

## НАПРАВЛЕННОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОЛИМЕРМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Т. П. Устинова, Ю. А. Кадыкова

*Кафедра «Химические технологии», Энгельский технологический институт  
(филиал) ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический  
университет имени Ю. А. Гагарина», г. Энгельс; xt.techn.sstu@yandex.ru*

**Ключевые слова:** альтернативные технические решения наполнения; межфазное взаимодействие; модификация армирующих систем; полимерные композиционные материалы; прогнозируемые качественные характеристики.

**Аннотация:** Показана возможность направленного регулирования межфазного взаимодействия при армировании эпоксидных матриц модифицированными новолакми поликапроамидными нитями, а также никельсодержащими полиакрилонитрильными волокнами при получении полимерматричных композиционных материалов с прогнозируемыми эксплуатационными свойствами. Подтверждена эффективность методов полимеризационного (для системы полиамидная матрица – технический полиакрилонитрильный жгут) и поликонденсационного (на основе полипропиленовых и базальтовых нитей и фенолформальдегидной матрицы) совмещений компонентов при разработке композитов с повышенными механическими и функциональными свойствами.

---

На современном этапе одним из критериев оценки конкурентоспособности экономики страны и определяющим фактором ее экономической независимости являются объемы и эффективность использования полимерных материалов.

Особое место среди полимерных материалов занимают полимерматричные композиты (ПМКМ), расширяющиеся области применения которых ставят задачи по разработке данных материалов нового поколения, удовлетворяющих требованиям инновационной экономики, что может быть достигнуто направленным регулированием процессов, происходящих на границе раздела фаз в системе полимерная матрица – наполнитель, путем химической, физико-химической или физической модификации исходных составляющих.

В работе для получения эпоксидных композитов с повышенными деформационно-прочностными характеристиками использовали поликапроамидные (ПКА) технические нити, модифицированные новолачным фенолформальдегидным олигомером [1] и отличающиеся повышенными адгезионными свойствами (угол смачивания эпоксидным связующим увеличивается с 5 до 9°).

При химической модификации волокнистого наполнителя часть новолача связывается поликапроамидом, что приводит к повышению жесткости молекулярной цепи за счет образования в полиамиде «квасисетчатой» структуры, в результате чего уменьшается сегментальная подвижность, увеличивается температура стеклования, возрастает энергия активации сегментального движения и увеличи-

вается модуль упругости волокна с 4,2 до 7,0 ГПа. Та часть новолака, которая не вступает в химическое взаимодействие и не образует сетчато-пространственных структур, служит своего рода наполнителем аморфных областей поликапроамида. Выступая как антиоксидант фенольного типа, новолак является также стабилизатором ПКА.

При формировании композита на основе модифицированных новолакком ПКА нитей создаются условия для взаимодействия химически не связанного новолака, распределенного в аморфных областях ПКА нити, с диффундирующим в эти области эпоксидным олигомером, что приводит к образованию дополнительных сшивок. Это подтверждается значительным снижением количества выделяющихся газообразных продуктов разложения ПМКМ и повышением температуры их выделения (табл. 1) и проявляется в тенденции к повышению степени отверждения и увеличению прочностных свойств (табл. 2) и термостойкости композита на 40 °С.

Сравнительный анализ физико-механических свойств ПМКМ на основе исследуемых нитей (см. табл. 2) свидетельствует о том, что использование в качестве армирующей системы ПКА нити, модифицированной новолакком, приводит к повышению разрушающего напряжения при растяжении (~15 %), сжатии (~60 %) и жесткости композита, характеризуемой модулем упругости (~40 %) [2].

Введение в эпоксидное связующее полиакрилонитрильного (ПАН) волокнистого наполнителя, модифицированного методом инклюдации солей металлов [3], перспективно для получения композиционных материалов, обладающих *антистатистическими и электропроводящими свойствами* [3, 4].

Таблица 1

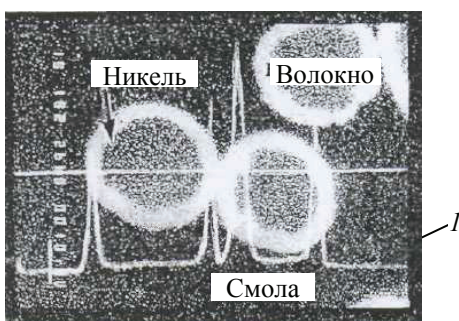
**Выход летучих продуктов из ПКА нитей и ПМКМ на их основе  
(данные ступенчатой пиролизной газовой хроматографии)**

Материал	T, °C	Выход, мг/мг			
		CO	NH <sub>3</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
Незаполненная эпоксидная смола ЭД-20	300	3,00	2,48	—	1,47
	350	20,17	17,47	Следы	21,49
	400	15,96	15,10	4,52	10,33
	500	36,63	16,31	9,36	20,08
ПКМ на основе немодифицированной ПКА нити	300	—	—	—	Следы
	350	10,40	13,03	Следы	69,04
	400	30,27	30,68	22,13	115,24
	500	40,36	23,59	22,56	114,52
ПКМ на основе модифицированной новолакком ПКА нити	300	—			18,19
	350	—			26,79
	400	Следы			44,89

Таблица 2

**Основные свойства эпоксидных ПМКМ на основе исследуемых ПКА нитей**

Армирующая система	Разрушающее напряжение, МПа, при				Модуль упругости, ГПа	Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>
	растяжении	изгибе	сжатии	сдвиге		
Нить исходная	190	90	200	20	3,0	600
Нить, модифицированная новолакком	306	51	325	22	5,9	740



**Рис. 1. Данные электронной растровой микроскопии с микрозондным анализом ПКМ на основе никельсодержащих ПАН-волокон**

При введении в композицию на основе ЭД-20 никельсодержащих волокон удельное объемное электрическое сопротивление полимерного композиционного материала снижается на пять-семь порядков в зависимости от содержания волокна в ПКМ. Значительное повышение электропроводности композиционного материала при небольшом содержании никеля в структуре волокна обеспечивается особенностями его распределения в волокне.

Методом электронной растровой сканирующей микроскопии показано, что при модифицировании волокон

инклюдированием никель распределяется преимущественно по поверхности волокна сплошным слоем (рис. 1). Об этом же свидетельствуют результаты микрозондного анализа: интенсивность спектра никеля (см. рис. 1, кривая *I*) возрастает на границе полимерная матрица – волокно и снижается практически до исходного состояния в центре волокна. Сосредоточение никеля у поверхности волокна и равномерное распределение волокна в объеме композиционного материала обеспечивает достаточно высокую электропроводимость таких материалов даже при незначительном содержании металла (табл. 3). Для разработанного эпоксидного композита характерно значительное снижение объемного электрического сопротивления, что свидетельствует о придании ему антистатических свойств.

Создание современных ПМКМ функционального назначения требует альтернативных технических решений их получения, в качестве которых предложена разработанная в Саратовском государственном техническом университете технология синтеза композиционного материала с использованием методов поликонденсационного или полимеризационного совмещения компонентов [5 – 8], относящихся к высокоэффективным, ресурсосберегающим технологическим процессам и характеризующихся сокращенным производственным циклом, меньшим износом оборудования и энергоемкостью, а также меньшей экологической напряженностью.

Таблица 3

**Основные свойства эпоксидных ПКМ на основе модифицированного ПАН-волокна**

Армирующая система	Разрушающее напряжение, МПа, при		Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	Водопоглощение, %	Удельное объемное электрическое сопротивление Ом·м	Электрическая прочность, кВ/мм
	растяжении	изгибе				
Волокно стандартное	59	89	–	0,3	$1,9 \cdot 10^{11}$	15
Модифицированное никелем	42	69	20	0,7	$4,6 \cdot 10^2$	>3

Сущность этих методов заключается в том, что совмещение армирующих волокон проводят с наноконпонентами-мономерами, и синтез связующего проходит на поверхности и в структуре волокна при повышенных температурах и нормальном давлении, т.е. обработка армирующих химических волокон наноконпонентами способствует их глубокой диффузии в структуру волокна через поры, капилляры и дефекты, что обеспечивает при синтезе образование полимерной матрицы как в объеме волокна, так и на его поверхности. В результате формируется композиционный материал особой структуры, обладающий повышенными физико-механическими свойствами.

Эффективность методов поликонденсационного и полимеризационного наполнения определяется как минимум двумя факторами:

- использованием наноразмерных компонентов-мономеров на стадии их совмещения с волокнистым наполнителем;
- активным влиянием модифицированных армирующих систем на формирование надмолекулярной структуры термопластичной или термореактивной матрицы на наноуровне.

В результате существенно облегчается процесс совмещения компонентов и повышается возможность химического взаимодействия между ними, обеспечивается равномерное распределение наполнителя в полимерной матрице и появляется возможность увеличения его содержания в композите (40...80 %) путем регулирования толщины прослойки полимера между частицами наполнителя, что создает условия для повышения эксплуатационных свойств синтезируемого композиционного материала.

Методом полимеризационного наполнения получен ПМКМ *технического назначения с повышенной термо- и теплостойкостью* [9] на основе термопластичного полимера – полиамида 6 (**ПА 6**) и технического полиакрилонитрильного жгутика (**ПАН-ТЖ**), используемого в качестве прекурсора в производстве углеродных волокнистых материалов. Изучение химического состава полимеризационно наполненного ПА6/ПАН-ТЖ с помощью термогравиметрического анализа (**ТГА**) подтвердило циклизацию ПАН-ТЖ в условиях синтеза полиамидной матрицы, что обеспечило большую устойчивость композита к повышенным температурам (рис. 2) и большую теплостойкость (рис. 3) при увеличении твердости материала на 15...20 %.

Использование в технологии ПМКМ физически модифицированных нитей различной химической природы: органических – полипропиленовых (**ПП**), и неорганических – базальтовых волокон (**БВ**), отличающихся повышенными

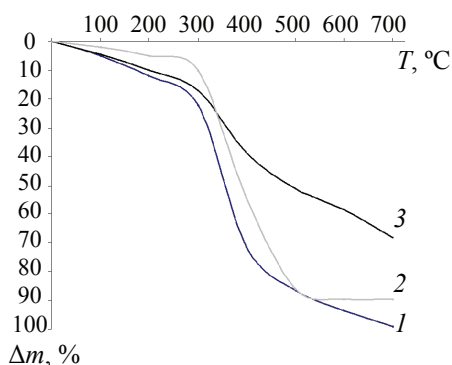


Рис. 2. Данные ТГА:  
1 – ПА 6; 2 – ПА 6 + 10 % ПАН-ТЖ;  
3 – ПА 6 + 40 % ПАН-ТЖ

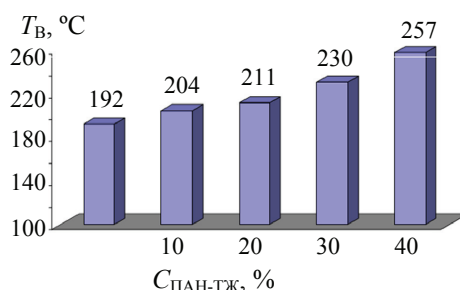


Рис. 3. Зависимость изменения  
теплостойкости по Вика ( $T_b$ )  
от содержания ПАН-ТЖ

Таблица 4

**Функциональные свойства катионообменных композиционных материалов на основе модифицированных полипропиленовых и базальтовых волокон, полученных методом поликонденсационного наполнения**

Волокнистый наполнитель	Удельный объем в Н-форме, см <sup>3</sup> /г	Полная статическая обменная емкость, мг-экв/г	Динамическая обменная емкость, моль/м <sup>3</sup>	Окисляемость фильтра в пересчете на O <sub>2</sub> , мг/г	Осмотическая стабильность, %
Требования ГОСТ 20198–74	3,2	1,35	565	1,80	92,0
Криообработанная профилированная ПП-нить	1,0	2,20	1190	1,60	99,0
Термо- и СВЧ-обработанное БВ	4,4	2,70/3,20*	920	1,85	99,0

\* При использовании матрицы, модифицированной фенольной смолой – отходом производства [12].

адгезионными свойствами, на стадии синтеза катионообменной фенолформальдегидной матрицы позволяет значительно повысить функциональные характеристики получаемого катионита [10, 11], что подтверждают данные табл. 4.

Для катионита на основе термо- и СВЧ-модифицированного базальтового волокна разработана принципиальная технологическая схема его получения, проект технологического регламента предлагаемой технологии и технические условия на разработанный материал, получен сертификат соответствия на партию катионита, синтезированного методом поликонденсационного совмещения компонентов [13 – 15].

Применение метода поликонденсационного наполнения для создания ПМКМ на основе базальтовых нитей и фенолформальдегидного связующего позволяет [16, 17] значительно повысить весь комплекс физико-химических и механических характеристик получаемых базальтопластиков по сравнению с ПМКМ, полученными по традиционной технологии путем пропитки нитей готовым фенолформальдегидным олигомером (табл. 5).

Таблица 5

**Сравнительные характеристики полимерматричных композитов на основе базальтовых нитей**

Технология получения препрега	Твердость по Бринеллю, МПа	Разрушающее напряжение при сдвиге, МПа	Разрушающее напряжение при изгибе, МПа	Модуль упругости при изгибе, ГПа	Водопоглощение при двухчасовом кипячении, %
Поликонденсационный способ совмещения компонентов	475	19	450	45	0,24
Традиционный метод	418	15	364	37	0,38

Примечание: Соотношение волокна и фенолформальдегидного связующего 50...55 % масс.

Важным показателем разработанных материалов является высокая устойчивость к горению: показатель воспламеняемости – кислородный индекс для базальтопластиков составляет более 50 % об. При поджигании на воздухе образцы не поддерживают горения и такие материалы относятся к трудносгораемым. Разработанные базальтопластики нетоксичны, так как при исследовании на газовом хроматографе «Кристалл» (Россия) свободного фенола не выявлено. Разработанные полимерматричные композиты, полученные из препрегов, сформированных поликонденсационным способом совмещения компонентов в обычных условиях, нетоксичны, что весьма перспективно для расширения областей их применения.

Таким образом комплексные исследования по созданию ПМКМ на основе приоритетных видов промышленных термо- и реактопластов как связующих и модифицированных химических волокон в качестве армирующих систем с использованием методов полимеризационного и поликонденсационного совмещения компонентов позволили разработать полимерматричные композиционные материалы с прогнозируемыми эксплуатационными свойствами.

#### *Список литературы*

1. А.с. 678088 СССР, МКИ<sup>2</sup> C08 L 61/10. Способ получения полиамидной композиции / В. Н. Степанов, А. А. Сперанский, В. Ф. Ледник, А. И. Лубина. – № 2561344/23-05; заявл. 29.12.77; опубл. 25.09.79, Бюл. № 35. – С. 111.
2. А.с. 786305 СССР, МКИ<sup>3</sup> C08 L 63/02. Органопластик / С. Е. Артеменко, Т. П. Устинова, С. Г. Кононенко. – № 2729605/23-05; заявл. 20.02.79; опубл. 7.08.80, Бюл. № 45. – С. 34.
3. Артеменко, С. Е. Электропроводящие полимерные композиционные материалы / С. Е. Артеменко, Т. П. Устинова, Л. П. Никулина // Пласт. массы. – 1990. – № 3. – С. 71 – 72.
4. Металлизированные полиакрилонитрильные волокна – армирующий наполнитель электропроводящих полимерных композиционных материалов / С. Е. Артеменко [и др.] // Хим. волокна. – 1992. – № 4. – С. 39 – 41.
5. А.с. 1616930 СССР, МКИ<sup>5</sup> C08 G8/28. Способ получения пресс-материала / С. Е. Артеменко, М. М. Кардаш, Т. П. Титова. – № 4286818/23-05; заявл. 20.07.87; опубл. 30.12.90, Бюл. № 48. – С. 86.
6. Пат. 2276676 Российская Федерация, МКП C08J005/04, C08L061/10, C08K007. Способ получения полимерной пресс-композиции / С. Е. Артеменко, Ю. А. Кадыкова, О. Г. Васильева, ГОУ ВПО Саратов. гос. техн. университет. – № 2004135971/04; заявл. 08.12.2004; опубл. 20.05.2006, Бюл. № 14. – 5 с.
7. Пат. 2447103 Российская Федерация. Композиция для получения катионообменного волокнистого материала / В. А. Александров, Т. П. Устинова, С. Е. Артеменко, Д. П. Влазнев, ФГБОУ ВПО «Сарат. гос. техн. университет им. Ю. А. Гагарина»; опубл. 10.04.2012, Бюл. № 10. – 4 с.
8. Артеменко, С. Е. Структура и свойства полимеризационно наполненного поликапроамида / С. Е. Артеменко, Т. П. Устинова, М. Ю. Морозова // Хим. волокна. – 1998. – № 4. – С. 17 – 19.
9. Исследование процессов полимеризационного наполнения полиамида 6 на основе волокнисто-дисперсных систем / Т. П. Устинова [и др.] // Хим. волокна. – 2008. – № 3. – С. 80 – 82.
10. Щелокова, А. В. Ионнообменные композиционные материалы на основе модифицированных полипропиленовых нитей / А. В. Щелокова, Т. П. Устинова, Е. И. Титоренко // Пласт. массы. – 2006. – № 5. – С. 50 – 52.
11. Исследование структурных особенностей и эксплуатационных свойств полимерного катионообменного композиционного материала на основе модифи-



цированных базальтовых волокон / В. А. Александров [и др.] // Изв. высш. учеб. заведений. Химия и химическая технология. – 2011. – Т. 54, № 1. – С. 51 – 53.

12. Пат. 2524393 Российская Федерация, C08L61/10, C08L61/04, C08J5/20, C02F1/42. Композиция для получения катионообменного волокнистого материала / В. А. Александров, Т. П. Устинова., В. В. Варюхин, Н. А. Пенкина, Р. М. Розов, ФГБОУ ВПО «Сарат. гос. техн. университет им. Ю. А. Гагарина»; заявл. 09.01.2013; опубл. 27.07.2014, Бюл. № 21. – 8 с.

13. Технологический регламент получения катионообменного композиционного материала на основе модифицированных базальтовых волокон / Энгельс. технол. ин-т (филиал) Сарат. гос. техн. ун-та. – Энгельс : [б. и.], 2011. – 14 с.

14. Катионообменные композиционные материалы на основе модифицированных базальтовых волокон : ТУ 2227-002-05286136-2011 : утв. директором ЭТИ (филиал) СГТУ имени Гагарина Ю. А. : ввод в действие с 25.01.2011. – Энгельс : Изд-во ЭТИ (филиал) СГТУ, 2011. – 16 с.

15. Катионообменные композиционные материалы на основе модифицированных базальтовых волокна марки К-БВ : сертификат соответствия № РОСС RU.АЮ17. С 06438 от 19.04.2011; выдан ОС № РОСС.0001.АЮ17 ООО «Саратовский центр сертификации и менеджмента». – 2011. – 1 с.

16. Артеменко, С. Е. Физико-химические основы технологии базальтопластиков. Структура и свойства : монография / С. Е. Артеменко, Ю. А. Кадыкова. – Саратов : Сарат. гос. техн. ун-т, 2012. – 144 с.

17. Кадыкова, Ю. А. Полимерный композиционный материал конструкционного назначения, армированный базальтовым волокном / Ю. А. Кадыкова // Журн. прикладной химии. – 2012. – Т. 85, № 9. – С. 1523 – 1527.

---

## Guided Control of the Structure and Properties of Polymer Matrix Composite Materials

T. P. Ustinova, Yu. A. Kadykova

*Engels Technological Institute (Branch) Yuri Gagarin Saratov State Technical University, Engels; xt.techn.sstu@yandex.ru*

**Keywords:** alternative solutions of filling; interfacial interaction; modification of reinforcing systems; polymeric composites; predictable qualitative characteristics.

**Abstract:** We show the possibility of guided control of interfacial interaction in the reinforcement of epoxy matrices modified with novolaks, polycaproamide filaments, and nickel-containing acrylic fibers in the preparation of polymer matrix composite materials with predictable performance characteristics. The effectiveness of the method of polymerization (for polyamide matrix / technical polyacrylonitrile flagellum system) and polycondensation superimpositions of components (based on polypropylene and basalt fibers and phenol-formaldehyde matrix) in the development of composites with improved mechanical and functional properties was verified.

### References

1. Stepanov V.N., Speranskii A.A., Lednik V.F., Lubinina A.I. *Sposob polucheniya poliamidnoi kompozitsii* (A process for preparing a polymer composition), USSR, 1979, Certificate of authorship 678088.

2. Artemenko S.E., Ustinova T.P., Kononenko S.G. *Organoplastik* (Organoplastic), USSR, 1980, Certificate of authorship 786305.
3. Artemenko S.E., Ustinova T.P., Nikulina L.P. *International Polymer Science and Technology*, 1990, no. 3, pp. 71-71.
4. Artemenko S.E., Nikulina L.P., Ustinova T.P., Akbarov D.N., Krainov E.P., Dubkova V.I. *Fibre Chemistry*, July 1993, vol. 24, issue 4, pp. 300-303.
5. Artemenko S.E., Kardash M.M., Titova T.P. *Sposob polucheniya press-materiala* (A method for producing a press material), USSR, 1990, Certificate of authorship 1616930.
6. Artemenko S.E., Kadykova Yu.A., Vasil'eva O.G., Ezhov A.A., Firsova T.D., Tsubulya Yu.L., Saratov State Technical University; *Sposob polucheniya polimernoi press-kompozitsii* (A process for preparing a polymer molding composition), Russian Federation, 2006, Pat. 2276676.
7. Aleksandrov V.A., Ustinova T.P., Artemenko S.E., Vlaznev D.P., Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin; *Kompozitsiya dlya polucheniya kationoobmennogo voloknistogo materiala* (A composition for producing a fibrous cation exchange material), Russian Federation, 2012, Pat. 2447103.
8. Artemenko S.E., Ustinova T.P., Morozova M.Yu. *Fibre Chemistry*, July 1998, vol. 30, issue 4, pp. 226-229.
9. Ustinova T.P., Morozova M.Yu., Levkina N.L., Suschenko N.S. *Fibre Chemistry*, May 2008, vol. 40, issue 3, pp. 278-280.
10. Shchelokova A.V., Ustinova T.P., Titorenko E.I. *International Polymer Science and Technology*, 2006, no. 5, pp. 50-52.
11. Aleksandrov V.A., Ustinova T.P., Penkina N.A., Vlaznev D.P. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy Seriya "Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya"*, 2011, vol. 54, no. 1, pp. 51-53.
12. Aleksandrov V.A., Ustinova T.P., Varyukhin V.V., Penkina N.A., Rozov R.M., Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin; *Kompozitsiya dlya polucheniya kationoobmennogo voloknistogo materiala* (A composition for producing a fibrous cation exchange material), Russian Federation, 2014, Pat. 2524393.
13. Engels Technological Institute (branch) of Saratov State Technical University, *Tekhnologicheskii reglament polucheniya kationoobmennogo kompozitsionnogo materiala na osnove modifitsirovannykh bazal'tovykh volokon* (Production schedules produce cation exchange composite material based on modified basalt fiber), Engels, 2011, 14 p.
14. Direktorom ETI (filial) Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin. *Kationoobmennyye kompozitsionnyye materialy na osnove modifitsirovannykh bazal'tovykh volokon* : TU 2227-002-05286136-2011 (Cation exchange composite materials based on modified basalt fiber: Technical conditions 2227-002-05286136-2011, Engels: Izdatel'stvo ETI (filial) SGTU, 2011, 16 p.
15. Sertifikat sootvetstviya № ROSS RU.AYu17. C 06438 na partiyu kationoobmennogo kompozitsionnogo materiala na osnove modifitsirovannogo bazal'tovogo volokna marki K-BV ot 19.04.2011 (Certificate of Conformity № ROSS RU.AYu17. C 06 438 for a batch cation exchange composite material based on basalt fiber modified the brand K-BV on 19.04.2011).
16. Artemenko S.E., Kadykova Yu.A. *Fiziko-khimicheskie osnovy tekhnologii bazal'topla-stikov. Struktura i svoystva: monografiya* (Physical and chemical bases of technology of basalt. Structure and properties: monograph), Saratov: Saratovskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2012, 144 p.
17. Kadykova Yu.A. *Russian Journal of Applied Chemistry*, 2012, vol. 85, no. 9, pp. 1523-1527.



## Gerichtete Regelung der Struktur und der Eigenschaften der Polymermatrixkompositionsmaterialien

**Zusammenfassung:** Es ist die Möglichkeit der gerichteten Regelung der Zwischenphasenwechselwirkung bei der Bewehrung der Epoxidmatrizen von den modifizierten Neulacken, von den Polykaproamylfäden, sowie von den Polyacrylnitrilfasern beim Erhalten der Polymermatrixkompositionsmaterialien mit den vorhergesagten Betriebseigenschaften gezeigt. Es ist die Effektivität der Methoden der Polymerisationskongruenz der Komponenten (für das System die Polyamylmatrix / der technische Polyacrylnitrilkabel) und der Polykondensationskongruenz der Komponenten (auf Grund der Polypropylen- und Basaltfäden und der Phenolformaldehydmatrix) bei der Entwicklung der Verbundwerkstoffe mit den erhöhten mechanischen und funktionalen Eigenschaften bestätigt.

---

## Ajustement orientée de la structure et des propriétés des matériaux polymériques matriciels composites

**Résumé:** Est montrée la possibilité de l'ajustement orientée de l'interaction interphase lors du renfort des matrices époxy par des fils modifiés polynylonamides et autres lors de l'obtention des matériaux polymériques matriciels composites. Est prouvée l'efficacité des méthodes de la réunion des composants lors de l'élaboration des composites avec des propriétés mécaniques et fonctionnelles élevées.

---

**Авторы:** *Устинова Татьяна Петровна* – доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Химические технологии»; *Кадыкова Юлия Александровна* – доктор технических наук, профессор кафедры «Химические технологии», ЭТИ (филиал) ФГБОУ ВПО «СГТУ имени Гагарина Ю. А.», г. Энгельс.

**Рецензент:** *Баронин Геннадий Сергеевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Техническая механика и детали машин», ФГБОУ ВПО «ТГТУ».

---