

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАНОУГЛЕРОДНЫХ МОДИФИКАТОРОВ НА МИКРОТВЕРДОСТЬ САМОФЛЮСУЮЩЕГОСЯ ПОКРЫТИЯ ИЗ ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА ПГ-СР4, ОПЛАВЛЕННОГО ЛАЗЕРНЫМ ЛУЧОМ

*Ванюк Э.А.<sup>1</sup>, Соколов И.О.<sup>2</sup>, Куис Д.В.<sup>3</sup>, Раковец А.С.<sup>3</sup>, Кришталёв С.А.<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup> УО «Республиканский институт профессионального образования»

<sup>3</sup> УО «Белорусский государственный технологический университет»

**Введение.** Постоянное повышение скоростей и нагрузок различного оборудования серьезно ужесточает требования к качеству узлов и механизмов машин, работающих в тяжелых эксплуатационных условиях, в том числе к свойствам рабочих поверхностей деталей. Использование легированных сталей, обеспечивающих высокие физико-механические свойства деталей, весомо отражается на расходах предприятий из-за их высокой стоимости, кроме того являющихся статьей импорта для предприятий республики.

Значительно сократить расходы таких материалов позволяют технологии газотермического нанесения покрытий на рабочие поверхности деталей, обеспечивающие физико-механические свойства и эксплуатационные показатели поверхностей деталей из конструкционных сталей на уровень специальных сталей и сплавов.

Технология газотермического напыления позволяет получать функциональные защитные, в том числе композиционные покрытия за счет усовершенствованного технологического оборудования с программным обеспечением. Вместе с развитием оборудования непрерывно развиваются и материалы для газотермического напыления.

Для создания конкуренции на рынке необходимо постоянно совершенствовать как оборудование для газотермического напыления, так и материалы, используемые для нанесения покрытий. В связи с этим экономически и технически целесообразно развивать принципиально новый подход к выбору материалов уже на стадии проектирования. Одно из таких направлений — это модифицирование порошковых материалов различными наноуглеродными добавками. В качестве таких добавок целесообразно использовать фуллерены (фуллерен — молекулярное соединение, представляющее собой выпуклые замкнутые многогранники, составленные из трёхкоординированных атомов углерода).

Фуллерены были открыты в 1985 году и вызвали большой интерес в научном сообществе по всему миру [1]. После получения в 1996 году Нобелевской премии за эту разработку, научный интерес к фуллеренам стал ослабевать за счет их высокой стоимости (от 15 у. е. до 300 у. е. в зависимости от степени очистки). Получают фуллерены из фуллереносодержащей сажи, которая образуется на стенках камеры при сгорании графитовых электродов под низким давлением в среде гелия [2]. В такой саже содержание фуллеренов в пределах 10–12 % от

общего объема [2], а стоимость ее на порядок ниже стоимости чистых фуллеренов. Однако сегодня недостаточно исследовано влияния фуллереновой сажи на физико-механические свойства газотермических покрытий.

Анализ работ [3, 4] показал, что введение нанокремниевых компонентов в виде ультрадисперсных алмазов детонационного синтеза (УДА) в электрохимические покрытия насыщает покрытия сверхтвердыми частицами, а также способствует диспергированию кристаллов осаждаемого металла. В результате повышаются такие показатели покрытий, как износостойкость, микротвердость, адгезия покрытий и их коррозионная стойкость существенно повышаются.

В связи с этим было выдвинуто предположение, что при модифицировании самофлюсующихся порошковых материалов для газотермического напыления нанокремниевыми компонентами фуллереновой сажи, микротвердость покрытий увеличится.

**Цель.** Исследование влияния нанокремниевых модификаторов на микротвердость самофлюсующегося покрытия ПГ-СР4, оплавленного лазерным лучом.

**Материалы.** Для проведения исследований была выбрана порошковая композиция ПГ-СР4 (хим. состав основа Ni; 13–17 %Cr; 0,6–1 % C; 3–5 % Si; 2,5–4 % В; 4 %Fe), которую перед нанесением покрытия модифицировали 1% ед.масс. компонентами фуллереновой сажи. Для сравнения результатов также производилась модификация ПГ-СР4 1 % ед.масс. обычным графитом и использовалось покрытие без нанокремниевых модификаторов. Смешивание порошковых композиций осуществлялось в лопастной механической мельнице.

**Нанесение покрытий.** Покрытия наносились газопламенным напылением с использованием газотермической установки мод. ТРУ-2.1.Р, разработанной на базе отраслевой научно-исследовательской лаборатории плазменных и лазерных технологий БНТУ (давление воздуха 0,2 МПа, давление воздуха кислорода 0,3 МПа, давление МАФ 0,18 МПа, толщина покрытия при газопламенном напылении  $h \approx 0,4$  мм). Оплавление сформированного слоя покрытия осуществлялось на лазерной установке (плотность лазерного пучка  $P = 1$  кВт; развертка 400x050; расстояние от сопла до поверхности образца  $l = 350$  мм; ширина пятна лазерного луча  $b = 5$  мм; скорость перемещения лазерного луча  $v = 300$  мм/мин).

На рисунке 1 представлено фото экспериментальных образцов ПГ-СР4 (без нанокремниевых компонентов) после лазерного оплавления.



*Рисунок 1 – фото экспериментальных образцов ПГ-СР4 (без нанокремниевых компонентов) после лазерного оплавления*

**Методика исследований.** Подготовка микрошлифов осуществлялась по стандартной методике на специализированном оборудовании для металлографической пробоподготовки твердых материалов датской фирмы Duramin Struers.

Микротвердость определялась по методу Виккерса на микротвердомере Duramin Struers с нагрузками 10–2000 г. Измерение микротвердости производилось по 25 точкам.

**Результаты исследований.** Для определения влияния нанокремниевых модификаторов на микротвердость исследования производились у покрытий из ПГ-СР4 модифицированного 1 масс.% компонентами фуллереновой сажи, ПГ-СР4 модифицированного 1 масс.% обычным графитом, а также ПГ-СР4 без модифицирующих компонентов.

Результаты определения микротвердости приведены на рисунках 2–4.

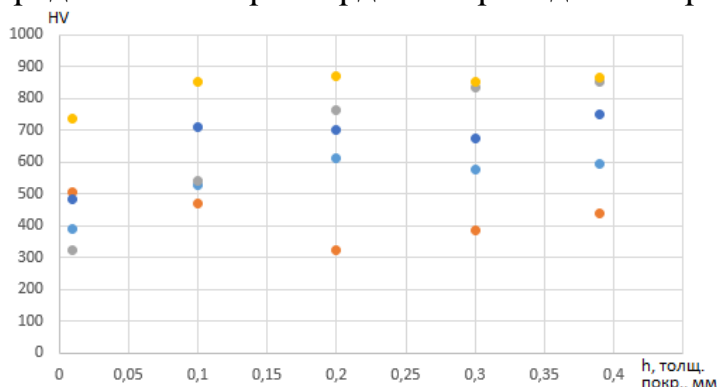


Рисунок 2 – Результаты определения микротвердости покрытия ПГ-СР4 без нанокремниевых модификаторов

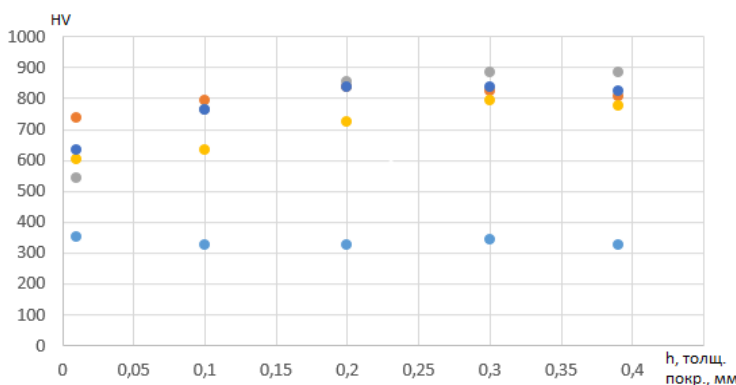


Рисунок 3 – Результаты определения микротвердости покрытия ПГ-СР4 модифицированного 1 масс. % графита

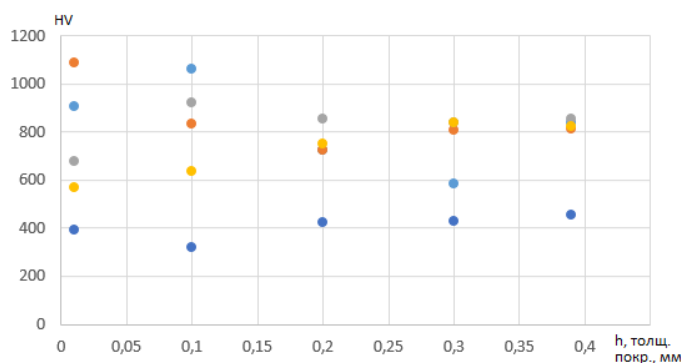


Рисунок 4 – Результаты определения микротвердости покрытия ПГ-СР4, модифицированного 1 масс.% компонентами фуллереновой сажи

На рисунке 5 представлена гистограмма средних значений микротвердости самофлюсующихся покрытий ПГ-СР4, оплавленных лазерным лучом.

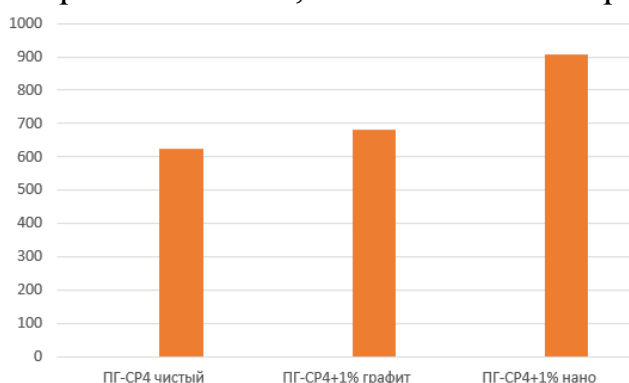


Рисунок 5 – гистограмма средних значений микротвердости самофлюсующихся покрытий ПГ-СР4, оплавленных лазерным лучом (ПГ-СР4 чистый 626 HV, ПГ-СР4 +1% графит 681 HV и ПГ-СР4 +1% нано 907 HV)

**Заключение.** Анализ результатов выполненных исследований позволил установить, что модификация нанокремнеземными компонентами фуллереновой сажи порошковых композиций самофлюсующихся покрытий ПГ-СР4 обеспечивает повышение микротвердости покрытий в 1,4 раза по сравнению с аналогичными без нанокремнеземных модификаторов, а также в 1,3 раза по сравнению с покрытиями из ПГ-СР4 модифицированных 1 масс.% графитом. Кроме того, подобная модификация может способствовать не только повышению износостойкости покрытий, но и снижению коэффициента трения [5].

Таким образом модификация самофлюсующихся порошковых смесей нанокремнеземными компонентами при формировании газотермических покрытий газопламенным напылением с последующим лазерным оплавлением способствует повышению эксплуатационных характеристик, обеспечивающих увеличение ресурса быстроизнашивающихся деталей, а следовательно, уменьшает затраты на изготовление запасных частей и ремонтно-восстановительные работы.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Грузинская, Е. А. Фуллереновая сажа электродугового синтеза / Е. А. Грузинская [и др.] // Наносистемы: физика, химия, математика, 2012. – 3 (6). – С. 83–90.
2. Горелик, О.П. Кластерная структура частиц фуллереносодержащей сажи и порошка фуллеренов C<sub>60</sub> / О.П. Горелик [и др.] // Журнал технической физики. – 2000. – Т. 70, вып. 11, – С. 118–125.
3. Тимошков, Ю. В. Свойства композиционных никелевых покрытий с различными типами ультрадисперсных алмазных частиц / Ю. В. Тимошков [и др.] // Гальванотехника и обработка поверхности, 1999, т.7, № 2, с. 20-25.
4. Ващенко, С.В. Электроосаждение износостойких хромовых покрытий из электролитов с ультрадисперсными алмазными порошками / С. В. Ващенко, З. А. Соловьева // Гальванотехника и обработка поверхности. – 1992. – № 5–6. – С. 45 – 48.
5. Леванцевич, М. А. / Исследование коэффициента трения газотермических покрытий, модифицированных нанокремнеземами на основе фуллереновой черни / М. А. Леванцевич, И.О. Соколов, Э.А. Ванюк // Машиностроение: республиканский межведомственный сборник научных трудов / Белорусский национальный технический университет; редкол.: В. К. Шелег (гл. ред.). – Минск: БНТУ, 2021. – Вып. 33. – С. 50–55.