

## РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ГАЗОТЕРМИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ, МОДИФИЦИРОВАННЫХ НАНОУГЛЕРОДНЫМИ КОМПОНЕНТАМИ

<sup>1</sup> Ванюк Э.А., <sup>1</sup> Соколов И.О., <sup>1</sup> Леванцевич М.А., <sup>2</sup> Газбан Задех Э.Х., <sup>3</sup> Куис Д.В.

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

<sup>2</sup>ИЧПТУП «Бел Пека Пэйнт»

e-mail: ehsanghazbanzadeh@gmail.com

<sup>3</sup>Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет»

**Summary.** *One of the main tasks in mechanical engineering is to reduce costs and increase the resource of parts of friction units. One of the ways to solve this problem is the application of thermal gas composite coatings. This research was carried out in the "Industrial research laboratory of plasma and laser technologies" (BNTU) to develop the technology for the introduction of nanocarbon components into self-fluxing alloys using thermal composite coatings. As a result, our work showed that the laser reflow of coatings with a 10% addition of nanocarbon components increases the microhardness up to 1.6 times, and also reduces the friction coefficient up to 5 times.*

В современном машиностроении постоянно повышаются требования к надежности и эффективности новых машин и механизмов, ресурсы работы которых во многом зависят от долговечности и безотказности разнообразных узлов трения. Такие узлы трения пытаются изготавливать из дорогостоящих легированных сталей, обработка которых энергозатратна (в Республике Беларусь такие детали являются статьей импорта).

Существуют различные способы повышения ресурса деталей машин в парах трения. Можно использовать втулки и вкладыши, которые участвуют в трибосопряжении с опорными поверхностями валов, однако, такие детали экономически не эффективно восстанавливать традиционными способами (наплавка, пластическая деформация, методы литья). Один из вариантов восстановления трибопары – изготовление новой детали, но здесь возникает дополнительная статья расхода на материал заготовки (отливки, поковки и прокат).

Одной из основных задач в машиностроении для научных работников, технологов и конструкторов является задача снижения затрат и повышение ресурса деталей узлов трения. Одним, если не основным, из способов решения этой задачи является нанесение газотермических композиционных покрытий (ГКП). Но и эта технология уже не новая и разработана еще в 80-х годах прошлого века, но в 90-х годах развитие этой технологии, на постсоветском пространстве, замедлилось. За рубежом данные технологии развивались стремительными темпами и на 2020 год все зарубежные установки снабжены программным обеспечением, что позволяет получать газотермические композиционные покрытия с высокими эксплуатационными характеристиками (здесь значительную роль также имеют новые порошковые материалы). Поэтому для создания конкуренции на рынке, необходимо усовершенствовать уже существующие порошковые материалы за счет внедрения новых композиционных материалов, в том числе наноматериалы, к таким материалам можно отнести и фуллерены.

В настоящий момент нет промышленных производств и технологий, в которых бы широко применялись фуллерены, в связи с тем, что они по-прежнему имеют высокую стоимость и под словом фуллерен обычно имеют в виду чистый C<sub>60</sub> и C<sub>70</sub>, либо смесь фуллеренов, забывая о том, что есть высшие фуллерены и другие углеродные наноборазования. Интересным заменителем фуллеренам является дуговая углеродная сажа, которая является более

дешевым материалом [1, стр. 245]. В такой саже кроме фуллеренов имеются другие нанокластерные углеродные структуры, так что такая сажа называется новым нанокластерным материалом [2, стр. 84].

На базе ОНИЛ «Плазменных и лазерных технологий» (БНТУ) разрабатываются технологии внедрения наноуглеродных компонентов в самофлюсующиеся сплавы и материалы для ГКП.

Проанализированы и выбраны методики и оборудование для подготовки образцов и проведения исследований. Изготовлены образцы, оснастка и приспособления для проведения исследований физико-механических свойств и эксплуатационных характеристик композиционных покрытий при добавке наноуглеродных компонентов в покрытия системы Ni-Cr-B-Cr, производился анализ изменений структурных составляющих поверхностных слоев, на основании анализа проведенных исследований, выдвинуты предположения о влиянии наноуглеродных компонентов на физико-механические свойства ГКП.

Методами световой микроскопии с микрорентгеноспектральным анализом, методами измерения микротвердости и триботехнических характеристик были исследованы структурное состояние и показатели механических и триботехнических свойств образцов с разработанными композиционными материалами (до 10% фуллереновой сажи), нанесенных газопламенным способом с лазерным оплавлением.

Исследования показали, что внедрение наноструктурированного углерода снижает пористость покрытий. Микрорентгеноспектральный анализ установил 100% содержание углерода в порах покрытия, которые возникают в этом же порошке без добавок нануглерода. При добавке наноуглеродных компонентов, вероятно, такие частицы выполняют роль уплотнителя.

Исследования показали, что лазерное оплавление покрытий с 10% добавкой наноуглеродных компонентов повышают микротвердость у следующих покрытий: ПГ-СР4 (основной материал) - в 1,4 раза, ПР-Х4ГСР (основной материал) - в 1,3 раза и ПТ-ЮНХ16СР3 (основной материал) - в 1,6 раза.

Результаты исследований на коэффициент трения показали, что внедрение наноуглерода снижает коэффициент трения у образцов следующих композиционных покрытий: ПР-Х4ГСР (основной материал) - в 5 раз, ПГ-19М-01 (основной материал) - в 4,8 раза и ПТ-ЮНХ16СР3 (основной материал) - в 1,7 раза.

### *Литература*

1. С.Д. Куш, Н.С. Куюнко. Фуллереновая чернь: строение, свойства и применение // Журнал общей химии. 2011. Т.81 Вып. 2;
2. Е.А. Грузинская, В.А. Кескинов, М.В. Кескинова, К.Н. Семенов, Н.А. Чарыков. Фуллереновая сажа электродугового синтеза //НАНОСИСТЕМЫ: ФИЗИКА, ХИМИЯ МАТЕМАТИКА, 2012, 3 (6), С. 83-90.
3. Ефремов С. Ю. Повышение ресурса поршневых компрессионных колец при изготовлении сменно-запасных частей в судоремонте: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Новгород, 2005. — 19 с.
4. О.П. Горелик, Г.А. Дюжев, Д.В. Новиков, В.М. Ойченко, Г.Н. Фурсей /Кластерная структура частиц фуллереноносодержащей сажи и порошка фуллеренов C<sub>60</sub> // Журнал технической физики — 2000. — том 70. — вып. 11. Стр. 118-125.
5. В.Ф. Мастеров, / Физические свойства фуллеренов // Соревский образовательный журнал, — №1 — 1997. Стр. 92-99.
6. В.И. Бородин, В.А. Трухачева / Термическая устойчивость фуллеренов // Письма в ЖТФ, — 2004, — том 30, — вып. 14, Стр. 53-55.

7. Исакаев Э. Х., Гусев В. М., Мордынский В. Б. Повышение ресурса деталей с газотермическими покрытиями нефтепромыслового оборудования // Технология машиностроения. — 2008. — № 12. — С. 18-22.

УДК 621.9.011:517.962.1

## МКЭ-АНАЛИЗ КОМБИНИРОВАННОГО НАГРУЖЕНИЯ АНТИЧНОЙ АМФОРЫ

Довнар С.С., Паращенко К.М., Козловский С.Е.  
Белорусский национальный технический университет  
e-mail: ssdov@tut.by

**Summary.** FEA simulation of roman type amphora is provided. 3D-model is drawn from archeology issue. Four load cases are simulated including filled amphora hanging on the handles, vertical compression by standing man, pressurizing up to 1 bar level, side squeezing. Both tension as compression stress concentrators are revealed. It relates to the joints between handles and body so to the vicinity of the amphora's foot.

Stress alleviation should be provided by localized wall thickening. Amphora design looks as rather rational one. It pours an additional light on the world of ancient engineering. Potential of intuitive and experimental modes of design is disclosed.

Античная амфора римского типа (рис.1, а) емкостью 40 литров подвергнута виртуальным испытаниям с помощью метода конечных элементов (МКЭ). Геометрия амфоры воспроизведена по данным сканирования археологических находок. Толщина глиняных стенок амфоры составляет ~9 - 11 мм. Вес сосуда – 17,5 кг.

Первоочередной интерес представляли концентраторы напряжений в нестандартной несущей системе из глины. Глина является хрупким материалом, чувствительным к растяжению и поверхностным дефектам. Компьютерное моделирование позволяло получить оценки прочности объекта, созданного исключительно путем сочетания интуитивно и экспериментальных методов проектирования.

Разработана система вариантов нагружения амфоры. Она включает действие силы тяжести жидкости (LC1), вес работника, ставшего на горловину вертикальной амфоры (LC2), внутреннее давление в амфоре в случае брожения вина (LC3), боковое нажатие на лежащий сосуд (LC4).

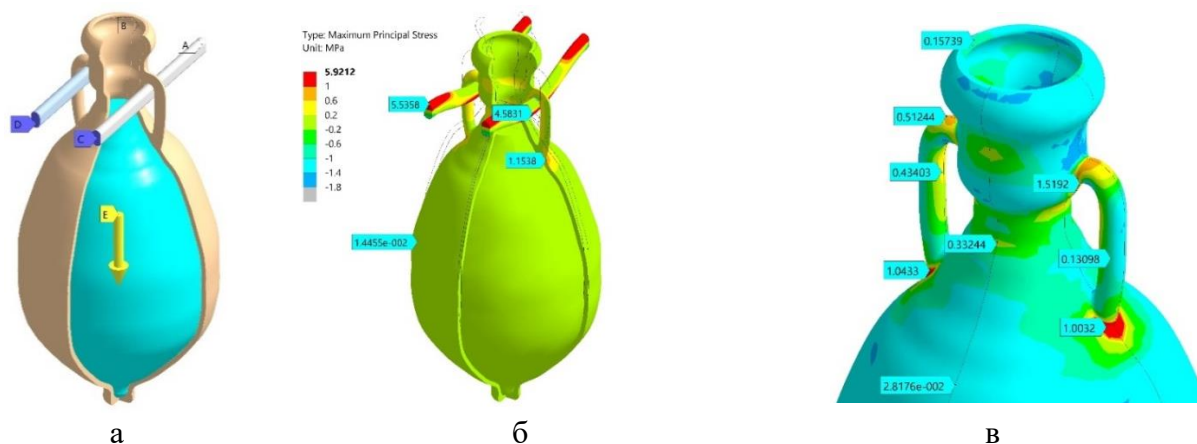


Рис.1. Геометрическая модель амфоры (а - включены собственно сосуд, перекладины для переноски и модельная жидкость), картина максимального главного напряжения  $\sigma_1$  при переносе амфоры на перекладине (б; LC1) и концентраторы напряжений  $\sigma_1$  в местах примыкания ручек амфоры к глиняному корпусу (в).