

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-249-255

УДК 621.793.71

Исследование износостойких покрытий из диффузионно-легированной аустенитной стали, полученных плазменным напылением и последующей лазерной обработкой

Докт. техн. наук, проф. О. Г. Девойно¹⁾, А. Ф. Пантелеенко¹⁾¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Проведено исследование износостойких покрытий из диффузионно-легированной аустенитной стали, полученных плазменным напылением и последующей лазерной обработкой. Общеизвестно, что большинство деталей машин и оборудования выходит из строя в результате изнашивания поверхностного слоя. Применение диффузионно-легированного порошка ПР-Х18Н9 на основе аустенитной стали при использовании комбинированной технологии, включающей плазменное напыление и лазерное оплавление, позволяет получать качественные покрытия с высокими эксплуатационными характеристиками. Покрытие обладает гомогенной структурой с характерным дисперсным, мелкодендритным строением. При использовании различных режимов борирования порошка и лазерной обработки возможно управление пористостью (0,23–4,70 %), так как данный фактор является «наследуемым» параметром и на него влияют не только характеристики лазерной обработки, но и время борирования порошка. Установлено, что наименьшие деформации, а значит, и внутренние напряжения образуются в покрытии в случае применения самофлюсующегося диффузионно-легированного в течение 3 ч порошка. Выявлено, что для удельной энергии 100–300 Дж/мм² вне зависимости от времени борирования наблюдается резкое увеличение микротвердости на глубине 150–400 мкм от поверхности. Покрытия могут быть успешно применены в промышленности, так как требуемая после лазерного оплавления механическая обработка деталей не ухудшит эксплуатационные характеристики при снятии менее твердого слоя покрытия. Испытания деталей в условиях сухого трения скольжения без смазки показали рост износостойкости в 3–3,2 раза при сохранении коррозионной стойкости.

Ключевые слова: диффузионно-легированный порошок, плазменное напыление, лазерная обработка, напряжения, деформации, износостойкость

Для цитирования: Девойно, О. Г. Исследование износостойких покрытий из диффузионно легированной аустенитной стали, полученных плазменным напылением и последующей лазерной обработкой / О. Г. Девойно, А. Ф. Пантелеенко // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 3. С. 249–255. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-249-255

Investigation on Wear-Resistant Coatings from Diffusion-Alloyed Austenitic Steel Obtained by Plasma Spraying and Subsequent Laser Processing

O. G. Devoino¹⁾, A. F. Panteleenko¹⁾¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. The paper describes investigations on wear-resistant coatings from diffusion-alloyed austenitic steel obtained while using plasma spraying and subsequent laser processing. It is common knowledge that majority of machine parts and equipment has been out of service due to wear of surface layer. Application of diffusion-alloyed powder ПР-Х18Н9 based

Адрес для перепискиПантелеенко Алексей Федорович
Белорусский национальный технический университет
ул. Я. Коласа, 12,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-81-85
mvm@bntu.by**Address for correspondence**Panteleenko Aleksey F.
Belarusian National Technical University
12 Ya. Kolasa str.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-81-85
mvm@bntu.by

on austenitic steel while using combined technology including plasma spraying and laser infusion makes it possible to obtain qualitative coatings with high operational characteristics. The coating has a homogeneous structure with characteristic disperse finely-dendrite formation. While using various powder boronizing modes and laser processing it is possible to control a porosity (0.23–4.70 %) because the given factor is considered as an inherited parameter and it is influenced not only by laser processing characteristics but by powder boronizing time. It has been established that the least deformations and internal stresses are formed in the coating in the case when self-fluxing diffusion-alloyed powder has been applied for 3 hours. It has been revealed that there is a sharp increase in micro-hardness at the depth of 150–400 μm from the surface for a specific energy of 100–300 J/mm^2 regardless of boronizing time. Coatings can be successfully applied in industry because after laser infusion the required mechanical processing of parts will not worsen operational characteristics when less hard coating layer is removed. Tests of parts under conditions of dry sliding friction without lubrication have shown an increase of wear-resistance by 3–3.2-fold while preserving corrosion-resistance.

Keywords: diffusion-alloyed powder, plasma spraying, laser processing, stresses, deformations, wear resistance

For citation: Devoino O. G., Panteleenko A. F. (2017) Investigation on Wear-Resistant Coatings from Diffusion-Alloyed Austenitic Steel Obtained by Plasma Spraying and Subsequent Laser Processing. *Science and Technique*. 16 (3), 249–255. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-3-249-255 (in Russian)

Введение

Общеизвестно, что большинство деталей машин и оборудования выходит из строя в результате изнашивания поверхностного слоя. В мировой практике распространенными способами повышения износостойкости деталей машин и оборудования являются технологии их восстановления и упрочнения напылением и наплавкой, в частности комбинированные технологии [1–5]. Они позволяют сочетать преимущества каждой из технологий и добиваться наибольшей эффективности. К одной из таких перспективных технологий, получивших активное развитие в последние годы, относится плазменное напыление с последующей обработкой концентрированным потоком энергии, лазерным в частности. Лазерная обработка позволяет при минимальных кратковременных тепловложениях в деталь формировать ультрадисперсную структуру с повышенными триботехническими свойствами [6–8].

Наряду с выбором технологии не менее важно использование эффективного недорогого материала порошка, позволяющего в совокупности с технологией получать износостойкую структуру покрытия, например такую, как аустенитная матрица с дисперсными металлоподобными (карбидными, боридными и т. п.) включениями. При этом наряду с высокой износостойкостью, в том числе по сравнению с обычным аустенитным покрытием, может быть обеспечена и достаточная коррозионная стойкость. Это очень важно, например, для таких ответственных деталей, которые работают

в условиях изнашивания и одновременного воздействия коррозионных сред (детали буровой и строительной техники, бумагоделательного и нефтехимического производств, горнодобывающего оборудования и др.).

Распространенное в практике использование для этих целей самофлюсующихся порошков на никелевой основе (типа ПР-ХН80СР4) в последние годы все более проблематично в силу значительно возросшей их стоимости, различных коэффициентов термического линейного расширения такого покрытия и стальной основы, обуславливающих дефектообразование (трещины и сколы) в покрытии, а также неустойчивости, как правило, избыточной совокупности свойств (износо-, тепло-, жаро- и коррозионная стойкость). Кроме того, в промышленности широко применяются самофлюсующиеся порошки на железной основе, однако более высокая температура оплавления покрытия после их нанесения зачастую приводит к короблению деталей, выгоранию легирующих элементов. При применении таких порошков в покрытии образуется высокая пористость.

Перечисленные факторы обуславливают основную область применения порошков данного типа – детали почвообрабатывающих машин, строительной техники. Поэтому авторами статьи предложен ранее не применявшийся для получения напыленных износостойких плазменных покрытий самофлюсующийся диффузионно-легируемый порошок аустенитной стали ПР-Х18Н9 [9].

Потребность в технологии упрочнения и восстановления деталей буровой и строительной

техники, работающей в условиях одновременно изнашивания и коррозии, обусловила необходимость исследования целого комплекса вопросов, включающих разработку специального для выбранной комбинированной технологии (плазменное напыление с лазерной обработкой) материала на основе порошка аустенитной стали, определение оптимальных параметров комбинированной технологии (с лазерным воздействием как заключительным этапом) с точки зрения получения минимальной пористости, износостойкости в условиях механического изнашивания с воздействием абразивных частиц. При этом также исследованы особенности поведения частицы в плазменной струе и проведен расчет оптимальных параметров получения и обработки порошка.

Таким образом, разработка оптимальной комбинированной технологии восстановления и упрочнения деталей машин и оборудования и повышения их срока службы в рамках формулы «технология, новый материал, требуемая структура (аустенит + бориды) и свойства покрытия» обуславливают актуальность темы и необходимость ее разработки.

Методика исследований

Напыление износостойкого слоя из диффузионно-легированных порошков аустенитной стали толщиной 0,4–0,5 мм проводили на следующих режимах: сила тока $I = 350$ А, дистанция напыления $L = 120$ мм, напряжение $U = 65–70$ В. Фазовый состав покрытий определяли методом рентгеноструктурного анализа на рентгенографическом дифрактометре ДРОН-3. Изучение микроструктуры на травленных и нетравленных шлифах исследуемых материалов проводили с помощью металлографического микроскопа «Альтами МЕТ-1», спектрального электронного микроскопа Vega II LMU, растворного электронного микроскопа LEO1455VP. Лазерную обработку напыленных покрытий выполняли на установке «Комета-2» на следующих режимах: мощность лазера $P = 1$ кВт, удельная энергия $E = 100–300$ Дж/мм².

Микроструктура плазменных покрытий из диффузионно-легированных порошков аусте-

нитной стали, полученных методом борирования в твердом боризаторе, приведена на рис. 1. В целом такие покрытия характеризуются гетерогенностью структуры, наличием нерасплавившихся боридных оболочек, что характерно для частиц порошка размерами более 90–100 мкм, частицы меньшей фракции разрушаются в полете при расплавлении металлического ядра.

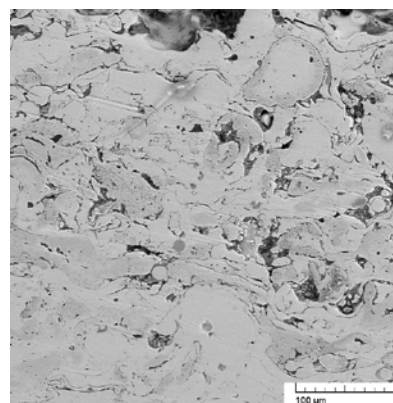


Рис. 1. Микроструктура плазменно-напыленного покрытия из диффузионно-легированного порошка ПР-Х18Н9

Fig. 1. Microstructure of plasma-sprayed coating made of diffusion-alloyed ПР-Х18Н9 powder

Покрытия из применяемых порошков характеризуются наличием пористости (9,59–14,68 % в зависимости от времени диффузионного легирования). При этом следует отметить несколько типов пористости: традиционные газовые поры, возникающие при напылении покрытия [3]; пористость, возникающая вблизи от нерасплавленных частиц; ряд пор обладает «наследственным» характером – они образуются в частицах при диффузионном легировании аустенитного порошка ПР-Х18Н9 и соответственно выявляются в нетрансформировавшейся частице в напыленном покрытии (рис. 1).

Рентгеновский фазовый анализ показывает присутствие в покрытии фаз Fe_2B и FeB , также выявлено наличие метастабильных боридов Fe_3B (структура изоморфна карбиду Fe_3C) и $Fe_{23}B_6$ (пространственная группа Fm-3m) [10].

В плазменно-напыленных покрытиях присутствуют нерасплавившиеся частицы, борид-

ные оболочки, оксидные пленки, характерные для плазменного напыления, что позволяет предположить недостаточные физико-механические характеристики покрытия и плохую адгезию покрытия с подложкой. С целью устранения этих недостатков покрытия подвергали лазерной обработке на установке «Комета-2». После лазерной обработки происходит практически полный переплав покрытия (его степень зависит от величины удельной энергии).

Микроструктура покрытия имеет характерное мелкодисперсное, дендритное строение. Плазменно-напыленные покрытия после лазерной обработки характеризуются низкой пористостью (0,23–4,70 %) и гомогенностью структуры (рис. 2а). При лазерной обработке образуется различная микроструктура (рис. 2), однако среди разных ее типов можно выделить три основных: доэвтектическая (рис. 2а), «квазиэвтектическая» (рис. 2б) и заэвтектическая (рис. 2с) [10, 11]. В рассматриваемом случае речь идет о «квазиэвтектике», так как образование этого типа микроструктуры зависит от плотности энергии и скорости охлаждения расплава: чем быстрее охлаждение, тем больше возрастает доля «квазиэвтектики» и близких состояний [10, 12].

Исследование распределения микротвердости по глубине нанесенного покрытия показало,

что для удельной энергии $E = 300 \text{ Дж/мм}^2$ вне зависимости от времени борирования наблюдается резкое увеличение микротвердости на глубине 150–250 мкм от поверхности до $H_{\mu} = 2768\text{--}3572 \text{ МПа}$, что объясняется формированием ультрадисперсной структуры за счет быстрого теплоотвода после лазерной обработки в глубь металла (рис. 3а). Снижение твердости на поверхности объясняется большим тепловложением в покрытие. Для удельной энергии $E = 100 \text{ Дж/мм}^2$ аналогичный скачок происходит на глубине 350–400 мкм от поверхности (рис. 3б). Полученные данные свидетельствуют, что покрытия могут быть успешно применены в промышленности, так как требуемая после лазерного оплавления механическая обработка деталей не ухудшит эксплуатационные характеристики при снятии менее твердого слоя покрытия.

Рентгеновский фазовый и микрорентгено-спектральный анализы позволили установить, что основными фазами покрытий после лазерной обработки являются $\gamma\text{-Fe}$, $\alpha\text{-Fe}$, Fe_2B , FeB (диффузионное легирование порошка в течение 3 ч при температуре $900 \text{ }^\circ\text{C}$). Наличие в покрытии $\alpha\text{-Fe}$ связано с частичной ферритизацией порошка при диффузионном легировании и фазовыми превращениями в процессе плазменного напыления и лазерной обработки.

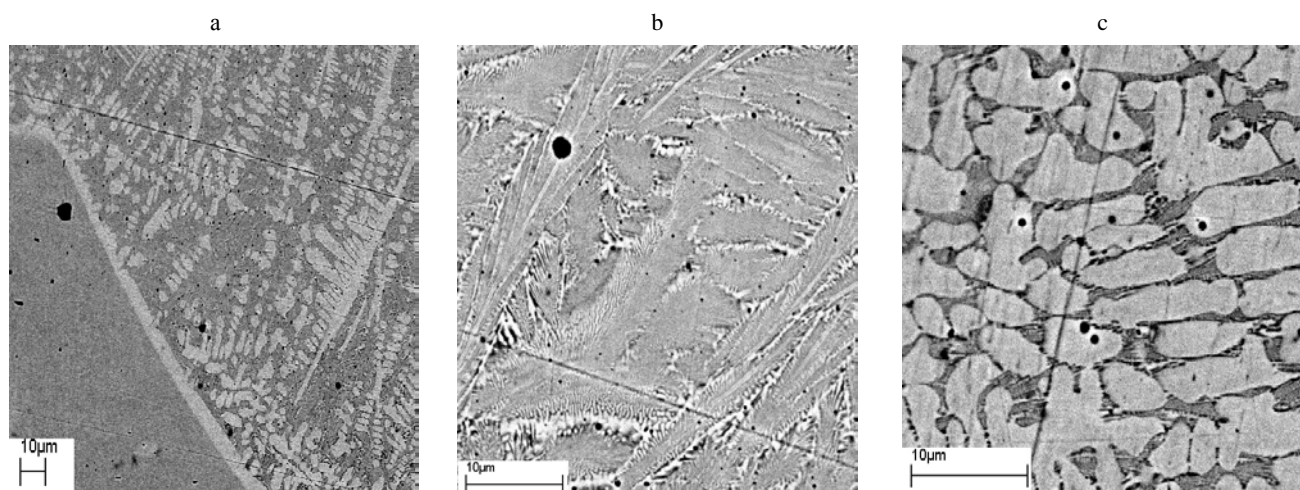


Рис. 2. Микроструктура плазменно-напыленного покрытия после лазерной обработки при удельной энергии: а – $E = 300 \text{ Дж/мм}^2$; б – 100; с – 150 Дж/мм^2

Fig. 2. Microstructure of plasma-sprayed coating after laser processing for specific energy: а – $E = 300 \text{ J/mm}^2$; б – 100; с – 150 J/mm^2

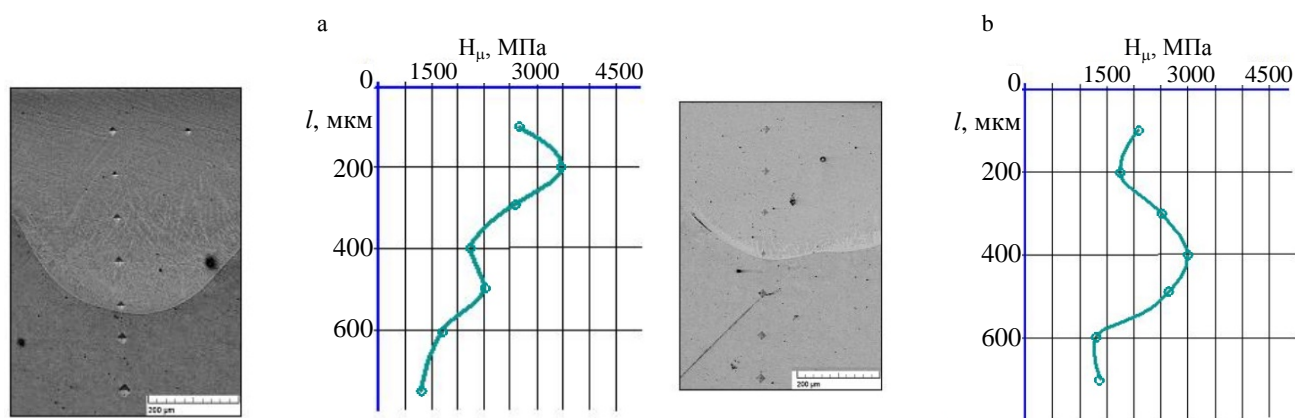


Рис. 3. Распределение микротвердости покрытий по глубине при удельной энергии: а – $E = 300$ Дж/мм²; б – 100 Дж/мм²
 Fig. 3. Distribution of microhardness of coatings in depth for specific energy: а – $E = 300$ J/mm²; б – 100 J/mm²

Для изучения поведения при эксплуатации покрытий в них исследовали деформации и внутренние напряжения согласно методике, описанной в [4]. Внутренние напряжения в покрытиях напрямую зависят от деформации образцов. Деформации напыленных и оплавленных образцов из диффузионно-легированного порошка ПР-Х18Н9 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Деформация образцов
 в результате напыления и оплавления
 Deformation of specimens
 as a result of spraying and infusion

Время борирования, ч	Удельная энергия, Дж/мм ²	Деформация, мкм		Общая величина деформации Δ , мкм
		после напыления	после оплавления лазером	
1	100	-520	770	890
	150	-600	680	1280
	200	-870	680	1550
	300	-1060	790	1850
3	100	-50	440	490
	150	0	400	400
	200	-90	460	550
	300	-30	440	470
5	100	-160	500	660
	150	-300	560	860
	200	-820	770	1590
	300	-270	580	860

Примечание. Если нет знака «-», то изгиб плоского образца направлен вверх (сжимающие напряжения), при наличии знака «-» изгиб направлен вниз (растягивающие напряжения).

В графическом виде результаты опытов представлены на рис. 4. По степени деформирования образцов можно судить о появляющихся

на различных стадиях получения покрытия напряжениях. Так, при плазменном напылении в образцах возникают растягивающие напряжения, а после лазерной обработки существенное термическое влияние приводит к смене направления напряжений и образованию сжимающих напряжений.

Из анализа рис. 4 можно предположить, что состав напыляемого покрытия имеет существенное влияние на величину напряжений, возникающих при плазменном напылении: при напылении порошка с минимальным содержанием бора (1 ч) значительная часть энергии плазменной струи идет не на расплавление материала, а на нагрев самого образца, что ведет к образованию больших растягивающих напряжений. Столь резкое падение растягивающих напряжений при напылении порошка после 3 ч и небольшое увеличение после 5 ч обработки можно объяснить тем, что теплопроводность бориды Fe_2B в четыре раза меньше, чем у FeB , а в покрытии присутствует избыточное количество нерасплавившихся боридных оболочек, поэтому теплота плазменного факела плохо проводится в тело образца.

При большей удельной энергии отмечаются значительные изменения величины внутренних напряжений. После лазерной обработки наблюдается изменение знаков напряжений и их размеров. Это можно объяснить разными коэффициентами термического расширения и размерами зоны расплава и зоны термического влияния, что, в свою очередь, зависит от химического состава покрытия и его микроструктуры.

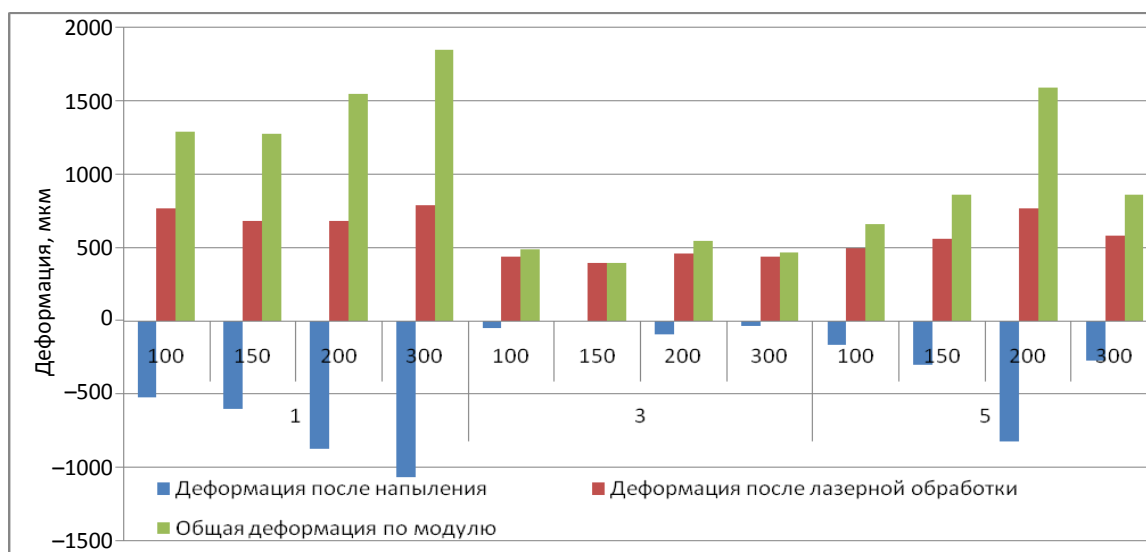


Рис. 4. Остаточные напряжения на разных этапах обработки

Fig. 4. Residual stresses at different processing stages

Из рис. 4 видно, что наименьшие напряжения образуются в покрытии при использовании диффузионно-легированного порошка в течение 3 ч. Исходя из этого, дальнейшие расчеты проводили с учетом этого фактора. Для оптимизации процессов высокоэнергетической обработки плазменно-напыленных покрытий применили центральный композиционный ротатбельный план второго порядка. В качестве исследуемого параметра приняли износостойкость, а в качестве факторов выступали содержание бора (зависит от времени борирования), скорость перемещения лазерного луча v , плотность мощности q . Оптимальные параметры получения покрытия из диффузионно-легированного порошка ПР-Х18Н9 плазменным напылением и лазерным оплавлением следующие: время борирования порошка 3 ч, удельная энергия $E = 300 \text{ Дж/мм}^2$.

Для образцов покрытий проводили испытания на трение и износ на машине трения МТ-1 по схеме «диск – вал». Триботехнические испытания выполняли в условиях сухого трения скольжения без смазки. Износостойкость исследуемых образцов повысилась в 2,5–3,2 раза по сравнению с образцами из закаленной стали 45. Также для изучения эксплуатационных характеристик был изучен такой параметр, как коррозионная стойкость. Исследования в камере соляного тумана согласно ГОСТ 9.308–85 показали, что коррозионная стойкость напыленных и оплавленных образцов сопоставима

с коррозионной стойкостью нержавеющей стали.

По разработанной технологии была упрочнена партия деталей «Шпилька-фиксатор Ф-240» тележки перебазирующего башенного крана, работающих в условиях сухого трения скольжения с абразивными частицами. В результате испытаний определено, что износостойкость упрочненных деталей выросла в 3–3,2 раза по сравнению с базовыми деталями.

ВЫВОДЫ

1. Применение самофлюсующегося диффузионно-легированного порошка аустенитной стали ПР-Х18Н9 [9] позволяет получать порошок и покрытия с управляемой структурой, а следовательно, и свойствами. С помощью разработанного порошка в совокупности с комбинированной технологией в условиях мелкосерийного производства можно упрочнять и восстанавливать широкую номенклатуру деталей с разными свойствами. При использовании различных режимов борирования порошка и лазерной обработки возможно управление пористостью (0,23–4,70 %), так как данный фактор является «наследуемым» параметром и на него влияют не только характеристики лазерной обработки, но и время борирования порошка.

2. Установлено, что наименьшие деформации, а значит, и внутренние напряжения образуются в покрытии в случае применения самофлюсующегося диффузионно-легированного в

течение 3 ч порошка. Выявлено, что для удельной энергии 100–300 Дж/мм² вне зависимости от времени борирования наблюдается резкое увеличение микротвердости на глубине 150–400 мкм от поверхности. Покрытия могут быть успешно применены в промышленности, так как требуемая после лазерного оплавления механическая обработка деталей не ухудшит эксплуатационные характеристики при снятии менее твердого слоя покрытия.

3. Проведенные испытания деталей строительной техники подтвердили корректность лабораторных исследований. Износостойкость упрочненных деталей увеличилась в 3–3,2 раза.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хасуи, А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки, пер. с япон. В. Н. Попова; под ред. В. С. Степина, Н. Г. Шестеркина. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
2. Восстановление деталей машин: справ. / Ф. И. Пантелеенко [и др.]; под ред. В. П. Иванова. М.: Машиностроение, 2003. 672 с.
3. Витязь, П. А. Основы нанесения износостойких, коррозионноустойчивых и теплозащитных покрытий / П. А. Витязь, А. Ф. Ильющенко, А. И. Шевцов. Минск: Беларус. наука, 2006. 363 с.
4. Износостойкие газотермические покрытия из диффузионно-легированных порошков на основе чугуна / В. М. Константинов [и др.]; под ред. Ф. И. Пантелеенко. Минск: Технопринт, 2005. 146 с.
5. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П. А. Витязь [и др.]. Минск: Беларус. наука, 1998. 583 с.
6. Ильющенко, А. Ф. Высокоэнергетическая обработка плазменных покрытий / А. Ф. Ильющенко, В. А. Оковитый, А. И. Шевцов; под общ. ред. А. Ф. Ильющенко. Минск: Бестпринт, 2007. 246 с.
7. Григорьянц, А. Г. Основы лазерной обработки материалов / А. Г. Григорьянц. М.: Машиностроение, 1989. 304 с.
8. Parallel Laser Melted Tracks: Effects on the Wear Behaviour of Plasma-Sprayed Ni-Based Coatings / D. Felgueroso [et al.] // *Wear*. 2008. Vol. 264, No 3–4. P. 257–263.
9. Способ получения самофлюсующего порошка: пат. 17321 Респ. Беларусь, В22F 1/02, C23C 8/70 / В. А. Оковитый, Ф. И. Пантелеенко, О. Г. Девойно, А. Ф. Пантелеенко, В. В. Оковитый; заявитель БНТУ, № а20100650; заявл. 30.04.2010, опубл. 30.06.2013 // *Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці*. 2013. № 3. С. 78.
10. Пантелеенко, А. Ф. Композиционные покрытия, полученные высокоэнергетическими методами / А. Ф. Пантелеенко, О. Г. Девойно; под ред. В. В. Клубовича // *Перспективные материалы и технологии*. Витебск: Изд-во УО «ВГТУ», 2013. С. 587–607.
11. Пантелеенко, А. Ф. Исследование морфологии и микроструктуры покрытий из диффузионно-легированного порошка ПР-Х18Н9, полученных плазменным напылением с последующим лазерным модифицированием / А. Ф. Пантелеенко // *Вестник БрГТУ. Сер. «Машиностроение»*. 2012. № 4. С. 37–39.
12. Таран, Ю. Н. Структура эвтектических сплавов / Ю. Н. Таран, В. Н. Мазур. М.: Металлургия, 1978. 312 с.

Поступила 22.12.2016

Подписана в печать 23.02.2017

Опубликована онлайн 30.05.2017

REFERENCES

1. Hasui A., Morigaki O. (1985) *Surfacing and Spraying*. Moscow, Mashinostroyeniye Publ. 240 (in Russian).
2. Panteleenko F. I., Lyalyakin V. P., Ivanov V. P., Konstantinov V. M. (2003) *Reconditioning of Machine Parts: Reference Book*. Moscow, Mashinostroyeniye. 672 (in Russian).
3. Vityaz P. A., Ilyushchenko A. F., Shevtsov A. I. (2006) *Fundamentals of Wear-Resistant, Corrosion-Resistant and Thermal Protection Coating Depositions*. Minsk, Belaruskaya Nauka Publ. 363 (in Russian).
4. Panteleenko F. I., Konstantinov V. M., Spiridonov N. V., Devoino O. G., Avsievich A. M. (2005) *Wear-Resistant Gas-Thermal Coatings from Diffusion-Alloyed Powder Based on Cast-Iron Chips*. Minsk, Tekhnoprint Publ. 146 (in Russian).
5. Vityaz' P. A., Ivashko V. S., Ilyushchenko A. F., Shevtsov A. I., Manoilo E. D. (1998) *Theory and Practice for Protective Coating Deposition*. Minsk, Belaruskaya Nauka Publ. 583 (in Russian).
6. Ilyushchenko A. F., Okovity V. A., Shevtsov A. I. (2007) *High-Energy Processing of Plasma Coatings*. Minsk, Bestprint Publ. 246 (in Russian).
7. Grigoriants A. G. (1989) *Fundamental of Laser Materials Processing*. Moscow, Mashinostroyeniye. 304 (in Russian).
8. Felgueroso D., Vijande R., Cuetos J. M., Tucho R., Hernández A. (2008) Parallel Laser Melted Tracks: Effects on the Wear Behaviour of Plasma-Sprayed Ni-Based Coatings. *Wear*, 264 (3–4), 257–263. DOI: 10.1016/j.wear.2007.03.015.
9. Okovity V. A., Panteleenko F. I., Devoino O. G., Panteleenko A. F., Okovity V. V. (2013) *Method for Obtaining Self-Fluxing Powder*. Patent Republic of Belarus No 17321 (in Russian).
10. Panteleenko A. F., Devoino O. G., Klubovich V. V. (2013) Composite Coatings Obtained While Using High-Energy Methods. *Non-Conventional Materials and Technologies*. Vitebsk, Vitebsk State Technological University, 587–607 (in Russian).
11. Panteleenko A. F. (2012) The Examination of Morphology and Microstructure of Coatings Made of Diffusion-Alloyed Powder ПР-Х18Н9 Received with Plasma Spraying and Subsequent Laser Modification. *Vestnik BrGTU. Ser. Mashinostroyeniye* [Brest State Technical University. Bulletin. Series “Mechanical Engineering”], (4), 37–39 (in Russian).
12. Taran Yu. N., Mazur V. N. (1978) *Structure of Eutectic Alloys*. Moscow, Metallurgiya Publ. 312 (in Russian).

Received: 22.12.2016

Accepted: 23.02.2017

Published online: 30.05.2017