

Наибольшее значение амплитуды переменных напряжений, до которого образцы не разрушались базовое число циклов (предел выносливости,  $\sigma_{-1}$ ) для стали 45 без покрытия составляет 275 МПа, а после поверхностного модифицирования сплавом с эффектом памяти формы TiNiTa – 427 МПа, т. е. увеличилось на  $\approx 35,6\%$ .

### **Выводы**

На основе анализа экспериментальных данных определены оптимальные режимы технологического процесса поверхностного модифицирования механически активированным порошком TiNiTa стали 45 при использовании высокоскоростного газопламенного напыления в защитной атмосфере. Определены режимы термомеханической обработки и степень восстановления формы наноструктурированного сплава TiNiTa. В результате многоцикловых испытаний на изгиб при вращении стали 45 ПМСЭПФ TiNiTa предел выносливости увеличился на 35,6%.

*Работа выполнена по проекту № 9.555.2014/К в рамках государственного задания при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ и гранта Президента РФ № МК-5017.2014.8.*

### **Список литературы**

1. Бледнова Ж.М., Будревич Д.Г., Махутов Н.А., Чаевский М.И. Поверхностное модифицирование материалами с эффектом памяти формы для получения разъемных соединений. - Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2002. – № 5. – С. 64-71.
2. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления: Учеб. пособие по курсу «Технология конструкций из металлокомпозитов». 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 360 с.
3. Zh.M. Blednova, P.O. Rusinov. Mechanical and Tribological Properties of the Composition “Steel - nanostructured Surface Layer of a Material with Shape Memory Effect Based TiNiCu” Applied Mechanics and Materials Vols. 592-594 (2014) pp 1325-1330.
4. Zh.M. Blednova, P.O. Rusinov, M.A. Stepanenko Influence of Superficial Modification of Steels by Materials with Effect of Memory of the Form on Wear-fatigue Characteristics at Frictional-cyclic Loading. Advanced Materials Research Vols. 915-916 (2014) pp 509-514.
5. Rusinov P.O., Blednova Zh.M., Chaevsky M.I. Options for Forming of Nanostructured Surface Coatings. Advanced Materials Research Vol. 1064 (2015) pp. 154-159.
6. P.O. Rusinov, Zh.M. Blednova. Technological Features of Obtaining of Nanostructured Coatings on TiNi Base by Magnetron Sputtering. Advanced Materials Research Vol. 1064 (2015) pp 160-164.

## **О ПЕРСПЕКТИВАХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕРМОПЛАСТКОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНТЕЙНЕРОВ ДЛЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ АЭС В БЕЛАРУСИ**

**Немцев В.А., Сорокин В.В., Степаненко В.Н., Телущенко Е.А.**

*ГНУ «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» НАН  
Беларуси, Минск, Беларусь  
[lab19@tut.by](mailto:lab19@tut.by)*

Термопласткомпозитные материалы состоят из связующего компонента – полимерного вещества (отходы полиэтилена и т.п.) и наполнителя (песок, бой стекла, древесные опилки и стружка и т.п.). Технология получения термопласткомпозитных материалов к настоящему времени достаточно изучена и отработана в Беларуси. Есть опыт изготовления шпал для рельсовых путей метрополитена, торфяных разработок, строительных

кранов, греющих плит и поилок в животноводстве, плиток напольных и облицовочных для различных производственных помещений. При производстве изделий используются технологии горячих пресс-форм и сварки частей конструкций.

В работе рассматривается перспектива размещения радиоактивных отходов АЭС в контейнерах из термопласткомпозитного материала. Радиоактивные отходы малого и среднего уровней активности помещаются в контейнер, закрываются крышкой, которая приваривается к корпусу контейнера. Интерес представляет надежность такой упаковки.

Выработка электроэнергии на атомной электростанции сопровождается образованием значительного количества разнообразных радиоактивных отходов. Их отличительной чертой является постоянная эмиссия ионизирующих излучений, представляющих угрозу здоровью людей и окружающей среде. Наиболее приемлемым способом обращения с отходами оказалось надежное изолированное ответственное хранение в течение не менее десяти периодов полураспада контролируемого изотопа. Материаловедческая часть вопроса оптимальной упаковки имеет большое значение. Классические материалы контейнеров имеют недостатки: бетон – проницаем, подвержен коррозии, пористый; металл – дорогой, подвержен коррозии; полимеры – деградируют под действием радиации, нетермостойкие. Вопросы поиска новых материалов стоят остро.

Рассмотрим термопласткомпозит, в состав которого входят полиэтилен и песок. Основные физико-механические характеристики материала приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. **Физико-механические характеристики материала**

Наименование объектов испытаний, показатели	Средние фактические значения показателя для образцов
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	1620
Модуль упругости, МПа	1610
Коэффициент Пуассона	0,39
Модуль сдвига, МПа	580
Предел прочности при сжатии, МПа	19,9
Предел прочности при изгибе, МПа	15,9
Водопоглощение по массе, %	0,6
Морозостойкость, циклы	500

Композит получают в два этапа. На первом размягченный за счет нагрева полимер смешивают с песком. На втором смесь прессуют и охлаждают в форме. Смешивание осуществляют в мешалке со шнеком и лопатками. Второй этап совмещают с изготовлением изделия. Преимуществами композита являются прочность, непроницаемость, коррозионная стойкость, технологичность, дешевизна. Возможные недостатки обусловлены содержанием полимера в составе композита, что может проявиться в ограниченной термо-, пожаро- и радиационной стойкости. Согласно требованиям безопасности (например, НП-019-2000, НП-020-2000, НП-055-04, ПНАЭ Г-14-038-96) названные факторы не являются запрещающими.

Для исследования радиационной стойкости композита образцы материала облучали гамма-квантами. Определяли изменение механической прочности образцов в зависимости от дозы облучения. Были изготовлены 3 партии материала с соотношением полиэтилена и песка 20 : 80; 30 : 70 и 40 : 60. Образцы вырезали механически из цельной пластины материала. В качестве показателя прочности выбрали измеряемую максимальную нагрузку, разрушающую образец, и вычисленное напряжение (предел прочности) при этой нагрузке по ГОСТ 10180-90.

Облучение образцов материала проводилось на изотопной промышленной гамма-установке УГУ-420 ОИЭЯИ-Сосны с общей активностью источника 200 ККи (изотоп Со-60, гамма-кванты 2,5 МэВ). Параметры облучения: мощность дозы облучения: 1,0–1,4 Грей/с; температура облучения: 20 – 25 °С; график облучения: сутки облучения с перерывами до шести суток. Дозы рассчитаны по методикам УГУ-420. Данные приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Зависимость прочности от дозы облучения

Время, час (доза облучения, $10^4$ Гр)	Прочность, МПа	Соотношение полиэтилена и песка		
		20 : 80	30 : 70	40 : 60
0(0) необлученные образцы	на сжатие	21,3	20,4	30,7
	на изгиб	26,5	18,7	24,7
60(20)	на сжатие	22,60	22,8	24,6
	на изгиб	27,4	22,8	27,8
170(56)	на сжатие	25,0	23,9	32,3
	на изгиб	28,0	22,2	29,1
200(92)	на сжатие	28,8	26,9	28,8
	на изгиб	22,8	19,8	24,4

Для образцов композита состава 20:80 зависимости прочности на изгиб ( $I$ ), прочности на сжатие ( $C$ ) от поглощенной дозы  $D$  приведены на рисунке. Прочность на сжатие под действием облучения возрастает, на изгиб сначала возрастает, затем снижается до уровня ниже начального. Параметры прочности не ухудшаются при дозах менее 800 КГр.

Без учета поглощения и вторичного излучения поток фотонов в эксперименте составит  $1,45 \text{ МКи} \cdot \text{сут}/\text{м}^2$  (800 КГр), а от куба объемом 180 л отходов с активностью 1 Ки/л мощность потока  $94,7 \text{ Ки}/\text{м}^2$ , тогда поток фотонов от отходов, равный экспериментальному будет получен за 41 год. Обычно активность отходов составляет 0,001–0,0001 Ки, следовательно, долговечность композитного материала контейнера будет не менее 1000 лет. Таким образом, материал пригоден для применения в устройствах не только хранения, но и захоронения отходов в части радиационной стойкости.

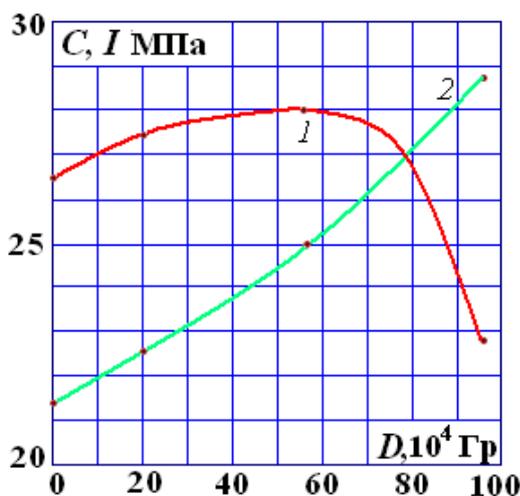


Рис.1. Зависимость прочности материала от поглощенной дозы:  
1 – прочность на изгиб; 2 – прочность на сжатие

Для реализации технологии предполагается создать производственный объект, который будет включать в себя три основные технологические линии, имеющие возможность работать как параллельно, так и независимо друг от друга:

- технологическая линия получения материала и производства из него контейнеров и крышек к ним;

- технологическая линия для осуществления энергосберегающей высокоэффективной технологии концентрирования (обезвоживания) ЖРО;

- технологическая линия автоматической загрузки в контейнер отходов и цемента, герметичной приварки крышки к корпусу контейнера и подготовки к отправке упакованных отходов на захоронение.

Заключение. Установлена перспективность технического решения по размещению радиоактивных отходов АЭС в контейнерах из термопласткомпозитного материала. Исследована радиационная стойкость термопласткомпозитного материала из песка и отходов полиэтилена. Установлено, что при дозах до 800 КГр от гамма-источника Co-60 прочность материала на изгиб и сжатие не ниже, чем у необлученного. В части радиационной стойкости материал пригоден для применения в устройствах хранения и захоронения отходов. Технология получения термопласткомпозитных материалов к настоящему времени изучена и отработана в Беларуси.

## УВЕЛИЧЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ СИЛУМИНА, ПОДВЕРГНУТОГО ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОЙ ОБРАБОТКЕ

Алсараева К.В.<sup>1</sup>, Громов В.Е.<sup>1</sup>, Коновалов С.В.<sup>1</sup>, Иванов Ю.Ф.<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>*Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия,*  
[gromov@physics.sibsiu.ru](mailto:gromov@physics.sibsiu.ru)

*Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск, Россия,*  
[yufi55@mail.ru](mailto:yufi55@mail.ru)

<sup>3</sup>*Научно-исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия*

**Введение.** В настоящее время в различных отраслях промышленности все большую популярность набирают алюминиевые сплавы, наиболее распространенным из которых является сплав алюминия с кремнием – силумин. Это связано с его относительно низкой стоимостью и относительно низким удельным весом. Однако у силуминов есть свой недостаток – сравнительно низкие прочностные свойства, что существенно сужает сферу их применения. Силумины практически не упрочняются термической обработкой, из-за малого различия по растворимости кремния при высокой и низкой температуре, поэтому важнейшим методом улучшения их механических свойств является модифицирование [1]. Эффективным методом указанной модификации является обработка поверхности материала высокоинтенсивным импульсным электронным пучком, позволяющая модифицировать структуру поверхностного слоя толщиной до десятков микрон, переводя его в мультимодальное структурно-фазовое состояние и практически не изменяя структурно-фазового состояния основного объема сплава [2]. Как показано в работах [3-5], формирование таких структурно-фазовых состояний поверхности способствует повышению усталостной долговечности сталей различных структурных классов в 2-3,5 раза.

Целью данной работы является исследование структурно-фазовых состояний, формирующихся в поверхностном слое силумина, подвергнутого облучению электронным пучком и многоцикловым усталостным испытаниям до разрушения.