

46. Lee S, Hwang J, Shankar MR, Chandrasekar S, Compton W. Large strain deformation field in machining. *Metall Mater Trans A* 2006;37:1633–43. doi:10.1007/s11661-006-0105-z.
47. Swaminathan S, Ravi Shankar M, Lee S, Hwang J, King AH, Kezar RF, et al. Large strain deformation and ultra-fine grained materials by machining. *Mater Sci Eng A* 2005;410–411:358–63. doi:10.1016/j.msea.2005.08.139.

### **ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ИЗ ПОРОШКОВОЙ СМЕСИ, СОДЕРЖАЩЕЙ КЕРАМИЧЕСКУЮ ФАЗУ**

*А.С. Калинин<sup>1</sup>, д.т.н., доц., В.В. Мешкова<sup>1</sup>, мл. науч. сотр., Е.Э. Фельдштейн<sup>2</sup>, д.т.н., проф.*

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

<sup>2</sup>*Зеленогурский университет*

*220013, Республика Беларусь, г. Минск, пр. Независимости, 65, тел. (375 17)331-00-45*

*E-mail: [vera.miashkova2015@gmail.com](mailto:vera.miashkova2015@gmail.com)*

Исследовано влияние структурных особенностей покрытий, полученных на стали плазменным напылением смеси порошков самофлюсующегося сплава на никельхромовой основе с различным процентным соотношением оксидной керамики на износостойкость полученных покрытий.

The influence of structural features of coatings formed on steel specimens by means of plasma spraying of a mixture of nickel-chromium base powder and different percentage of oxide ceramics one on the coatings wear resistance is investigated.

Важной задачей современной науки и промышленности является повышение эксплуатационных характеристик деталей, работающих в условиях трения [1]. Традиционно, процессом, позволяющим эффективно восстанавливать изношенные поверхности, а также создавать износостойкие покрытия на новых деталях, является плазменное напыление. Для обеспечения стойкости деталей протяжных устройств в процессе эксплуатации требуется технология получения износостойких покрытий на рабочих поверхностях роликов, так как они подвергаются высоким удельным давлениям. Было предложено использовать технологию плазменного напыления покрытий из механической смеси порошков самофлюсующегося никелевого сплава ПГ-ХН80СР4 (системы Ni-Fe-Cr-Si-B-C) с нейтральной оксидной керамикой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Покрытия из самофлюсующихся сплавов рекомендуется применять для защиты поверхностей от износа при одновременном воздействии коррозионной среды и высоких температур с умеренными ударными нагрузками. Самофлюсующиеся сплавы обладают высокими эксплуатационными характеристиками, однако применение их ограничено высокой стоимостью. Для снижения стоимости обработки, а также для снижения адгезии между медным проводом и никелевой матрицей самофлюсующегося покрытия предложено использовать примесь нейтральной оксидной керамики Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> в количестве 15-30 %.

Для плазменного напыления использовалась установка УПУ-3Д с плазмотроном ПП-25. В качестве плазмообразующего и транспортирующего газа применялся азот. Расход газа – 3 м<sup>3</sup>/ч. Напряжение дуги 80 В, сила тока 410 А, объемный расход плазмообразующего газа (N<sub>2</sub>) G = 40...50 л/мин. Толщина напыленного слоя составила 0,8...1,1 мм. Для покрытия использовалась смесь самофлюсующегося порошка ПГ-ХН80СР4 на никельхромовой основе системы Ni-Fe-Cr-Si-B-C с оксидной керамикой Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с процентным содержанием 15, 20, 25 и 30%. Предварительно для повышения адгезии покрытия образцы грунтовались тонким слоем самофлюса. Покрытие наносилось в режиме наплавки (заготовка предварительно нагревалась до 800°С) с оплавлением.

Ранее было установлено, что при содержании Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 25-30% в покрытии наблюдается пористость и значительно повышается риск трещинообразования, что снижает физико-механические свойства, в частности, твердость [2]. Для повышения качества нанесенных слоев были отработаны технологические режимы, обеспечивающие формирование слоев без пористости и трещин. При получении покрытия с помощью указанной технологии существовала опасность сегрегации напыляемой смеси из-за значительной разницы удельных плотностей оксидной керамики и никелевой матрицы самофлюсующегося покрытия. Однако, исследования структуры материала посредством СЭМ показали, что частицы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> равномерно распределены в толще покрытия (рисунок 1). Для детального рассмотрения структуры и последующего исследования фаз в покрытии проводился элементный анализ. Все покрытия имеют сходную структуру: темные участки – частицы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, светло-серые – никелевая эвтектика; темно-серые участки – соединения хрома.

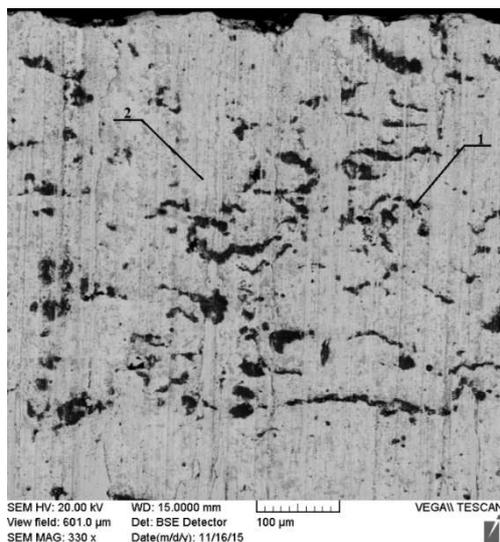


Рис. 1. Структура покрытия с содержанием  $Al_2O_3$  в смеси порошков 15%,  $\times 330$ :  
1 – частица  $Al_2O_3$ ; 2 – матрица.

Исследования износа образцов с покрытиями выполнялись на машине трения А-135 типа Amsler. Составляющими узла трения были колодки с покрытиями с номинальными размерами 10 (поверхность трения) $\times 14 \times 20$  мм и медные ролики. Для сравнения в качестве эталона базовой технологии использовался образец из сплава с покрытием, состоящим из механической смеси самофлюсующегося сплава ПС-12НВК-01 с карбидом вольфрама (ПГ-10Н-01 + 35% WC). Исследования выполнялись в условиях сухого трения, нагрузка 1000 Н. Регистрирующая система машины трения содержит комплект датчиков, позволяющих на измерение числа оборотов ролика в ходе цикла трения, а также изменений работы трения, момента трения и температуры колодки во времени.

Результаты измерения коэффициентов трения приведены на рисунке 2:

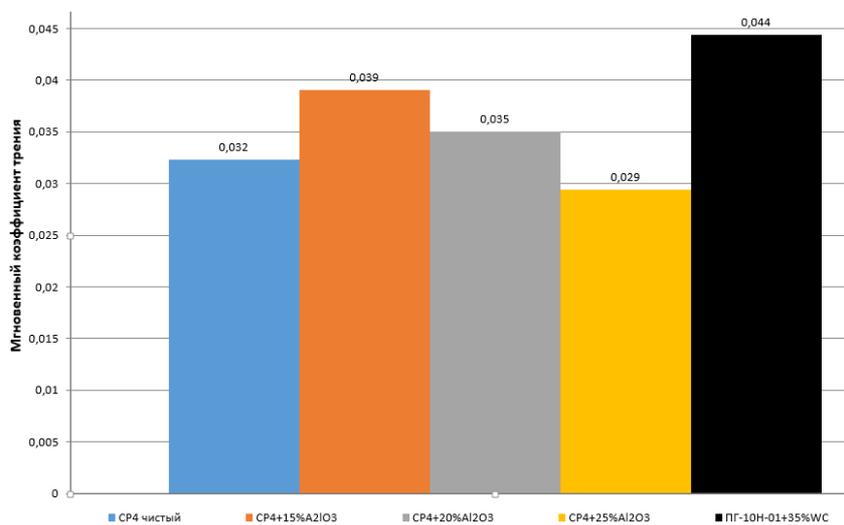


Рис. 2 – Коэффициенты трения чистого самофлюса, механических смесей самофлюса с оксидом алюминия и ПГ-10Н-01 с карбидом вольфрама

Коэффициенты трения чистого самофлюса и механических смесей самофлюса с оксидом алюминия при данных условиях ниже эталонного коэффициента трения механической смеси с карбидом вольфрама. При этом, самый низкий коэффициент трения наблюдается в смеси, содержащей 25%  $Al_2O_3$ , однако, как следует из предыдущих исследований, данная смесь при напылении склонна к образованию микротрещин, что снижает твердость покрытий в сравнении с другими смесями. Исхо-

дя из этого, можно рекомендовать для получения износостойких покрытий, содержащих керамическую фазу, механические смеси порошков, содержащие не более 20%  $Al_2O_3$ , что обеспечивает снижение коэффициента трения, по сравнению с эталонной смесью и сохранение высокого уровня физико-механических свойств покрытий.

Список литературы

1. Kotkunde N., Ojha H. Review of laser cladding on steel // International J. of Multidispl. Research & Advcs. in Engg. (IJMRAE), Vol. 3, No. II (April 2011), pp. 25-34.
2. Калиниченко А.С., Девойно О.Г., Мешкова В.В. Влияние содержания оксидной керамики на структуру и свойства никельхромовых плазменных покрытий / Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Сб. научных трудов. В 3 кн. Кн. 2. Технологии и оборудование механической и физико-технической обработки / редколлегия: С.А. Астапчик (гл.ред.) [и др.]. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 2015. С. 171- 174.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИСКОПАЕМЫХ УГЛЕЙ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ФЕРРОСИЛИЦИЯ**

*С.А. Теслев, начальник ПТО «ЮФЗ», Е.П. Теслева, к. ф-м. н., доц., Д.В. Халтурина, студ.  
Юргинский технологический институт Томского политехнического университета  
652050, г. Юрга, ул. Достоевского 1, тел. 7-77-42*

Рассматривается возможность использования ископаемых углей в качестве компонентов восстановительных смесей при производстве ферросилиция.

Ферросилиций – это сплав железа с кремнием, который применяется для раскисления и легирования стали, а также для получения отливок из чугуна с заданным содержанием кремния [1-3]. Вводить в сталь кремний в виде его сплава с железом, а не в чистом виде удобнее вследствие более низкой температуры плавления и выгоднее, так как стоимость сплава ниже по сравнению со стоимостью кристаллического кремния.

Процесс производства ферросилиция является восстановительным. В любом восстановительном металлургическом процессе шихта состоит из рудной составляющей и восстановителя. В производстве ферросилиция рудным компонентом шихты является кварцит, а восстановителем – углеродистые материалы, которые условно можно классифицировать на ископаемые (антрацит, каменные, бурые угли, торф) и искусственные (металлургический кокс, коксовый орешек, специальный кокс, полукокс) [4].

Эффективная работа электропечей зависит от показателей качества используемых в производстве углеродистых материалов. В зависимости от этих показателей в различных технологических процессах используют различные виды углеродсодержащих материалов. Одни из них находят применение в качестве восстановителей в углетермических процессах, другие в качестве огнеупорных материалов для футеровки металлургических агрегатов, третьи в качестве наполнителей при изготовлении электродных масс [5].

Традиционно используемые для этих целей различные виды кокса, полукокса и термоантрацита имеют ряд преимуществ: меньшее содержание примесей, высокая температура сгорания, высокая электропроводность, большая реакционная способность и низкое содержание влаги. Однако в условиях рыночных отношений данные материалы становятся не только дефицитным, но и дорогостоящим сырьем. В качестве альтернативной замены этих углеродсодержащих материалов, а также для снижения себестоимости ферросплавной продукции в последние годы активно применяются восстановительные смеси, состоящие из кокса в различных комбинациях с углями.

Не все виды угля пригодны для эффективного использования в качестве восстановителя в связи с различием их вещественных составов и физико-химических свойств. Недостатком использования каменного угля в восстановительной смеси является высокий уровень низшей теплоты сгорания рабочего топлива, который для всех марок угля (А, Т, СС и Д) находится в пределах 5200-6500 ккал/кг. Высокая калорийность каменного угля снижает стойкость печного оборудования, неблагоприятно сказывается на режиме коксования самоспекающихся электродов. Это приводит к увеличению горячих простоев печей и потере производительности [6].

Например, в работе [6] предложена многокомпонентная восстановительная смесь для выплавки ферросилиция, содержащая коксовый орешек, бурый уголь марки Б с низшей теплотой сгорания рабочего топлива, равной 3200 ккал/кг, и содержанием рабочей влаги до 40%, а в качестве рыхлителя – длиннопламенный уголь и древесная щепка в следующем массовом соотношении компонентов, % (по углероду) (табл. 1):