



05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

ВЛИЯНИЕ КРАТНОГО ОПЛАВЛЕНИЯ ПОКРЫТИЯ FeCoCrAlTiCuNiMo, ПОЛУЧЕННОГО ПЛАЗМЕННОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИЕЙ, НА ЕГО ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ ПРИ СУХОМ ТРЕНИИ

✉¹**Попов Дмитрий Анатольевич**
к.т.н., доцент кафедры машиностроительных технологий Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова (РФ)
e-mail: qaz.7@mail.ru

Снятков Евгений Вячеславович
к.т.н., доцент кафедры производства, ремонта и эксплуатации машин Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова (РФ)

Плаhotин Александр Александрович
аспирант Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова (РФ)

Мандрыкин Игорь Александрович
аспирант Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова (РФ)

Попов Петр Николаевич
аспирант Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова (РФ)

Аннотация.

В статье приведены результаты исследований влияния кратного оплавления плазменной струей многокомпонентного покрытия FeCoCrAlTiCuNiMo, полученного плазменной металлизацией в открытой атмосфере, на его износоустойчивость при сухом трении скольжении. Результаты исследований кос-

EFFECT OF A MULTIPLE REFUELING OF THE FeCoCrAlTiCuNiMo COATING OBTAINED BY PLASMA METALLIZATION, ON ITS WEAR RESISTANCE DURING DRY FRICTION

✉¹**Dmitriy A. Popov**
cand. of Tech. Sc., associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies, Voronezh State Forestry Engineering University of G.F. Morozov, Russian Federation, e-mail: qaz.7@mail.ru

Evgeniy V. Snyatkov
Cand. of Tech. Sc., associate Professor of the Department of Production, Repair and Operation of Machines, Voronezh State Forestry Engineering University of G.F. Morozov, Russian Federation

Alexander A. Plahotin
Graduate student of the Department of Mechanical Engineering Technologies of the Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov (Russian Federation)

Igor A. Mandrykin
Graduate student of the Department of Mechanical Engineering Technologies of the Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov (Russian Federation)

Petr N. Popov
Graduate student of the Department of Mechanical Engineering Technologies of the Voronezh State Forestry University named after G. F. Morozov (Russian Federation)

Annotation.

An extension is studied with dry friction sliding of the FeCoCrAlTiCuNiMo nimo multicomponent coating obtained by plasma metallization in an open atmosphere with multiple melting. The results of studies indirectly confirm the effect of coating entropy on increasing its wear resistance with an increase in the number of

венно подтверждают влияние энтропии покрытия на повышении его износостойкости с ростом числа оплавлений.

melting.

Ключевые слова: ПЛАЗМЕННОЕ НАПЫЛЕНИЕ, МОДУЛЯЦИЯ ТОКА ПЛАЗМОТРОНА, МНОГОКОМПОНЕНТНОЕ ПОКРЫТИЕ, ОПЛАВЛЕНИЕ, ИЗНАШИВАНИЕ.

Keywords: PLASMA SPRAYING, MODULATION OF PLASMA TORUS CURRENT, MULTICOMPONENT COATING, MELTING, WEAR.

¹Автор для ведения переписки

Введение

Одним из приоритетных направлений развития материаловедения является созданием многокомпонентных металлических материалов, обладающих высокой энтропией смешения (ВЭС сплавы), которая в свою очередь определяет уникальные физико-механические свойства конструкционных сплавов: жаропрочность, коррозионная стойкость, жаростойкость, износостойкость и т.п. [1-9]. Обеспечение высокой энтропии сплавов достигается не только за счет подбора составляющих сплав компонентов, определения их количества и концентрации, но и технологии получения сплавов, а именно: тепловых режимов плавления, их кратности, методов легирования, способов охлаждения, последующей обработки др.

Несмотря на отличные результаты, достигнутые в результате разработки ВЭС сплавов за последние 10 лет их промышленное применение, пока ограничено по причинам высокой стоимости дефицитных компонентов, составляющих сплав, а также технологии получения, как правило, это литейные методы, не отличающиеся экономичностью. Кроме этого, для обеспечения высокой энтропии сплава, определяющей его свойства, часто требуется кратная переплавка, позволяющая добиться высокой гомогенности состава сплава, а также быстрая скорость охлаждения, способствующая формированию твердого однофазного раствора внедрения и замещения в кристаллической решетке.

Учитывая тот факт, что большинство деталей машин и технологического оборудования работают на износ и выбраковываются по причине предельной выработки поверхности, которая может составлять от 0,1 ... 0,5 мм на сторону, считаем целесообразным проведение исследований в направлении создания эффективных технологий получения высокоэнтропийных покрытий не уступающим по структуре и свойствам ВЭС сплавам. Разработка технологии формирования ВЭС покрытий на поверхности традиционных материалов позволит в разы повысить ресурс деталей машин при одновременном снижении себестоимости их получения, так как в качестве базового материала будет использоваться относительно дешевое сырье, например низкоуглеродистые нелегированные стали, а также из технологического процесса можно исключить дорогостоящую операцию термического или химикотермического упрочнения.

В качестве базового метода создания ВЭС покрытий нами рассматривается плазменная технология, отличающаяся высокой производительностью, широким диапазоном регулирования температурой плазменной струи от 3 до 30 тыс. °С, обеспечивающей расплавление любых материалов; гибким сочетанием с другими способами обработки (механическим, электромеханическим, термическим и др.); уникальными возможностями модуляции силовыми параметрами плазменной струи [10-11].

Материал и методы

Особенностью создания технологии получения многокомпонентных покрытий с высокой энтропией смешения на основе плазменного напыления является необходимость получения гомогенного однофазного сплава. Добиться такого состояния сплава возможно за счет повышения диффузии на границах зерен порошка при сплавлении и повышении качества смешения.

Обеспечение высокой термодинамической стабильности твердого раствора достигается

ся, в частности подбором элементов сплава с близкой электроотрицательностью и атомным радиусом при сохранении общего числа элементов [8]. При этом необходимо принимать в расчет влияние, оказываемое энтальпией смешения на свободную энергию Гиббса. По результатам многих исследований установлены компонентные сочетания составов, которые позволяют получать раствор из них, соответствующий неупорядоченному распределению компонентов с энтропией смешения, выравнивающей влияние энтальпии [7-9].

Для получения покрытий с заданными свойствами, определяемыми гомогенностью состава сплава, требуются исследования до конца не изученных процессов формирования твердых растворов смешения, а также оценке факторов процесса и их влияния на физико-механические свойства получаемых материалов. Такими факторами формирования твердых растворов смешения являются: набор компонентов смеси порошка и их количественное соотношение; окислительное действие среды, степень смешения, степень предварительной химической активации поверхности порошка, а также многочисленные факторы теплового, химического, физического и механического влияния на формирование структуры сплава в покрытии, обеспечивающих его выходные эксплуатационные параметры.

Технология плазменного напыления позволяет обеспечить гомогенность фазового состава сплава покрытия за счет высокой плотности энергии плазменной струи в сочетании с импульсной модуляцией мощности прямой и косвенной дуг при значительных скоростях охлаждения. Технология отлично комбинируется с термической, механической, электрохимической и другим методами обработки [11-15]. Одним из приоритетных направлений развития плазменного метода создания покрытий, в том числе высокоэнтропийных, является совершенствование технологии смешения порошков при одновременной их обработке трением друг о друга в нейтральной атмосфере с поэтапной подачей к плазматрону.

Для получения ВЭС-покрытий использована плазменная технология нанесения смеси нескольких компонентов порошков в открытой атмосфере. Нанесение покрытий осуществлялось комбинированным процессом плазменного напыления многокомпонентного порошка в открытой атмосфере. В качестве плазмообразующего газа использовалась воздушно-пропановая смесь в стехиометрическом соотношении (нейтральная среда в химическом отношении) или с избытком пропана (восстановительная среда). Для гомогенизации покрытий каждый слойкратно оплавлялся плазменной струей с вынесенной (прямой) дугой. Количество слоев составляло 3 ... 4 слоя общей толщиной до 1 мм.

В качестве материалов при напылении использовали смесь порошков металлов FeCoCrAlTiCuNiMo в равном молярном сочетании элементов, составляющих сплав. Порошки напыляли плазмой на роликовые и призматические образцы из стали 45 ГОСТ 1050-88.

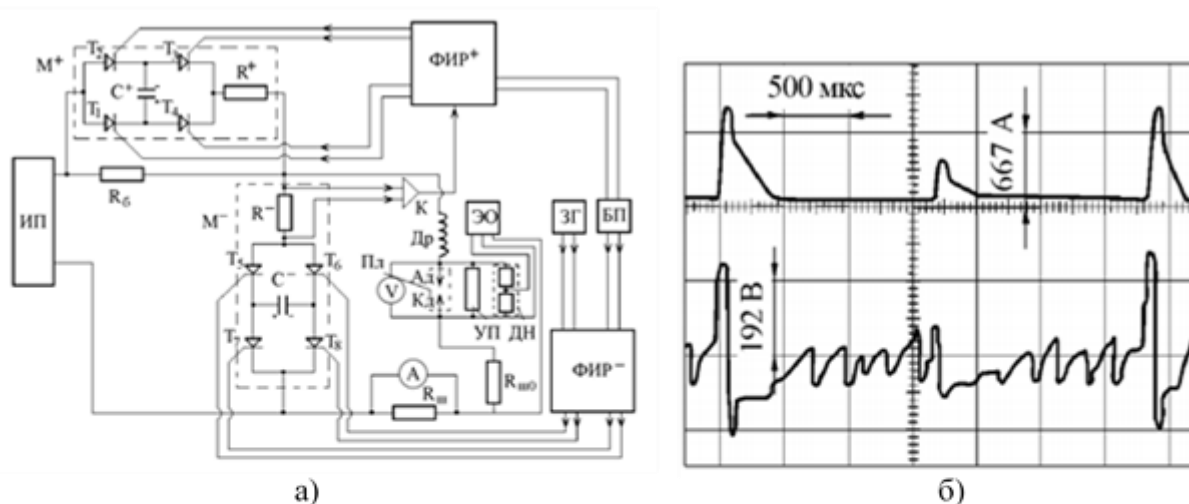
Запатентованная установка для плазменного нанесения покрытий (патент 2211256) представлена на рисунке 1, а. Особенностью установки является возможность модулировать ток дуги плазматрона импульсами длительностью более 30 мкс с амплитудой тока до 700 А при частоте модуляции 5 кГц. Плазменное нанесение покрытий осуществлялось с помощью установки (рис. 1, а). Использовался плазматрон с самоустанавливающейся длиной дуги ЭДП-104. Установка позволяет наносить покрытия в режиме модуляции электрической мощности дуги с помощью модулятора прямой и обратной полярности (рис. 1, б).

Расход газозооушной плазмообразующей смеси (воздух-пропан-бутан) составлял 5-8 г/с. Режимы напыления соответствовали среднемаоувым значениям температуры и скорости плазмы на срезе сопла 4000 ... 6000 градусоо и 500 ... 1000 м/с соответственно.

Анализ элементарного состава, а также определение карт расположения элементов по фазооому составу покрытия осуществляли электронным микроскопом (SEM), а состав фаз дифрактометром «ARL XTRA». Структуру шлифоо сплава до и после обработки в растворе азотной кислоты (20 %) исследовали также на оптическом микроскопе, где определяли микротвердость структурных составляющих на приборе ПМТ-3.

Для исследования элементного химического состава и распределения элементов по структуре использовали функциональные возможности сканирующего электронного микро-

скопа (СЭМ), а фазовый состав покрытия определяли рентгеновским дифрактометром «ARL X'TRA». Анализ микроструктуры покрытий также проводили при помощи оптического микроскопа после травления поверхности шлифов водным раствором азотной кислоты (20 %). Механические свойства фазовых составляющих оценивали микротвердометром ПМТ-3, а интегральную твердость ТК-2М (по Роквеллу).



ИП – источник питания; Пл – плазматрон; Ад и Кд – анод и катод плазматрона; Др – дроссель; Rб – балластный реостат; УП – устройство поджига; М+ и М- – модуляторы прямой и обратной полярностей; Т1–Т8 – тиристоры; С+ и С- – емкости; R+ и R- – сопротивления; ФИР+ и ФИР- – фазоимпульсные регуляторы модулятора прямой и обратной полярностей; ЗГ – задающий частотный генератор; К – компаратор; БП – блок питания; А – амперметр; V – вольтметр; ЭО – осциллограф; ДН – делитель напряжения; Rшн, Rш0 – шунты

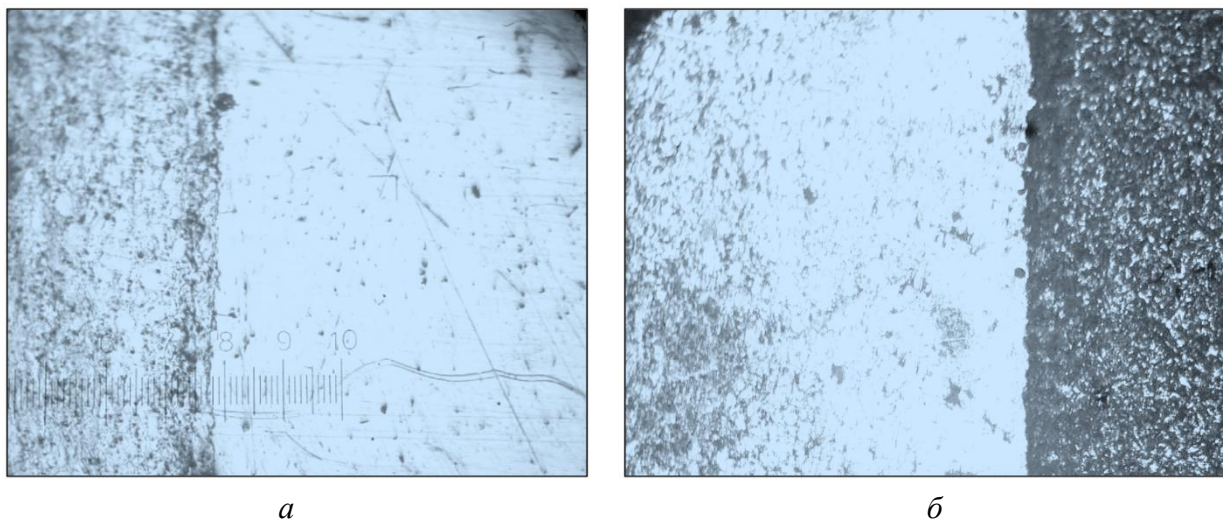
Рисунок 1 – Блок-схема установки плазменного нанесения покрытий (а) и осциллограмма импульсов прямой полярности дуги плазматрона ЭДП-104 (средние ток и напряжение – 210 А и 90 В соответственно) (б)

Для испытаний образцов с покрытием FeCoCrAlTiCuNiMo на изнашивание при сухом трении использовалась стандартная машина трения СМЦ-2. Для случаев: без оплавления (МП), с 2-х кратным оплавлением (МП-2) и с 4-х кратным оплавлением (МП-4). В качестве материала контртела колодки использовалась сталь 45 ГОСТ 1050-88. Оценка износа осуществлялась весовым методом по потере массы на одинаковом для всех образцов пути трения – 1000 м с помощью весов Acculab 0,4 d (точность 0,0002 гр.).

Результаты исследований

Исследования структуры шлифов сплава, полученного плазменным нанесением, показало, что она имела мелкое зерно различное при увеличении ($\times 100$), практически отсутствовали поры и трещины, характерные для металлизации. При травлении шлифов в водном растворе азотной кислоты была выявлена двухфазная микроструктура сплава в соотношении фаз 20 / 80. Меньшая по количеству фаза располагалась по границам зерен большей фазы. Покрытие имело высокую коррозионную стойкость, как видно на фото (б), где обозначена граница раздела основы (справа – сталь 45) и покрытия (слева), сталь подверглась глубокому травлению и имела черный цвет. Коррозионная стойкость вполне согласуется с химическим составом компонентов. Механическими испытаниями установлено, что твердость покрытия в исходном состоянии была 40 ... 42 HRC, а при кратном оплавлении повышалась до уровня 45 ... 47 HRC.

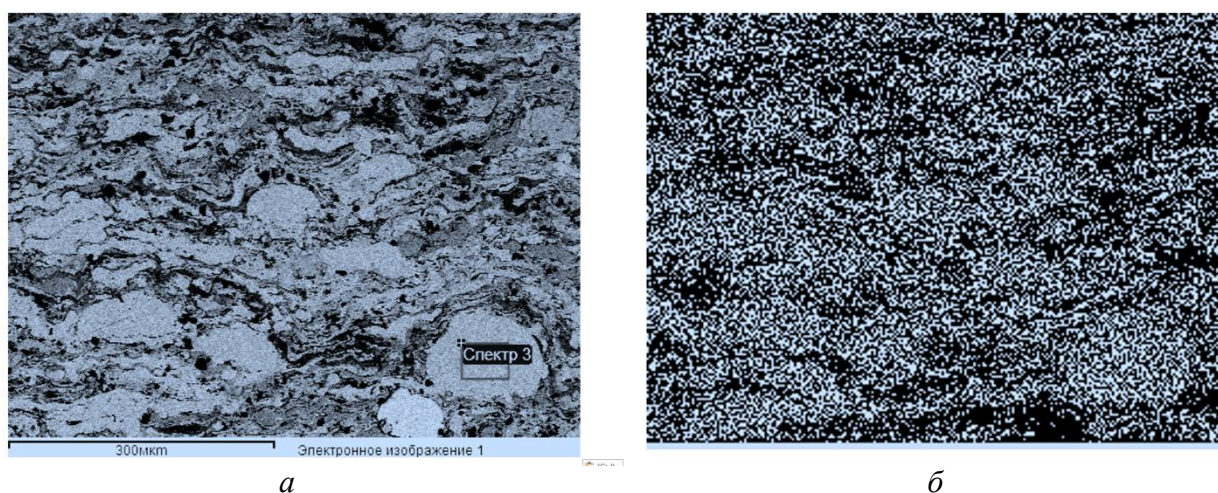
В результате наблюдений характерного участка покрытия на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ), была выявлена слоистая структура покрытия (рис. 3, а) и получена



a – шлиф нетравленный $\times 50$; *б* – шлиф протравленный (20 % HNO_3) $\times 50$

Рисунок 2 – Фото шлифов

карта распределения атомов компонентов, составляющих покрытия, пример распределения для Cu представлен на рисунке 3, (*б*).



a – структура покрытия; *б* – карта распределения Cu по площади поверхности (*a*)

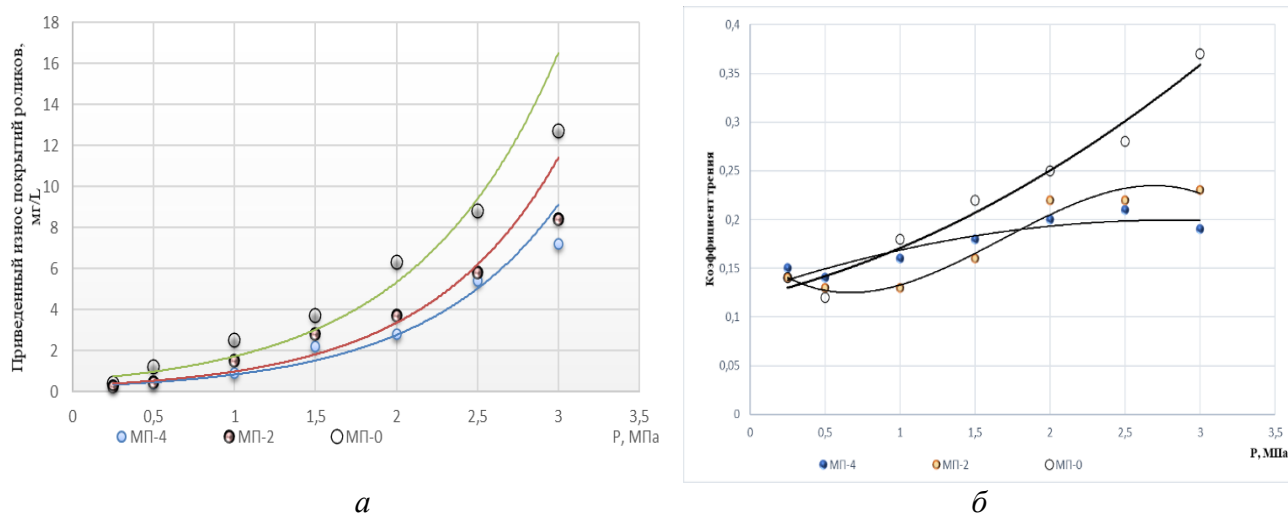
Рисунок 3 – Снимки (СЭМ)

Из наблюдений снимков было отмечено, что отдельные элементы, такие как Mo, Cu, Ni распределились по структуре относительно равномерно, в то время как Ti, Cr, Fe, Co, Al слабо растворялись, образуя выраженные конгломераты. По нашему мнению, это связано с высокой температурой плавления данных металлов, низкой диффузией атомов элементов. Несмотря на тугоплавкость молибдена, однородность его распределения в покрытии можно объяснить тем, что в исходной порошковой смеси он находился не в виде отдельного порошка, а в виде компонента порошкового сплава Cr68Co66Mo6 . Результаты проведенных наблюдений (СЭМ), свидетельствуют о низкой способности отдельных металлов в смеси порошков к формированию твердого однофазного раствора в данных термодинамических условиях.

Рентгеновский анализ показал, что основной фазой покрытия является твердый раствор Ni-Cu с пропорцией содержания атомов 50 / 50 ат. % с ГЦК кристаллической решеткой (параметр решетки 3,563677216064889). Таким образом, покрытие представляло собой Ni-Cu

сплав, в котором атомы сформировали твердый раствор внедрения, а также могут располагаться по границам зерен.

Результаты однофакторного эксперимента триботехнических испытаний на образцах «ролик-колodka» по весовому износу и коэффициенту трения в зависимости от давления в зоне трения представлены на рисунке 4.



МП-0 – без оплавления, МП-2 – 2-х кратное оплавление, МП-4 – 4-х кратное оплавление

Рисунок 4 – Результаты испытаний по износу покрытий (а) и коэффициенту трения (б)

Графики (рис. 4, а) показывают, что разница в износе покрытий не существенна при увеличении давления в диапазоне 0,25-1,0 МПа, при этом увеличение скорости износа покрытий происходит медленно, шероховатость снижается и поверхность покрытий приобретает металлический блеск.

С ростом давления в диапазоне 1,0-2,5 МПа разница в износе покрытий роликов существенно повышается, так износостойкость покрытия МП-4 была в среднем выше в 1,5-2 раза выше, чем МП-0 и в 1,1-1,3 раза больше, чем МП-2. Очевидно, что с повышением количества оплавлений структура покрытия становится более гомогенной за счет равномерного распределения химических элементов и формирования новых металлических фаз, упрочняемых кратной нормализацией. При этом когезионная прочность и энтропия смешения возрастают, что способствует повышению термомеханической стабильности покрытия, его упрочнению. Подтверждением этой гипотезы является повышение дальнейшей разницы в износе между оплавленными и не оплавленными образцами с увеличением удельного давления. Износ с ростом давления свыше 2 МПа резко повышался, на поверхности покрытия МП-0 были заметны следы окислов от фрикционного разогрева, а шероховатость микрорельефа возрастала, появлялись следы задиров и наволакивания. Несущая способность пары трения МП-0 ограничилась значением 2 МПа, в то время как кратно оплавленные покрытия имели гладкую поверхность и равномерное приращение износа вплоть до 3,5 МПа.

Параллельно с износом велись определялся коэффициент трения (рис. 4, б). В парах трения с покрытием МП-4 и МП-2 коэффициент трения изменялся в трех характерных интервалах давлений:

- 1) в интервале 0,25 ... 1,0 МПа наблюдалось незначительное снижение коэффициента трения, вызванные завершением приработки образцов;
- 2) в интервале 1 ... 2 МПа наблюдалось незначительное повышение коэффициента трения пропорционально прилагаемой нагрузке;
- 3) в интервале 2 ... 3 МПа показания по коэффициенту трения стабилизировались, при этом не наблюдалось резких движений маятникового механизма, что свидетельствовало

о стабилизации процесса трения и нормального восприятия нагрузки поверхностью трения.

В отличие от МП-0,кратно оплавленные покрытия образцов (МП-2, МП-4), имели два выраженных участка изменения коэффициента (момента) трения:

– при давлениях 0,25 ... 1 МПа характер изменения коэффициента трения был одинаковых для всех покрытий;

– с повышением давления свыше 1 МПа у МП-0 наблюдался пропорциональный рост момента трения, в то время как у оплавленных покрытий, момент трения стабилизировался и даже незначительное снижался.

При давлении свыше 2,5 МПа трение в паре с МП-0 сопровождалось нестабильными колебаниями маятникового механизма, его резкими перемещениями, которые свидетельствовали о возникновении локальных схватывании поверхностей трения. Данное предположение было подтверждено при визуальном анализе поверхностей образцов, на которых были обнаружены задирры. Таким образом, несущая способность пары МП-0 была менее 2,5 МПа, в то время как образцы в паре с МП-2 и МП-4 сохраняли несущую способность вплоть до 3,5 МПа. Их поверхность при осмотре имела металлический блеск, отсутствовали следы задиров и наволакивания. Это говорит о том, что при росте давления до 3,5 МПа на поверхностях трения образовывались локальные очаги адгезионного схватывания. В свою очередь, это приводило к увеличению коэффициента трения и скорости изнашивания. Сравнение изменений коэффициента трения согласовывалось с визуальной оценкой поверхностей трения и износом.

Это говорит о том, что у неоплавленных покрытий МП-0 переход режима в адгезионное изнашивание из пленочного происходи при меньших давлениях. Это, в свою очередь, приводит к отделению частиц металла с одной поверхности и переносу их на другую поверхность трения, размазыванию мягкого металла по поверхности твердого, увеличению фрикционного нагрева, искажению кристаллической решетки металла вследствие механической деформации и фазового наклепа, образованию окисной пленки на трущихся поверхностях.

Очевидно, что гомогенизированная структура оплавленных покрытий с более высокой энтропией смешения компонентов значительно устойчивее при сухом трении, сопровождающемся фрикционным разогревом поверхности образцов.

Обсуждение и заключение

Результаты проведенных исследований многокомпонентного сплава FeCoCrAlTiCu-NiMo в эквиатомном соотношении компонентов, полученного атмосферным плазменным напылением, показали возможность получения однофазного твердого раствора, используя технологию плазменного напыления [15-20]. Недостатки сплава, вызванные его неоднородностью по структуре возможно минимизировать путем кратного оплавления поверхности покрытия, которое способствует завершению диффузионных процессов, гомогенизации состава покрытия, формированию новых структур, повышению усталостной прочности и росту энтропии. Косвенно это подтверждено результатами испытаний на износ, которые показали, что кратное оплавление покрытия приводило к заметному повышению его износостойкости в условиях сухого трения, сопровождающегося значительным фрикционным разогревом поверхности. Полученные результаты подтверждают предположение о возможности получения однофазных многокомпонентных сплавов с высокой энтропией смешения плазменным напылением в сочетании с кратным оплавлением и указывают на целесообразность более глубоких исследований.

Список литературы

- 1 С-М. Lin, H-L. Tsai, Equilibrium phase of high-entropy FeCoNiCrCu0.5 alloy at elevated temperature, J Alloys Compd., Vol. 489, pp. 619-622 (2010).
- 2 В. Cantor, I. T. H. Chang, P. Knight, A. J. B. Vincent, Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys, Materials Science and Engineering : A : Elsevier, 375, pp. 213

– 218 (2004).

3 F. Otto, The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy / F. Otto, A. Dlouhy, H. Bei, *Acta Material*, Vol. 61, pp. 2628-2638 (201).

4 J. W. Yeh, Recent progress in high-entropy alloys, *Annales de Chimie Science des Material*, Vol. 31, pp. 633-648 (2006).

5 M-R. Chen, S-J. Lin, J-W. Yeh, M-H. Chuang, S-K. Chen, Y-S. Huang, Effect of vanadium addition on the microstructure, hardness, and wear resistance of Al_{0.5}CoCrCuFeNi high-entropy alloy, *Metall Mater Trans*, Vol. A 37(5), pp. 1363–1369 (2006).

6 A. V. Kuznetsov, D. G. Shaysultanov, N. D. Stepanov, G. A. Salishchev, O. N. Senkov, Tensile properties of an AlCrCuNiFeCo high-entropy alloy in as-cast and wrought conditions, *Materials Science and Engineering*, Vol. 533, pp. 107-118 (2012).

7 Z. P. Lu, H. Wang, M. W. Chen, I. Baker, J. W. Yeh, An assessment on the future development of high-entropy alloys : Summary from a recent workshop, *Intermetallic*, Vol. 66, pp. 67-76 (2015).

8 M. V. Karpets, O. M. Maliuchenko, Properties of a multicomponent high-entropy alloy AlCrFeCoNi doped with copper, *Problems of friction and wear*, Vol. 2., pp. 103-111 (2004).

9 Y. Zhang, T. T. Zuo, Z. Tang, M. C. Gao, K. A. Dahmen, P. K. Liaw, Z-P. Lu, Microstructures and properties of high-entropy alloys, *Progress in Materials Science*, Vol. 61, pp. 1-93 (2014).

10 Cheng, J. B., Liang, X. B., Xu, B. S. Effect of Nb addition on the structure and mechanical behaviours of CoCrCuFeNi high-entropy alloy coatings. *Surf. Coat. Technol.* 2014, 240, 184-190.

11 A. D. Pogrebnyak, A. A. Bagdasaryan, I. V. Yakushchenko, V. M. Beresnev, The structure and properties of high-entropy alloys and nitride coatings based on them, *Russian Chemical Reviews*, Rev. 83 (11), pp. 1027-1061 (2014).

12 B. Ren, Z. X. Liu, L. Shi, B. Cai, M. X. Wang. *Appl. Surf. Sci.*, 257, 7172 (2011).

13 S. A. Firstov, Superhard coatings from high-entropy alloys, *Science and innovation*, Vol. 9, pp. 32-39 (2013).

14 B. He, The Phase Evolution and Property of FeCoCrNiAlTi_x High-Entropy Alloying Coatings on Q253 via Laser Cladding, *Coatings*, Vol.7, pp. 157 (2017).

15 Кадырметов, А. М. Перспективы получения многокомпонентных покрытий атмосферным плазменным напылением / А. М. Кадырметов, Д. А. Попов, А. В. Викулин, В. О. Воронежский, Р. В. Стеганцев // Воронежский научно-технический вестник. – 2018. – Т. 4, № 4 (26). – С. 46-54.

16 A. M. Kadyrmetov, S. N. Sharifullin, A. S. Pustovalov, Mathematical modeling of plasma deposition and hardening of coatings-switched electrical parameters, *Journal of Physics: Conference Series* 669 012052 : VII Conference on Low Temperature Plasma in the Processes of Functional Coating Preparation IOP Publishing, pp. 1-5 (2016).

17 G. Suhotchev, A. Kadyrmetov, E. Pamfilov Strengthening of plasma-spraying coats by power impulse modulation of plasmatron direct arc // *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS)*, IEEE Conference Publications, 1-4 Dec., Tomsk, Russia. – pp. 1-5 (2015).

18 A. M. Kadyrmetov, D. A. Popov, E. V. Snyatkov, A. A. Plakhotin Prerequisites for obtaining wear-resistant metal coatings with a high-entropy structure by atmospheric plasma spraying, reflow, and hardening. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 939 012030. – pp.1-6. (2020).

19 Кадырметов, А. М. Исследование многокомпонентных сплавов, созданных атмосферным плазменным напылением. [Электронный ресурс] / А. М. Кадырметов, Д. А. Попов, Е. В. Снятков. // В сб.: Современные проблемы и направления развития металловедения и термической обработки металлов и сплавов. Сборник научных статей

Международной научно-технической конференции, посвященной 150-летию со дня рождения академика А. А. Байкова. Курск, 2020. С. 78-82.

20 A. M. Kadyrmetov, D. A. Popov, E. V. Snyatkov Investigation of a multicomponent FeCoCrAlTiCuMo alloy coating applied by a combined process based on atmospheric plasma metallization. MATEC Web Conf. Volume 329, (2020). 02005.

References

1 C-M. Lin, H-L. Tsai, Equilibrium phase of high-entropy FeCoNiCrCu_{0.5} alloy at elevated temperature, *J Alloys Compd.*, Vol. 489, pp. 619-622 (2010).

2 B. Cantor, I. T. H. Chang, P. Knight, A. J. B. Vincent, Microstructural development in equiatomic multicomponent alloys, *Materials Science and Engineering : A : Elsevier*, 375, pp. 213 – 218 (2004).

3 F. Otto, The influences of temperature and microstructure on the tensile properties of a CoCrFeMnNi high-entropy alloy / F. Otto, A. Dlouhy, H. Bei, *Acta Material*, Vol. 61, pp. 2628-2638 (201).

4 J. W. Yeh, Recent progress in high-entropy alloys, *Annales de Chimie Science des Material*, Vol. 31, pp. 633-648 (2006).

5 M-R. Chen, S-J. Lin, J-W. Yeh, M-H. Chuang, S-K. Chen, Y-S. Huang, Effect of vanadium addition on the microstructure, hardness, and wear resistance of Al_{0.5}CoCrCuFeNi high-entropy alloy, *Metall Mater Trans*, Vol. A 37(5), pp. 1363–1369 (2006).

6 A. V. Kuznetsov, D. G. Shaysultanov, N. D. Stepanov, G. A. Salishchev, O. N. Senkov, Tensile properties of an AlCrCuNiFeCo high-entropy alloy in as-cast and wrought conditions, *Materials Science and Engineering*, Vol. 533, pp. 107-118 (2012).

7 Z. P. Lu, H. Wang, M. W. Chen, I. Baker, J. W. Yeh, An assessment on the future development of high-entropy alloys: Summary from a recent workshop, *Intermetallic*, Vol. 66, pp. 67-76 (2015).

8 M. V. Karpets, O. M. Maliuchenko, Properties of a multicomponent high-entropy alloy AlCrFeCoNi doped with copper, *Problems of friction and wear*, Vol. 2., pp. 103-111 (2004).

9 Y. Zhang, T. T. Zuo, Z. Tang, M. C. Gao, K. A. Dahmen, P.K. Liaw, Z-P. Lu, Microstructures and properties of high-entropy alloys, *Progress in Materials Science*, Vol. 61, pp. 1-93 (2014).

10 Cheng, J. B., Liang, X. B., Xu, B.S. Effect of Nb addition on the structure and mechanical behaviours of CoCrCuFeNi high-entropy alloy coatings. *Surf. Coat. Technol.* 2014, 240, 184-190.

11 A. D. Pogrebnyak, A. A. Bagdasaryan, I. V. Yakushchenko, V. M. Beresnev, The structure and properties of high-entropy alloys and nitride coatings based on them, *Russian Chemical Reviews*, Rev. 83 (11), pp. 1027-1061 (2014).

12 B. Ren, Z.X. Liu, L. Shi, B. Cai, M.X. Wang. *Appl. Surf. Sci.*, 257, 7172 (2011).

13 S. A. Firstov, Superhard coatings from high-entropy alloys, *Science and innovation*, Vol. 9, pp. 32-39 (2013).

14 B. He, The Phase Evolution and Property of FeCoCrNiAlTi_x High-Entropy Alloying Coatings on Q253 via Laser Cladding, *Coatings*, Vol.7, pp. 157 (2017).

15 Kadyrmetov, A. M. Prospects for obtaining multicomponent coatings atmospheric plasma spraying / A. M. Kadyrmetov, D. A. Popov, A. V. Vikulin, V. O. Vorontetsky, R. V. Stegansev // *Voronezh Scientific and Technical Bulletin*. – 2018. – T. 4, №. 4 (26). – P. 46-54.

16 A. M. Kadyrmetov, S. N. Sharifullin, A. S. Pustovalov, Mathematical modeling of plasma deposition and hardening of coatings-switched electrical parameters, *Journal of Physics : Conference Series* 669 012052 : VII Conference on Low Temperature Plasma in the Processes of Functional Coating Preparation IOP Publishing, pp. 1-5 (2016).

17 G. Suhotchev, A. Kadyrmetov, E. Pamfilov Strengthening of plasma-spraying coats by

power impulse modulation of plasmatron direct arc // International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS), IEEE Conference Publications, 1-4 Dec., Tomsk, Russia. – pp. 1-5 (2015).

18 A. M. Kadyrmetov, D. A. Popov, E. V. Snyatkov, A. A. Plakhotin Prerequisites for obtaining wear-resistant metal coatings with a high-entropy structure by atmospheric plasma spraying, reflow, and hardening. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 939 012030. – pp.1-6. (2020).

19 Kadyrmetov, A. M. The study of multicomponent alloys created by atmospheric plasma spraying. [Electronic resource] / A. M. Kadyrmetov, D. A. Popov, E. V. Removal. // In Sat. : Modern problems and directions for the development of metals and thermal processing of metals and alloys. Collection of scientific articles of the International Scientific and Technical Conference dedicated to the 150th anniversary of the birth of Academician A. A. Baykova. Kursk, 2020. P. 78-82.

20 Kadyrmetov A. M. Popov D. A., Snyatkov E. V. Investigation of a multicomponent FeCoCrAlTiCuMo alloy coating applied by a combined process based on atmospheric plasma metallization. MATEC Web Conf. Volume 329, (2020). 02005.

© Попов Д.А., Снятков Е.В., Плахотин А.А., Мандрыкин И.А., Попов П.Н., 2021