

УДК 621.534.762.134

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПЛАЗМЕННО-ДЕТОНАЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОСНОВЕ Ni-Cr

А.А. Дробышевская¹, В.М. Береснев², Д.Л. Алонцева³

¹ Научный физико-технологический центр МОН и НАН Украины
г. Харьков, 61022, пл. Свободы, 6, Украина
E-mail: danna77@mail.ru

² Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина
г. Харьков, 61022, пл. Свободы, 4, Украина

³ Восточно-Казахстанский государственный технический университет
г. Усть-Каменогорск, 070004, ул. Протозанова 69, Казахстан

Поступила в редакцию 25 марта 2011 г.

Представлены результаты исследования структуры и свойств покрытий на основе Ni-Cr, полученных методом плазменной детонации с последующим оплавлением плазменной струей. Установлены различия фазового состава и механических свойств до и после дуплексной обработки. После оплавления плазменной струей покрытия обладают высокой твердостью, износостойкостью и стойкостью к коррозии в морской воде. Улучшение свойств покрытий в результате дуплексной обработки достигается как за счет фазовых превращений, так и за счет сглаживания шероховатости поверхности и гомогенизации поверхностного слоя покрытия при оплавлении.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: дуплексная обработка, фазовый анализ, наночастицы, твердость.

STRUCTURE AND PROPERTIES OF Ni-Cr COATINGS

A.A. Drobyshvskaya¹, V.M. Beresnev², D.L. Alontseva³

¹ Scientific Center of Physical Technologies
Kharkiv, 61022, Svoboda Sq., 6, Ukraine

² V.N. Karazin Kharkov National University
Kharkov, 61022, Svoboda Sq., 4, Ukraine

³ East-Kazakhstan State Technical University
Ust-Kamenogorsk, 070004, Kazakhstan

The results of investigation of structure and properties of coatings on the basis Ni-Cr obtained by a method of plasma detonation with the subsequent melting by a plasma jet are presented. The differences in a phase composition and in mechanical properties before and after duplex treatment are established. After melting by a plasma jet the coatings have high hardness, wear resistance and stability to corrosion in seawater. The improvement of properties of coatings as a result of duplex treatment is reached both due to of phase transformations, and due to of smoothing of a surface roughness and homogenization of surface layer at melting.

KEY WORDS: duplex treatment, coating, phase analysis, nanoparticles, hardness.

СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ Ni-Cr

А.О. Дробышевська¹, В.М. Береснев², Д.Л. Алонцева³

¹ Науковий фізико-технологічний центр МОН і НАН України
м. Харків, 61022, пл. Свободи, 6, Україна

² Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна
м. Харків, 61022, пл. Свободи, 4, Україна

³ Восточно-Казахстанский государственный технический университет
г. Усть-Каменогорск, 070004, ул. Протозанова 69, Казахстан

Надаються результати дослідження структури та властивостей покриттів на основі Ni-Cr, отриманих методом плазмової детонації з наступним оплавленням плазмовим струменем. Встановлені розбіжності фазового складу та механічних властивостей до та після дуплексної обробки. Після оплавлення плазмовим струменем покриття мають високу твердість, зносостійкість та корозійною стійкість в солоній воді. Покращення властивостей покриттів в результаті дуплексної обробки є наслідком як фазових перетворень, так і зменшення шорсткості поверхні та гомогенізації поверхневого шару покриття при оплавленні.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: дуплексна обробка, фазовий аналіз, наночастинок, твердість.

Для покрытий, нанесенных методом плазменной детонации, основными проблемами являются плохая адгезия к подложке и пористость, заметная при достаточной толщине покрытия. Данные покрытия, в отличие от тонкопленочных покрытий, нанесенных методами PVD, CVD, PED, имеют толщину от 50 до 500 мкм и часто проявляют склонность к коррозии и износу. Для устранения недостатков используют дуплексные обработки, приводящие к плавлению покрытия: облучение покрытий электронным пучком в вакууме или повторный проход плазменной струи без порошка покрытия по поверхности покрытий в воздушной среде [1,2]. Практический опыт использования комбинированных технологий нанесения порошковых покрытий методом плазменной детонации с последующей модификацией электронным облучением или плазмой, позволяет

утверждать, что механические свойства таких покрытий из металлов и сплавов (микро и нанотвердость, износостойкость, коррозионная стойкость) улучшаются [1-4].

В процессе нанесения таких покрытий температура плазменной струи достигает значений нескольких тысяч градусов по Цельсию, создаются высокие скорости частиц порошкового покрытия (от 600 до 1000 м/с [2]) в плазменной струе, длительность воздействия струи мала (около 3 миллисекунд), что предполагает формирование в них аморфных областей или наноструктур. Особенно эффективно аморфные или наноструктурированные состояния достигаются при высоких скоростях нагрева, давлении и при малой длительности воздействия высоких температур [5].

Для эффективной модификации покрытий, осаждаемых плазменно-детонационным методом, необходимо решение ряда проблем. Во-первых, чтобы получить при дуплексной обработке покрытия с заданными свойствами, надо ясно представлять себе структурно-фазовое состояние покрытия до облучения. Во-вторых, надо обосновать выбор режимов комбинированной обработки: энергию и плотность тока пучка, длительность облучения и т.д. Обоснование можно провести в рамках определенной модели, учитывающей строение покрытия до облучения. Знание этих параметров позволит сберечь энергию и автоматизировать обработку покрытий облучением.

Цель работы: экспериментально установить структурно-фазовое состояние и механические свойства покрытия на основе Ni-Cr после нанесения плазменной струей на подложку из стали 3 и последующего оплавления поверхностного слоя покрытия плазменной струей, определить различия в структуре и свойствах покрытия до и после плавления плазменной струей.

МЕТОДИКА ПРИГОТОВЛЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ ОБРАЗЦОВ

В плазменно-детонационной установке «Импульс-6» на подложке из стали 3 стандартного состава на основе Fe формировались защитные покрытия толщиной от 80 до 150 мкм из порошкового сплава марки ПГ-19Н-01 (Ni – основа, Cr – 8 ÷ 14 %, В – 2,3 %, Si – 1,2 ÷ 3,2 %, Fe – 5 %, С – 0,5 %). Для напыления применялся порошок с размером фракций от 29 до 68 мкм. В качестве материала подложки использовались стальные образцы размером 20 × 30 × 2 мм³, поверхность которых предварительно подвергалась пескоструйной обработке. Порошковое покрытие осаждалось в воздушной среде со следующими параметрами импульсно-плазменной обработки (ИПО): расстояние от подложки до среза сопла плазматрона 60 мм, скорость перемещения образца 360 мм/мин, частота следования импульсов 4 Гц (частота детонации), мощность плазменной струи 5 МВт, средний диаметр струи на образце 25 мм, температура $T_{ст} = 3000 \div 12000$ К, длительность импульса 3 мс. Для оплавления покрытия использовали повторный проход плазменной струи (без порошка) с частотой следования импульсов 2,5 Гц (от 1 до 3-х проходов).

Исследования структуры поверхности проводили методами сканирующей электронной микроскопии на JSM-6390LV (“JEOL”, Япония) с приставкой энергодисперсионного анализа INCA ENERGY (“Oxford Instruments”, Великобритания). Для изучения структурно-фазового состава покрытий применяли рентгеновский дифрактометр X’Pert PRO (“PANalytical”, Нидерланды). Топографию поверхности исследовали на атомно-силовых микроскопах JSPM-5200 (“JEOL”, Япония) и NT-206 (Белоруссия). Шероховатость поверхности оценивали согласно ГОСТ 2789-7. Сравнивали параметры шероховатости Ra – среднее арифметическое отклонение профиля для образцов до и после дуплексной обработки.

Испытания на микротвердость проводили на приборе ПМТ-3 (ЛОМО, Россия) при нагрузках на индентор 2,5 и 10 Н. Испытания на нанотвердость проводились трехгранным индентором Берковича на нанотвердомере Nano Indentor II (MTS Systems Corporation, USA).

Для проведения коррозионных испытаний использовали потенциостатический метод, оценивая скорость коррозии в соленой воде (H₂O с раствором NaCl 0,5 Н (3 %)). Контроль потенциостатирования осуществлялся при помощи хлорсеребряного электрода сравнения.

Для более детального анализа покрытия ПГ-19Н-01его механически срезали с поверхности подложки и исследовали структуру и состав с двух сторон (со стороны поверхности и со стороны подложки). Исследования методом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) проводили на JEM-2100 (“JEOL”, Япония). Отделенное от поверхности покрытие с трудом режется из-за высокой твердости. Исследовали фольги из покрытия, предварительно механически утоненные и протравленные аргонными пучками в вакууме до образования сквозного отверстия на установке PIPS (Gatan, Япония), с энергией пучка 5 кэВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты проведенных исследований микроструктуры поверхности свидетельствуют о разных морфологических особенностях поверхности покрытий, оплавленных потоками импульсной плазменной струи и не оплавленных. Как известно, в процессе плазменно-детонационного напыления порошкового покрытия под воздействием высокотемпературной импульсно-плазменной струи происходит оплавление поверхности подложки с одновременным вплавлением в материал частиц порошка [6, 7]. Топографический анализ поверхности покрытия ПГ-19Н-01 после нанесения методом плазменной детонации указывает, что на подложке формируется покрытие с высокой шероховатостью. Рельефные выступы на поверхности имеют вид

разбрызганных быстро застывших капель. Рельефное строение поверхности обусловлено наличием в порошке частиц размером от 46 до 68 мкм. Крупная фракция порошка, которая вводилась для предотвращения полного проплавления материала в газовой среде плазматрона, формирует покрытие путем последовательной укладки деформированных частичек с разной скоростью, температурой и массой. Это приводит к появлению микровыступов и пор на поверхности. Для устранения этих пор применялись мелкие фракции порошка от 29 до 46 мкм. Следует отметить, что наличие дефектов на поверхности в виде неравномерно распределенных выступов, переходящих во впадины, может оказывать негативное влияние на эксплуатационные характеристики материала: они могут служить концентраторами напряжений, снижающими усталостную прочность, а также быть потенциальным источником коррозии. Из-за высокой шероховатости и пористости покрытие имеет низкую стойкость к коррозии, несмотря на то, что никель – коррозионностойкий материал.

Топографический анализ поверхности покрытия после нанесения методом плазменной детонации до его оплавления плазменной струей представлен на рис. 1. Измерения высоты шероховатостей показали, что высота отдельных пиков составляет 656 мкм от подложки, в то время как других – 86 мкм, при средней толщине покрытия 150 мкм. Анализ микротвердости покрытия по поверхности был затруднен из-за его сильной шероховатости. Среднее арифметическое отклонение профиля Ra составило от 95,6 нм до 0,300 мкм.

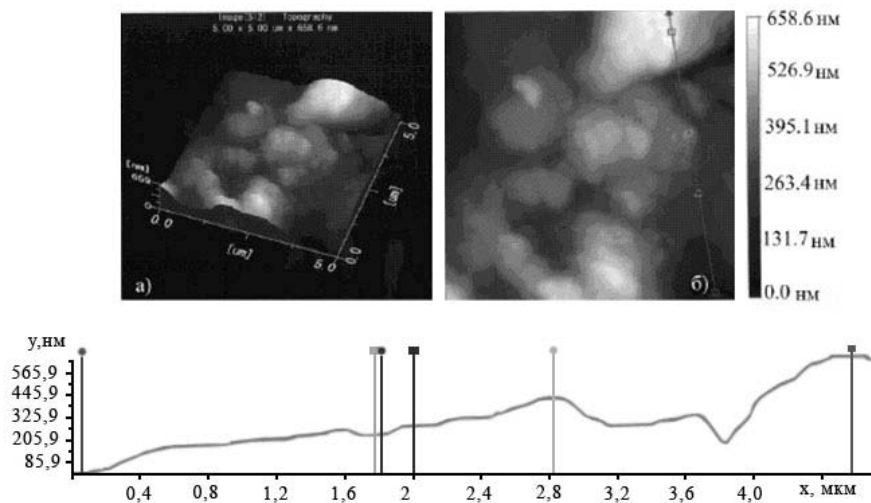


Рис. 1. Топография поверхности покрытия ПГ-19Н-01, нанесенного плазменно-детонационным методом, до его оплавления плазменной струей (а – трехмерное изображение, б – изображение поверхности покрытия)

С целью увеличения твердости и стойкости к коррозии порошковое покрытие оплавлялось плазменной струей. Вид поверхности покрытий после оплавления существенно отличается, шероховатости оплавляются. В результате такой обработки покрытия делают гладкими. Покрытие сплавляется с подложкой, частицы покрытия сплавляются друг с другом, покрытие становится структурно однородным, с малым количеством пор. Соответственно, увеличивается износостойкость и стойкость покрытий к коррозии.

На рис. 2 представлен поперечный шлиф оплавленного плазменной струей покрытия. Как видно из протравленного слоя покрытия, он представляет собой плотный слой с небольшим количеством пор, граница между покрытием и подложкой имеет "волнистый" характер, что указывает на проникновение частиц порошка в подложку.

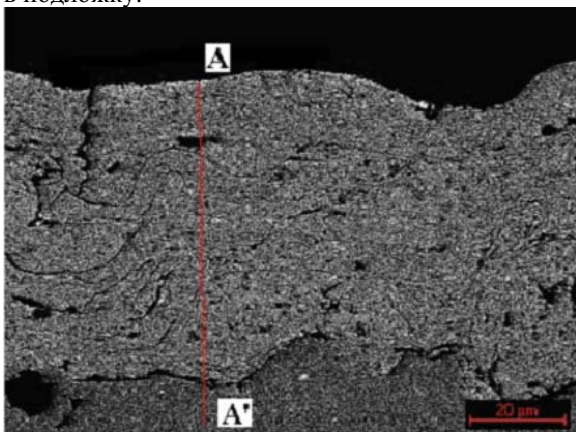


Рис. 2. Поперечный шлиф порошкового покрытия ПГ-19Н-01 после оплавления плазменной струей

После дуплексной обработки покрытие ПГ-19Н-01 становится многофазным, в поверхностном слое покрытия формируются оксиды хрома, присутствуют интерметаллидные соединения CrNi_3 и Fe_7Ni_3 (таблица).

Анализ фазового состава данного покрытия свидетельствует о возможности образования новых фаз при охлаждении расплавленного и перемешанного с материалом подложки покрытия. Установлено, что на поверхности покрытия ПГ-19Н-01 формируется интерметаллидная Ni_3Cr -фаза с ГЦК решеткой. Характерно то, что соединения Cr формируются только в тонком поверхностном слое покрытия. Толщину слоя, содержащего соединения на основе Cr, в данном эксперименте точно не определяли, но таких соединений не обнаружили на глубине 150 мкм в зоне соединения с подложкой. Полагаем, что определяющим фактором фазообразования выступает температура,

различная по глубине образца при воздействии плазменной струи. По данным [8] растворимость Cr в Ni резко падает с увеличением температуры. В целом можно считать, что на свободной поверхности покрытий образуется тонкий слой, содержащий оксиды и карбиды, а также фазы с элементами покрытия, плохо растворимыми при высоких температурах. Основной слой покрытия имеет достаточно однородное фазовое строение, в данном случае это γ -фаза, твердый раствор на основе никеля. Подтверждением формирования твердого хромсодержащего слоя служит и резкое уменьшение микротвердости по глубине покрытия.

Таблица

Экспериментальные результаты рентгеновского фазового анализа состава покрытия ПГ-19Н-01

Покрытие	Фазовый состав и параметры решетки фаз покрытия до оплавления	Фазовый состав и параметры решетки фаз покрытия после оплавления
ПГ-19Н-01 (поверхность)	FeNi ₃ примитивная кубическая, $a = 3,5450$ Cr ₂ Ni ₃ , ГЦК, $a = 3,5400$	CrO ₂ , тетрагональная, $a = 4,4210, b = 4,4210, c = 2,9160$ CrNi ₃ , ГЦК, $a = 3,5520$ Fe ₇ Ni ₃ , ОЦК, $a = 2,8610$
ПГ-19Н-01 (со стороны подложки)	Ni, ГЦК, $a = 3,5250$ Fe, ОЦК, $a = 2,8662$	Анализ не проводился

Вызывала опасение возможность формирования на поверхности покрытий слоев, обогащенных Cr, из-за склонности Cr к образованию соединений с N. При этом происходит увеличение твердости поверхностного слоя, но одновременно уменьшается содержание Cr в покрытии, и в итоге ухудшается коррозионная стойкость [9]. Однако таких фаз на поверхности покрытий не обнаружено, воздушное охлаждение для них допустимо. Образовавшиеся на поверхности покрытия микрокристаллические интерметаллиды, напротив, улучшают его коррозионные и прочностные свойства. Необходимо отметить, что карбидная упрочняющая фаза в сплавах на основе Ni-Cr при температурах 700 ÷ 800 °С коагулирует намного быстрее, чем интерметаллидная, что приводит к быстрому разупрочнению сплавов [10]. Поэтому для работы в области высоких температур сплавы с интерметаллидным твердением предпочтительнее.

Методами электронной дифракционной микроскопии тонких фольг установлено, что покрытие на основе ПГ-19Н-01 до оплавления состоит из нанозерен различной ориентации и микрокристаллических частиц. Упорядочения в распределении микроструктур не отмечается, частицы неравноосны, их линейные размеры в направлении наибольшей вытянутости составляют величину порядка 50 нм, в поперечном направлении – порядка 30 нм.

Микроэлектроннограмма от микрокристаллитов точечная, в отличие от кольцевой микроэлектроннограммы нанокристаллической матрицы. По данным рентгеноструктурного анализа покрытие в основном состоит из фазы на основе Ni, имеющей ГЦК решетку с параметром матрицы $a = 3,5250 \text{ \AA}$ (табл. 1). Расчетный параметр ГЦК-решетки микрокристаллита в покрытии составил $a = 3,55 \text{ \AA}$ (межплоскостное расстояние $d = 2,05 \text{ \AA}$), что тоже близко к данным рентгеноструктурного анализа (табл. 1). Параметр выделяющейся фазы очень близок к параметру матрицы, положение рефлексов фазы Ni₃Cr фактически совпадает с кольцевыми рефлексами. Объемная доля микрокристаллитов в материале покрытия, определенная по ПЭМ изображениям, составляет величину порядка 20 %.

В покрытии при большом увеличении видна смесь различно ориентированных нанозерен (рис. 3), однако границы нанозерен не выражены, четко выраженной симметрии в расположении нанозерен с определенной ориентацией атомных плоскостей нет. Поэтому утверждать, что наблюдается упорядочение в микроструктуре, образованной смесью нанозерен, нельзя. Однако на электронограммах данных участков отчетливо видны точечные рефлексы, накладывающиеся на кольцевую электронограмму матрицы покрытия (рис. 3б). Размеры отдельных нанозерен составляют величины порядка 2 ÷ 3 нм, нанозерна азимутально разориентированы на углы более 10°.

Одна из причин нанокристаллического строения покрытия ПГ-19Н-01, нанесенного методом плазменной детонации, – высокая дефектность микроструктуры, обусловленная ударным воздействием плазменной струи на поверхность и резким градиентом температуры в покрытии, что может привести к возникновению сильной деформации в покрытии. В итоге, для релаксации механических напряжений в покрытии формируется субструктура из нанозерен различной кристаллографической ориентации с высокой и непрерывной разориентацией, что подтверждают характерные кольцевые электронограммы.

Очевидно, что повторная обработка плазменной струей покрытия приводит к изменению рельефа и структуры поверхности, перераспределению элементов за счет массопереноса, уменьшению размера зерен, что в итоге изменяет механические свойства покрытий. Без оплавления покрытие имеет значительный разброс

значений микротвердости из-за разного состава фаз. Оплавление плазменной струей слоя $60 \div 80$ мкм в покрытии приводит к уменьшению разброса за счет гомогенизации приповерхностного слоя.

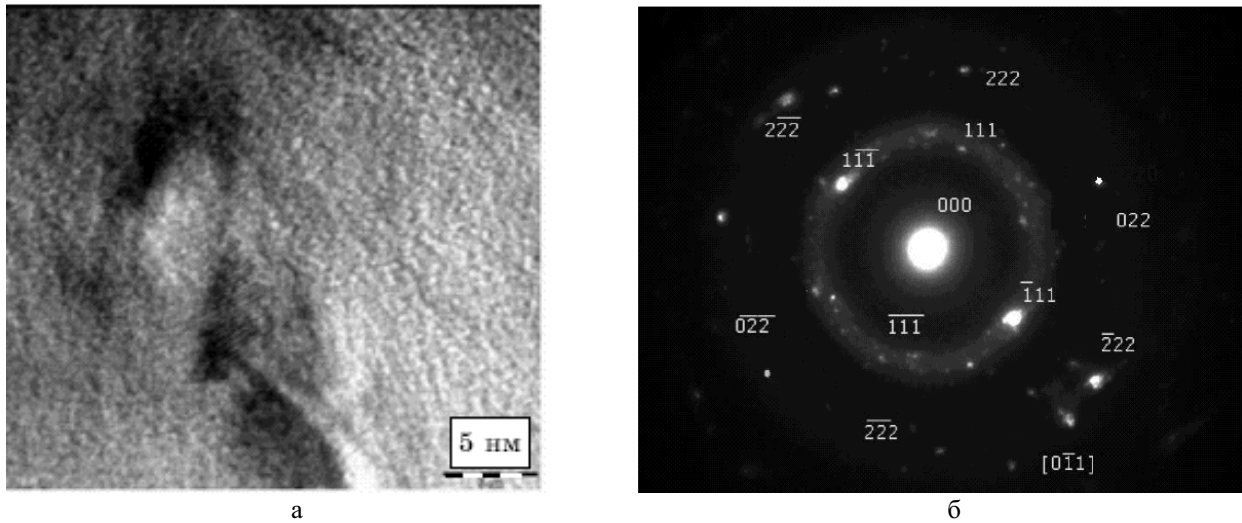


Рис. 3. Электронно-микроскопическое изображение микроструктуры плазменно-детонационного покрытия ПГ-19Н-01: участок с наличием нанобластей различной кристаллографической ориентации (а) и микроэлектронграмма участка, изображенного на рис. а (б)

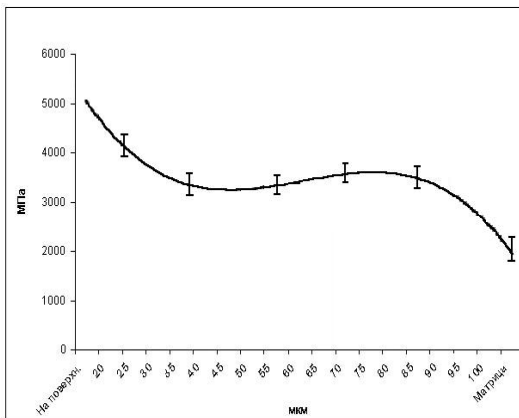


Рис. 4. Изменение микротвердости по глубине образца с покрытием из ПГ-19Н-01, оплавленным плазменной струей (поперечный шлиф)

Результаты измерения микротвердости на поперечном шлифе покрытия на основе Ni-Cr приведены на рис. 4. Зависимость нелинейна и имеет немонотонный характер. После оплавления покрытия плазменной струей разброс значений микротвердости значительно уменьшается, что свидетельствует о более однородной структуре. Средняя микротвердость максимальна на поверхности, там где покрытие было оплавлено плазменной струей. Затем микротвердость плавно уменьшается в области покрытия, не подвергавшейся плавлению во время воздействия плазменной струей. На глубине около 40 мкм (вблизи границы плавления) микротвердость почти не меняется и выходит на постоянное значение. Ближе к границе с подложкой микротвердость начинает более резко уменьшаться и на глубине 115 – 120 мкм средняя микротвердость выходит на значение микротвердости подложки. Максимальные значения микротвердости на поверхности достигают 7 ГПа у покрытия после дуплексной обработки и 6,7 ГПа у необработанного покрытия.

Нанотвердость подложки составляет $3,6 \pm 0,3$ ГПа, нанотвердость покрытия без дополнительной обработки – $7,0 \pm 4,6$ ГПа, а после обработки плазменной струей нанотвердость возрастает до значений $8,6 \pm 1,1$ ГПа.

Для покрытий Ni-Cr, нанесенных плазменно-детонационным методом и подвергнутых дуплексной обработке, после оплавления плазменной струей типично сглаживание рельефа поверхности и формирование мелкозернистой структуры покрытия с микронными размерами зерен, с высокой твердостью, хорошей стойкостью к коррозии в соленой воде и высокой износоустойчивостью. Полагаем, что основной причиной повышения механических свойств покрытий после дуплексной обработки является гомогенизация поверхностного слоя покрытия в результате оплавления, образование в нем интерметаллидных соединений и улучшение его адгезии к подложке.

После дуплексной обработки покрытие ПГ-19Н-01 устойчиво к коррозии в соленой воде. Потенциалы коррозии в соленой воде подложки (сталь 3) и покрытия ПГ-19Н-01 достаточно высокие: $\varphi_{\text{корр}} = -0,38$ В у подложки и $\varphi_{\text{корр}} = -0,49$ В у покрытия, а скорость коррозии существенно выше у подложки: $i_{\text{корр}}(\text{подложка}) = 3,7$ мм/год, $i_{\text{корр}}(\text{покрытие}) = 2,2$ мм/год. Скорость коррозии у данного покрытия до облучения не измеряли, так как оно, в отличие от покрытия с дуплексной обработкой, проявляет сильную склонность к коррозии (изменение окраски, разрушение).

Испытания поверхности образцов с покрытием Ni-Cr на стойкость к износу в среде технического вазелина показали, что самый большой износ происходит при истирании цилиндра по поверхности стальной подложки.

Затем после нанесения покрытия из порошка Ni-Cr-B-Si-Fe плазменно-детонационной технологией наблюдается уменьшение износа. Наименьший износ наблюдался в толстом слое Ni-Cr-B-Si-Fe, оплавленном плазменной струей. Таким образом, нанесение покрытий при вышеуказанных режимах приводит к 10-ти кратному увеличению износостойкости поверхности относительно материала подложки, повторная обработка поверхности сопровождается 20-ти кратным уменьшением износа. Образцы с покрытием Ni-Cr-B-Si-Fe после повторного оплавления плазменной струей, которые хранились в воздухе, во влажной среде в течение 5 ÷ 7 лет, показали неизменные твердость, модуль упругости, сопротивление коррозии, которые остались почти такими же в пределах погрешности измерений, что, несомненно, представляется перспективным для защиты сталей и сплавов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Установлено, что оплавление плазменной струей приводит к существенным морфологическим, структурным и фазовым изменениям поверхностных слоев порошкового сплава ПГ-19Н-01, к гомогенизации поверхности в результате оплавления и взаимного растворения фазовых составляющих, а также к образованию интерметаллидных соединений.

Обнаружено формирование нанокристаллической γ -фазы на основе Ni (размеры нанозерен 2 ÷ 3 нм) и микрокристаллической фазы Ni₃Cr в материале покрытия ПГ-19Н-01, нанесенного методом плазменной детонации. Установлено формирование кристаллографических упорядоченных областей γ -фазы, проявляющееся в наличии точечных рефлексов на кольцевых электронограммах матрицы покрытия.

После дуплексной обработки в покрытиях формируется мелкозернистая микроструктура ($d = 5$ мкм) с высокой нанотвердостью (8,7 ГПа) и микротвердостью порядка 7 ГПа. Микротвердость покрытий возрастает по сравнению с микротвердостью покрытий до обработки примерно на 1 ГПа, образуется переходный слой толщиной порядка 150 мкм с повышенной микротвердостью от покрытия к подложке. Покрытия обладают хорошей адгезией к подложке, высокой износостойкостью и стойкостью к коррозии в морской воде. Улучшение свойств покрытий после дуплексной обработки достигается как за счет фазовых превращений, так и за счет сглаживания шероховатостей поверхности ($R_a = 95,6$ нм в покрытии ПГ-19Н-01 до оплавления и 18,3 нм у обработанного) и гомогенизации поверхностного слоя покрытия при оплавлении.

Покрытия из Ni-Cr, нанесенные методом плазменной детонации и модифицированные дуплексной обработкой можно использовать для защиты запорной арматуры, изделий, работающих в агрессивных средах и подвергающихся трению.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kadyrzhanov K.K., Komarov F.F., Pogrebnyak A.D. i dr. Ionno-luchevaya i ionno-plazmennaya modifikaciya materialov. - M.: MGU, 2005. 640 s.
2. Pogrebnyak, A.D., Ky'ly'shkanov M.K., Alontseva D.L. Struktura i svojstva poverxnostej materialov i kompozitny'x pokry'tij do i posle vozdeystviya koncentrirovanny'mi potokami e'nergii. - VKGTU. Ust'-Kamenogorsk, 2008. - 296 s.
3. Pogrebnyak A.D., Vasyliuk V.V., Alontseva D.L., Kravchenko Yu.A., Rusimov Sh.M., Tyurin Yu.N. The effect of electron beam fusion on the structure and properties of plasma jet sprayed nickel alloy coatings // Tech. Phys. Lett. – 2004. - Vol. 30, №2. – R. 164-167.
4. Pogrebnyak A.D., Ruzimov Sh., Alontseva D.L. et al. Structure and properties of coatings on Ni base deposited using a plasma jet before and after electron a beam irradiation // Vacuum. - 2007. - Vol. 81, №10. - P.1243-1251.
5. Pout Dzh., Foti G., Dzhekobson D. Modificirovanie i legirovanie poverxnosti lazerny'mi, e'lektronny'mi i ionny'mi puchkami. - M.: Mashinostroenie, 1987. - 424 s.
6. Pogrebnyak A.D., Kobzev A., Gritsenko B.P. et al. Effect of Fe and Zr ion implantation and high-current electron irradiation treatment of chemical and mechanical properties of Ti-V-Al alloy // Jour. Appl. Phys. - 2000. - Vol. 87, №5. - P. 2142-2148.
7. Alontseva D.L. Modification of mechanical properties of the Ni-Cr based alloy by continuous electron irradiation // Przegląd Elektrotechniczny (Electrical review). - 2010. - Vol. 86, №7. - P. 42-44.
8. Nash P. The Cr – Ni (Chromium – Nickel) system // Bulletin of Alloy Phase Diagrams. - 1986. - Vol. 27. - R. 466–467.
9. Lei M.K. and Zhu X.M. Plasma-Based low-energy ion implantation of austenitic stainless steel for improvement in wear and corrosion resistance // Surface and Coatings Technology. - 2005. - Vol. 193. - P. 22-28.
10. E'stulin G.V. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka. - 1995. - №11 (prilozhenie k zhurnalu «Stal»). - S. 151-181.