

УДК 621.9.04 + 620.22-419.8

## **МИРОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ОБЛАСТИ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ С МИКРО- И НАНОДИСПЕРСНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ**

*А.А. Дьяконов*

Приведен анализ современных мировых тенденций в области применения композитных материалов с микро- и нанодисперсными наполнителями в машиностроении. Рассмотрены проблемы получения и основные направления исследований в области композитных материалов, технологических процессов формования изделий и бережных локальных деструктивных технологий.

Ключевые слова: композитный материал, стабильность свойств, формование, аддитивные технологии.

Среди основных направлений технологического развития промышленного комплекса Российской Федерации в долгосрочной перспективе до 2020 года ожидается создание новых материалов, превосходящих по физико-механическим и эксплуатационным свойствам стали и сплавы. По экспертным оценкам, в ближайшие двадцать лет свыше 80 % материалов будут заменены принципиально новыми (в частности, прогресс ожидается в создании композитных материалов, керамики, материалов для микроэлектроники и др.).

Поэтому одним из направлений совершенствования современных конструкций и повышения их технологичности является применение композитных материалов.

Вместе со всеми плюсами – малой плотностью, пространственно ориентированной сопротивляемостью внешним силам, целенаправленным комплексом свойств (демпфированием колебаний, заданным уровнем модуля упругости, термостойкостью и т.д.) композитные материалы ставят перед технологами существенные проблемы механической обработки [1–6], а перед конструкторами – проблемы прочностных и деформационных расчетов [7–9]. Эти трудности вызваны присущей этим материалам особенностью строения.

Учет реальных свойств материалов имеет большое значение в развитии механики твердого деформируемого тела. Классическое представление о сплошном, однородном, изотропном, линейно-упругом теле в большинстве случаев уже не удовлетворяет практику, т.к. почти все материалы, применяемые в машиностроении и других отраслях: металлы и сплавы с неоднородной поликристаллической структурой, бетоны, армированные пластики и т.п. – являются композитными материалами.

Применяемые в виде покрытий композитные материалы позволяют формировать заданные специфические свойства рабочих поверхностей (фрикционные или антифрикционные свойства, стойкость к агрессивным средам определенного состава, заданные деформационные свойства и т.д.). К настоящему времени сформировались два основных направления применения композитных материалов в различных отраслях промышленности: новые конструктивные решения с использованием композитных материалов; ремонт, восстановление и профилактика износа рабочих поверхностей деталей и конструкций [10].

Современные мировые тенденции развития технологических процессов формообразования изделий из конструкционных композитных материалов сводятся к разработке и совершенствованию высокопроизводительных технологий, требующих минимальной доработки до готового изделия. К ним относятся: пропитка под давлением в закрытые формы (RTM – resin transfer molding), вакуумная инфузия полимера (IR – infusion resin), безавтоклавные методы (OoA – out of autoclave), программируемая роботизированная выкладка (PFP – programming fiber placement) и силовая намотка (Winding).

Технологический прорыв в разработке и совершенствовании данных технологий тесно связан с проведением крупномасштабных фундаментальных и прикладных исследований в этом направлении. Подтверждением актуальности проблематики данных исследований является проведенный анализ публикационной активности мирового научного сообщества (данные Scopus), отражающий возрастающую тенденцию количества научных исследований в области технологических процессов формообразования изделий из конструкционных композитных материалов в период с 2000–2012 гг. (рис. 1).

По итогам 19-й международной конференции по композитным материалам (ICCM-19), которая проходила в г. Монреале (Канада) с 28 июля по 2 августа 2013 года, проблемы развития технологий производства материалов и изделий стоят на втором месте (12 % докладов), уступая проблемам прочности композитных материалов (около 14 % докладов) [11]. Здесь первыми по значимости факторами были стабильность и производительность процессов изготовления – главные характеристики для массового производства. Стабильность достигается автоматизацией производства. По этому пути идут компании Boeing, Airbus, ESA и другие крупные производители, используя роботы для выкладки лент из препрегов углепластика.

В тройку лидеров входит США, Китай и Япония, а Россия в этом списке занимает 9 место (табл. 1).

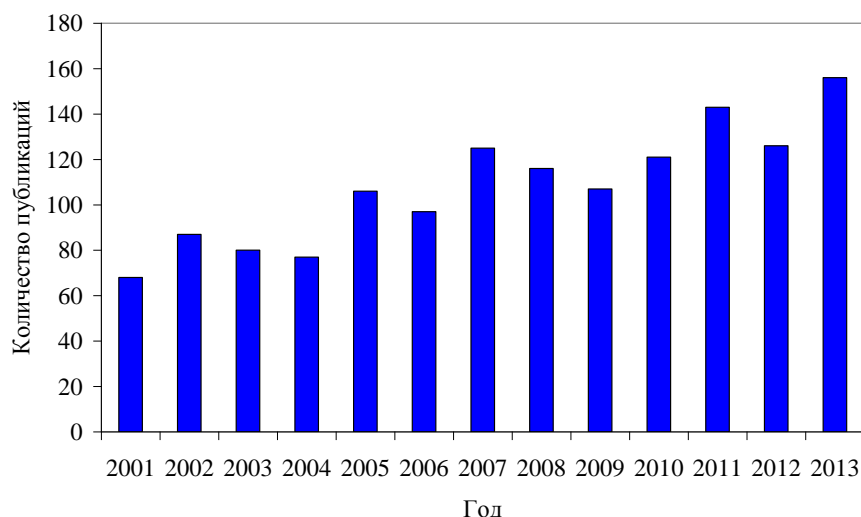


Рис. 1. Тенденция научных исследований в области технологических процессов формообразования изделий из конструкционных композитных материалов

Таблица 1

Распределение количества научных публикаций в области технологических процессов формообразования изделий из конструкционных композитных материалов по странам

№ п/п	Страна	Количество публикаций в 2012 г.
1	США	615
2	Китай	314
3	Япония	129
4	Германия	118
5	Италия	106
6	Канада	102
7	Великобритания	99
8	Франция	92
9	Российская Федерация	90
10	Южная Корея	88
...	...	...
40	Пакистан	4

Основной технологический прогресс делается сейчас в сфере термопластичных матриц, имеющие низкую вязкость при нагревании, обеспечивающую минимальную пористость и качественную адгезию к волокнам. Предлагается использовать весь спектр химических и физических видов активации поверхности волокон, включая травление, выращивание нанотрубок, плазменную обработку и др. Для авиационных деталей сложной

формы предложено использовать горячее прессование хаотически уложенных коротких лент (ROS – randomly oriented strand) из однонаправленного углепластика с термопластичной матрицей [11].

Основными проблемами, сдерживающими прогресс РФ в данных технологиях, являются слабая база фундаментальных знаний о причинах и методах коррекции нестабильностей свойств конструкционных композитных материалов, в частности:

1) плохая адгезия частиц наполнителя к полимерной матрице, что при эксплуатации изделия приводит к деструкции композита;

2) неоднородность физико-механических свойств композита по объему, вследствие неупорядоченного расположения наполнителя в полимерной матрице и не регламентированного значения варьирования размеров агломератов наполнителя;

3) большие размеры агломерированных частиц наполнителя (100–400 мкм), что снижает качество окончательной поверхности, формируемой после финишной механической обработки – образование кратеров, вследствие деструкции частиц из матрицы, существенная переменность показателей шероховатости поверхности и др.

В соответствии с данными Scopus на период 2000–2012 гг., в мировом рейтинге научных исследований в области получения композитных материалов, моделирования их структуры, исследования проблем прочности и др. РФ занимает лишь 17 место (табл. 2).

Научные центры – лидеры в фундаментальных и прикладных исследованиях в этом направлении представлены в табл. 3.

Существующее противоречие между 9 местом РФ в области технологических процессов формообразования изделий из конструкционных композитных материалов и 17 местом в мировом рейтинге научных исследований в области получения композитных материалов, моделирования их структуры, исследования проблем прочности и др. объясняется тем, что практически 90 % технологических процессов формообразования изделий из конструкционных композитных материалов в РФ оснащаются импортным оборудованием, поставляемым с технологией под изготовление конкретного изделия. В свою очередь, применение данного оборудования ставит жесткие требования по структуре и свойствам конструкционных композитных материалов, что приводит к импортозависимости и по самим материалам.

Мировая практика показывает, что отмеченные недостатки составов и строения композитов, в настоящее время довольно успешно решаются путем введения в них наночастиц. Это позволяет создавать композиты и конструкции из них с новыми свойствами [12, 13]. Появляется возможность управлять такими важными характеристиками материала, как прочность, износостойкость, теплопроводность, влагопоглощение и т. д. Помимо кон-

струкционного нанокompозита, путем введения определенных наночастиц в полимерную матрицу можно получить функциональные нанокompозиты, например, меняющие электрические свойства под действием внешних нагрузок, изменения температуры и др. Это уникальное свойство может быть использовано, как составная часть полимерного нанокompозита, отвечающая за его функциональные свойства.

Таблица 2

Распределение количества научных публикаций  
в области получения композитных материалов, моделирования их  
структуры, исследования проблем прочности

№ п/п	Страна	Количество публикаций в 2012 г.
1	США	214
2	Китай	128
3	Япония	41
...	...	...
17	Российская Федерация	7

Таблица 3

Мировой рейтинг научных центров в области получения композитных  
материалов, моделирования их структуры, исследования проблем прочности и др.

№ п/п	Организация	Количество публикаций в 2012 г.
1	Harbin Institute of Technology	10
2	Texas A and M University	10
3	Korea Advanced Institute of Science & Technology	10
...	...	...
9	Massachusetts Institute of Science & Technology	6
...	...	...
40	National Institute of Advanced Industrial Science and Technology	4

Таким образом, формируется новый класс композитных материалов – конструкционный многофункциональный композитный наноматериал

Анализ тенденции исследований в области многофункциональных композитных наноматериалов, показывает экспоненциальное возрастание их числа, что говорит об актуальности данного направления (рис. 2).

В тройку лидеров входит США, Китай и Индия, а Россия в этом списке не представлена (табл. 4).

Разработка конструкционного многофункционального композитного наноматериала и развитие аддитивных технологий потребует исследований в области технологий локальной деструктивной обработки изделий из нанокompозитов – высокоточной размерной обработки поверхностей изделий из нанокompозитов.

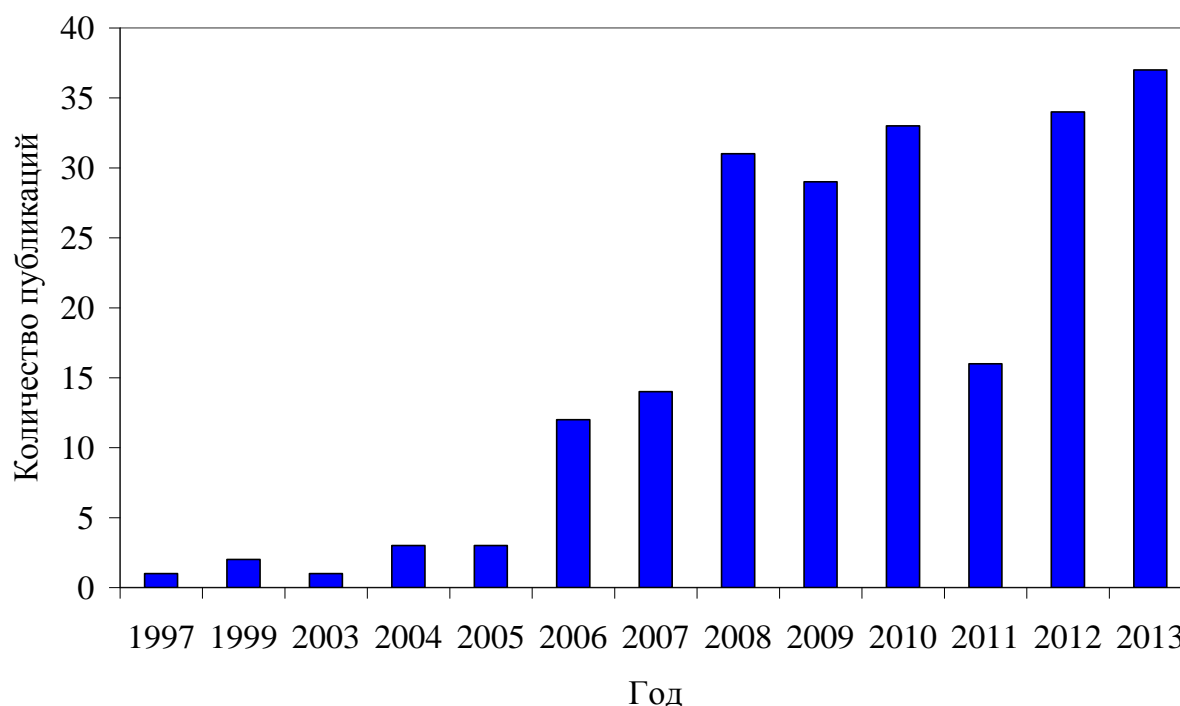


Рис. 2. Тенденция научных исследований в области многофункциональных композитных наноматериалов

Таблица 4

Распределение научных исследований в области многофункциональных композитных наноматериалов по странам

№ п/п	Страна	Количество публикаций в 2012 г.
1	США	55
2	Китай	49
3	Индия	17
4	Южная Корея	16
5	Германия	14
6	Испания	13
7	Япония	11
8	Италия	8
9	Франция	8
10	Великобритания	5
...	...	...
33	Вьетнам	1

Актуальность данных исследований обусловлена тем, что имеющийся опыт применения технологии для стандартных конструкционных сталей и сплавов при обработке композитов показывает полную его неработоспособность [1, 2].

Можно выделить основные недостатки существующих технологий механической обработки изделий из нанокompозитов:

1. Интенсивный износ (разрушение) режущего инструмента, вследствие неоднородной структуры композита (недостатки составов и технологии получения композитов) и интенсивной активации химических процессов образования твердых углеродных соединений в зоне деформации. Последнее особенно характерно для процессов абразивной обработки, характеризующихся высокой температурой, скоростью и степенью деформации.

2. Неоднородность физико-механических свойств композита по объему, не регламентированное значение варьирования размеров наполнителя приводят к ударным нагрузкам на режущий инструмент и в целом на технологическую систему. Это приводит к усталостному разрушению режущей кромки инструмента, к возникновению в поверхностном слое композита знакопеременных остаточных напряжений, а в ряде случаев полной деструкции композита от основного материала изделия [14].

3. Используемые композитные материалы имеют низкий порог теплоустойчивости, что вызывает деструкцию полимерного связующего при резании. Деструкция происходит за счет действия больших локальных напряжений и высокой температуры, превышающей теплостойкость полимера, при этом происходит выгорание связующего и на поверхности обработанной детали появляются дефекты.

4. Композитные материалы имеют низкую теплопроводность, что существенно влияет на соотношение составляющих общего теплового баланса. Так, теплопроводность композитного материала в основном составляет 0,14–0,8 Вт/м·К, что в несколько сот раз ниже чем у металлов. Это обуславливает слабый отвод теплоты со стружкой и вглубь обрабатываемой заготовки, поэтому основная доля теплоты при обработке композита отводится через режущий инструмент.

Таким образом, для создания опережающего научно-технического задела Российской Федерации в области формообразования изделий с заданными эксплуатационными свойствами необходимо решить крупную проблему, связанную с разработкой отечественных конструкционных многофункциональных композитных наноматериалов. Это в свою очередь позволит достичь существенного развития отечественных аддитивных технологий формообразования и локальной деструктивной обработки изделий из нанокompозитов.

#### Библиографический список

1. Дьяконов, А.А. Анализ механики микрорезания и дисперсной структуры металлополимеров / А.А. Дьяконов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2013. – № 1(297). – С. 83–88.

2. Дьяконов, А.А. Особенности обработки резанием металлополимеров / А.А. Дьяконов, А.А. Кошин // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2013. – № 11(29). – С.14–18.
3. Komanduri, R. Machining of Fiber Reinforced Composite / R. Komanduri // Mechanical Engineering. – 1993. – V.115(4). – Pp. 58–66.
4. Wang, X.M. An experimental investigation into the orthogonal cutting of unidirectional fibre reinforced plastics / X.M. Wang, L.C. Zhang // International Journal of Machine Tools & Manufacture. – 2003. –V. 43. – Pp. 1015–1022.
5. Шмидт, И.В. Напряженное состояние полимерно-композитной слоистой системы при механической обработке резанием / И.В. Шмидт // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2013. – № 7. – С. 27–31.
6. Кошин, А.А. Модель нагрева заготовки при шлифовании слоистой полимерно-композитной системы / А.А. Кошин, И.В. Шмидт // Фундаментальные проблемы техники и технологии. – 2011. – № 2/3. – С. 52–57.
7. Сапожников, С.Б. МКЭ моделирование силовых композитных обшивок транспортных средств / С.Б. Сапожников, А.А. Шакиров, Р.Р. Абдрахимов // Вестник ЮУрГУ. Серия: «Машиностроение». – 2013. – № 2. – Т. 13. – С. 58–62.
8. Сапожников, С.Б. Особенности разрушения пластины из хрупкого материала при взаимодействии с ударником / С.Б. Сапожников, О.А. Кудрявцев // Вестник ЮУрГУ. Серия: «Математика. Механика. Физика». – 2012. – № 34. – С. 177–181.
9. Сапожников, С.Б. Использование композитных материалов на основе поликарбоната в защитных структурах / С.Б. Сапожников, А.А. Левинский // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Машиностроение». – 2012. – № 12(271). – С. 187–193.
10. Кошин, А.А. Систематика ремонтных полимерно-композитных материалов / А.А. Кошин, И.В. Шмидт // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2010. – № 5. – С. 39–44.
11. Сапожников, С.Б. 19-я международная конференция по композитным материалам (ICCM-19) / С.Б. Сапожников // Композиты и наноструктуры. – 2013. – № 4. – С. 58–72.
12. Абдрахимов, Р.Р. Исследование реологии суспензий для эффективного диспергирования многостенных углеродных нанотрубок в эпоксидной смоле / Р.Р. Абдрахимов, С.Б. Сапожников, В.В. Сеницын // Вестник ЮУрГУ. Серия: «Математика. Механика. Физика». – 2012. – № 34. – С. 68–74.
13. Форенталь, Г.А. Оценка упругих и прочностных свойств эпоксидного композита, наполненного наночастицами оксида кремния / Г.А. Форенталь, С.Б. Сапожников // Композиты и наноструктуры. – 2011. – № 2. – С. 21–27.
14. Щуров, И.А. Моделирование процесса резания заготовок из композитных материалов с применением метода конечных элементов / И.А. Щуров, И.С. Болдырев // Вестник ЮУрГУ. Серия: «Машиностроение». – 2012. – № 12(271). – С. 143–147.

[К содержанию](#)