF COMPLEX PHYSICO-CHEMICAL PROCESSING EFFECT

K.M. Mukashev

Al-Farabi Kazakh National University

The report presents the results of the research of possibility of using melt lithium as heat carrier and aftermath of its cooperation with first atomic reactor's wall model material. As an object of research was used stainless steel 10c18n10т-va. The studies were conducted by positron spectroscopy method as the most sensitive to atomic structural disturbance. For quality test of different materials as heat carrier the special gain coefficient was introduced. Was demonstrated that temperature of melt and processing time can effect on the mass-transfer rate. Prehistory of the materials is also important. Dates of radiation effects, processes of hydrogen saturation of material, determining results of diffusion introductions of atoms li into crystal latitude attests to it.

ABOUT ECONOMIC TRAINING OF BACHELORS OF «MATERIALS AND TECHNOLOGY OF MATERIALS» SCIENCE

N.A. Myagkova

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Technical student training can't be perfect without economical disciplines which give practical knowledge about manufacture organization as a part of an exploration for economical calculations, management consultation and preparing and presentation students' marketing researches.

MODELING OF BRAKE DISK BY USING SOLIDWORKS

V.M. Patsukova, E.A. Golovina

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

The brake disk system excites a practical interest. Was marked that one of the common automobile problem is breaking of break disk and brake blokes. Fast automobile must be light-weight, so usual materials (steel, cast iron) are heavyweight. So cast iron brake dicks ran down fast because of high temperature and friction. That's why it becomes necessary to use friction materials of good quality.

HEAT EFFECTS OF CYCLIC STRAINING OF MATERIALS

M.G. Petrov

SibNIA named after S. A. Chaplygin, Novosibirsk, Russia

Analyzed steel 09G2C with cyclic straining, the regim of it was chosen by amplitude dependence of the thermal effect of deformation. Thermoactivation analysis of samples with significant heating durability was made, as result their destruction had an aspect of cyclic creep. Was made a conclusion that the part of work-energy that change its internal energy determines a distraction speed.

RESEARCH OF AGGREGATION OF CARBON ATOMS IN THE HIGH-POWER FIELDS

A.V. Popov

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

The influence of outer fields on electronic structure of carbon clusters was researched and also processes of condensed nanosystems aggregation based on them. The process of forming small clusters from individual carbon atoms in high-power fields was computer simulated. Metastable structures of small carbon clusters were found out.

STRONG DESIGN OF COMPOSITE MATERIAL FOR THE INTERCEPTOR OF THE AIRCRAFT WING MANUFACTURING

A.D. Prokopets, E.A. Golovina

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

The interceptors' application is caused by limitation of ailerons size because of rigidity conditions and employment of the tail edge of the wing by other means of mechanization, the loss of ailerons effectiveness, the need to create additional drag and lift force when landing.

The main aim of using interceptors is increasing load jn the wheels of the chassis and the effective use of wheel braking throughout the mileage.

THE DEVELOPMENT OF OXIDE CERAMIC MATERIALS PRODUCTS OBTAINING METHOD WITH ADDITIVE TECHNOLOGIES USING

V.V. Promahov[1], V.V. Platov[1], N.V. Grunt[1], N.A. Shultz[1]

National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

The article deals with researches directed to design the original device constriction destined to obtaine complex products from technical ceramics with Fus-

ing Deposition Modeling method. By example of ceramic based on zirconia (ZrO2(3%Y2O3)) represented the opportunity of obtaining additive ceramic structures without distinct boundaries between layers of material.

MICROSTRUCTURES OF CASTINGS FROM THE HEAT-RESISTANT ALLOY RESEARCH, OBTAINED BY DIFFERENT CONDITIONS OF FLOAT

E.N. Reshotkina[1], M.K. Ibatov[2], A.S. Kim[3], S.K. Arinova[2]

[1]JSC "ArcelorMittal Temirtau", Temirtau, Kazakhstan

[2] Karagandinskij State Technical University

[3] Chemical and Metallurgical Institute. J. Abisheva

In the article it is shown that, despite the higher cost of casting for gasifying models in comparison with sandy-clayey forms, CGM is preferable for obtaining castings from complex alloys, because The most significant operational properties, in particular, long-term strength, are increased by 13-15%.

THE POWER STRIP DEFECTS OF LARGE-SIZE PRODUCTS FROM COMPOSITE MATERIAL RESEARCH

U.A. Sadikov, V.A. Shmeer

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

The article deals with the power strip defects of large-size products from composite material analyze by SolidWorks. Using the acoustic defectoscope AD-60K was found out the presence of delaminations and cracks in the laminate layer and the inner layers of the mesh fiberglass liner and also spotted the positions of the main cracks what let the ability of exploitation or necessary repair of the structure.

FACING TITLE DESIGNING BASED ON RIVER SAND AND BINDING

S.S.Safraider, E.A. Golovina

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Finishing materials are applied for exterior and interior decoration and facing of buildings and structures. Early for facing of building objects were used usual materials like: plastering solutions, paints, varnishes, wood, natural stone and ceramics. The main aims of using facing title are facing works have protection, sanitary-hygienic and decorative functions of buildings and structures.

VENEER OF THE ENGINEERING BOARD MODIFICATION WITH THE PROPOSE OF INCREASING ITS OPERATING ABILITIES

S. A. Khapyorsky, E.A. Golovina

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

We can watch the increasing interest to lumber quality improving. The veneer modification with low-viscosity solution based on EPDM-rubber, as one of the methods of improving operation abilities of engineering board hasn't been tested. So that's why the issue of veneer modification with elastomer researching followed by forming the engineering board is so actual.

EFFICIENCY OF POLYPROPYLENE WITH PARTICLES OF TALK MODIFICATION EXPERIMENTAL ESTIMATE

I.S. Shahurina, E.A. Golovina

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

The synthetic polymer materials are the foundation of technical progress in the most significant fields of manufacturing like: automotive, aviation, instrument making, mechanical engineering, electronics, construction, production of modern household items and other things. The plastics based on polyolefin gain ascendancy among them.

RADAR-TRANSPARENT PANELS FOR COVERING ANTENNA COMPLEXES

V.A. Shmeer, V.B. Markin

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

In our days the contemporary combat actions dictate the new requests to technical characteristics of unit personnel equipment. Secrecy is one of them. It's depends on using different kinds of materials to manufacture articles for military needs.

POLYETHYLENE PIPES ADVANTAGES FOR WATER SUPPLY

M.V. Kostitsyna, E.A. Golovina

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Rapid development of organic chemistry ran to polymer pipes appearance. The main advantages of them over metallic pipes are anticorrosion properties. The polymer pipes can be named pipes of XXI century. They collect all advantages of others type of pipes and due to that it have absolutely new properties. The main parameters and requirements for polymer pipes are regulated by normative and technical documentation.

COMPOSITE MATERIALS IN PRODUCTS OF MODERN TECHNOLOGY

Markin V. B., Markin M. V.

Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

Modern technology has found wide application products representing the capacity (cylinders) of high pressure, which have to meet high requirements for strength, tightness and the weight to perfection. One of the main requirements defining these structures, due to the minimization of the weight and required safety actions in cases of mechanical failure. In aircraft structures such products are used as compressed gas cylinders, gas batteries, fuel tanks, or straight and curved piping systems, pneumatic, pressurization, temperature control, management and livelihoods. The pressure cylinders have found widespread use in land transport, in particular for LPG vehicles, as well as in breathing apparatus carried on the back (for emergency services radio, scuba diving, etc.).

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF BINDER MODIFICATION OF CARBON NANOTUBES ON THE PROPERTIES OF THE UNIDIRECTIONAL SPECIMENS

Tankova, I. K., Ananiev E. S.

Altai state technical University. I. I. Polzunov, Barnaul, Russia

In the reinforcement of high modulus fibers of PCM due to low fracture toughness of the epoxy matrix, and their strength characteristics cannot be implemented fully, which increases the consumption of materials of production. The solution to this problem will allow to create materials with a more efficient implementation of the strength properties of the reinforcing elements, thereby obtaining a material with a higher durability and lifespan.

STRUKTURE AND PROPERTIES OF METAL-CERAMIC INTERCONNECTION FOR THE POSITRON TARGETS

A.G. Nikiforov, J.S. Evdokimova

In the electron-positron accelerators, the target play an important role in positron production, this target must be able for extreme power about 10^{12} gev/mm^2 per pulse and still maintain their mechanical properties. The requirements for target material and its construction are considered. In the program pocket geant4 numerical simulation of the target-electron beam interaction was performed. The properties of the target materials are explored. It was found that kovar and ceramics of different types meet the requirements for the target material. The technology for metal-ceramic connection is proposed.

PROPERTIES OF POLYMER CONCRETE AND ITS COMPARISON WITH CONVENTIONAL CONCRETE

Panties N., Golovina E. A.

Altai state technical University. I. I. Polzunov, Barnaul, Russia

Polymer concrete is a concrete binder in which are syn-thetic polymers. Polymer concrete is significantly different in its properties from conventional concrete and, therefore, is a new building material. Polymaratona necessary in cases that require a particularly high chemical stand-bone, increased impact strength, wear resistance, frost resistance.

СОДЕРЖАНИЕ

Маркин В.Б.	Перспективные материалы современного машиностроения	4
Алфёрова Е.А., Лычагин Д.В.	Морфология следов сдвига в ГЦК-монокристаллах и сплавах	13
Достаева А. М., Аманкелдина Ж. С.	Создание авторской отливки с помощью литья по газифицируемой модели	16
Афанасьев Н.И., Лепакова О.К., Шульпеков А.М.	Самораспространяющийся высокотемпературный синтез композитных материалов на основе мах-фаз Nb_2AlC и Nb_4AlC_3	20
Басалаев Ю.М. Копытов А.В., Рябчиков И.С.	Исследование фононного спектра $BeGeAs_2$	23
Белякович С.А., Головина Е. А.	Радиационная стойкость полимерных композиционных материалов	26
Белякович С.А., Головина Е. А.	Изменение структуры полимера посредством холодной вытяжки	31
Гордиенко К.А., Копытов А.В.	Динамика решетки орторомбических кристаллов в модели Китинга	34
Загвоздин И.Н., Копытов А.В., Педиков В.М.	Анизотропия распространения упругих волн в орторомбических $LiGaS_2$ и $AgInS_2$	39
Карпиков А.Н., Кислицин С.Б., Козырева М.С.	Изменение профиля шероховатой поверхности и коэффициента распыления металлических материалов с ростом дозы ионного облучения	44
Маркин В.Б., Ибрагимова Р.Р.	Соединения металл-композит в конструкциях современной техники	49
Кайзер Е. Б.,. Кравченко Н. Г, Поплавной А С.	Симметрийные соотношения между кристаллическими структурами амидов щелочных металлов	54
Квон Св.С., Медведева И.Е.	Влияние режима прессования и спекания на параметры пористой структуры кермета на основе карбида титана	63
Куликов В.Ю., Еремин Е.Н., Ковалёва Т.В.	Влияние нестационарного давления на прочность песчано-смоляных форм	67
Матвеев А.Е., Жуков И.А., Промахов В.В., Дубкова Я.А.	Фазовый состав СВС-лигатур системы Al-Ti-B и их влияние на механические свойства алюминиевых сплавов	72

Мукашев К.М., Курбанова Б., Мтсбекова А.	Структурные характеристики стали 10Х18Н10Т-ВД как следствие воздействия комплексной физико-химической обработки	76
Мягкова Н.А.	Об экономической подготовке бакалавров направления «Материаловедение и технология материалов»	83
Пацукова В.М., Головина Е.А.	Моделирование тормозного диска с применением программы SOLIDWORKS	87
Петров М.Г.	Тепловые эффекты циклического деформирования материалов	92
Попов А.В.	Исследование агрегации атомов углерода в полях большой мощности	98
Прокопец А. Д., Головина Е. А.	Прочностное проектирование композиционного материала для изготовления интерцептора крыла самолета	101
Промахов В.В., Платов В.В., Грунт Н.В., Шульц Н.А.	Разработка способа получения изделий из оксидных керамических материалов с применением аддитивных технологий	106
Решоткина Е.Н., Ибатов М.К., Ким А.С., Аринова С.К.	Исследование микроструктуры отливок из жаропрочного сплава, полученных при разных условиях выплавки	112
Садиков У.А., Шмеер В.А.	Исследование дефектности силовой оболочки крупногабаритных изделий из композиционного материала	116
Сафрайдер С.С., Головина Е. А.	Проектировние облицовочной плитки на основе речного песка и связующего	121
Хапёрских С.А., Головина Е.А.	Модификация шпона инженерной доски эластомером с целью повышения ее эксплуатационных свойств	125
Шахурина И.С., Головина Е.А.	Экспериментальная оценка эффективности модификации полипропилена частицами талька	131
Шмеер В.А., Маркин В.Б.	Радиопрозрачные панели для укрытия антенных комплексов	135
Костицына М. В., Головина Е. А.	Преимущества полиэтиленовых труб для водоснабжения, изготовленных путем экструзии	141
Маркин В.Б., Маркин М.В	Композиционные материалы в изделиях современной техники	145

Танкова К. И., Ананьева Е. С.	Исследование влияния модификации связующего углеродными нанотрубками на свойства однонаправленных образцов	154
Никифоров А.Г. , Евдокимова Ю.С.	Структура и свойства металлокерамических соединения для позитронных мишеней	159
Трусов Н.О., Головина Е. А.	Свойства полимербетона и сравнение его с обычным бетоном	163
ABSTRACT		169

ТРУДЫ XIV МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ ШКОЛЫ-КОНФЕРЕНЦИИ «ФУНДАМЕНТАЛЬНОЕ И ПРИКЛАДНОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»

Издано в авторской редакции

Подписано в печать 28.09.2017. Формат 60х84 1/8.
Печать ризография. Усл.п.л. 20,57.
Тираж 100 экз. Заказ 2017 –

Издательство Алтайского государственного
технического университета им. И.И. Ползунова,
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46

Отпечатано в типографии АлтГТУ,
656038, г. Барнаул, пр-т Ленина, 46
тел.: (8-3852) 29-09-48