

## KONSTANTINOV V. M., BULOYCHIK I.A. Research of change of durability of the thermoprocessed steel details after diffusive galvanising

In work researches of influence of processes of thermal diffusion galvanizing on change of strength characteristics of products are presented. The conducted pilot researches of the high-strength thermoprocessed bolts allow to choose a rational temperature mode taking into account a class of durability of a product.

УДК 621.793

Пантелеенко А.Ф.

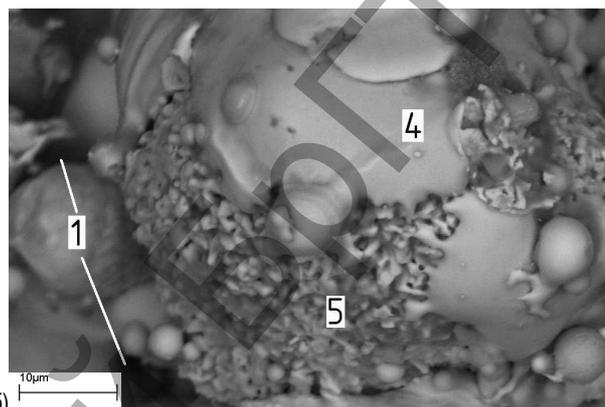
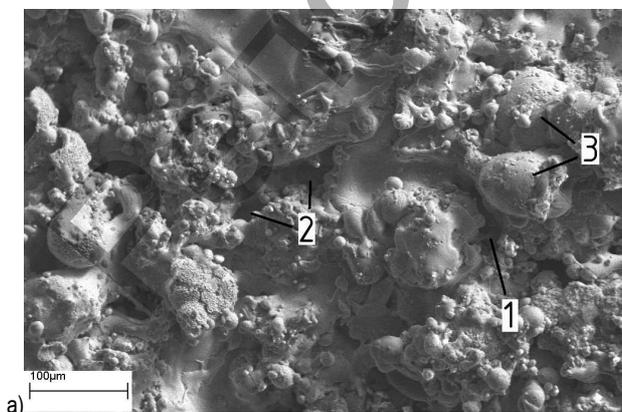
## ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ И МИКРОСТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЙ ИЗ ДИФфуЗИОННО-ЛЕГИРОВАННОГО ПОРОШКА ПР-Х18Н9, ПОЛУЧЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ЛАЗЕРНЫМ МОДИФИЦИРОВАНИЕМ

**Введение.** Системный анализ существующих покрытий (гальванических, наплавленных, напыленных, осажденных) [1, 2] показывает, что например напыленные и гальванические имеют такие недостатки, как недостаточная сцепляемость с основой, пористость. Целью данной работы явилось изучение плазменно-напыленных покрытий из диффузионно-легированного порошка ПР-Х18Н9, выявление недостатков и возможных способов их устранения.

**Методика исследования.** Исходный материал – диффузионно-легированный порошок ПР-Х18Н9 [3]. Плазменное напыление проводилось на установке УПУ-3Д. Режимы напыления: дистанция – 120 мм; ток – 350 А; напряжение – 70 В. Лазерное модифицирование покрытий проводилось на комплексе лазерной наплавки, состоящем из установки лазерной наплавки «Комета – 2» и механизма подачи; режимы обработки: мощность – 1 кВт; подача образца – 200...300 мм/мин; плотность энергии –  $1 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>... $4 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>.

Известно, что эксплуатационные характеристики покрытия напрямую зависят не только от его химического состава, но и от морфологии, поэтому важным является исследование структуры покрытия, начиная с поверхности. Рассмотрение топологии покрытия (рис. 1а) показывает, что имеются цельные частицы, нетрансформировавшиеся в процессе напыления. Основная часть поверхности представляет собой деформированные фрагменты частиц, которые, вероятно, прогревались, а при ударе деформировались. Имеет место отдельная незначительная пористость различной конфигурации (рис. 1а, б), как возле нетрансформировавшихся частиц (1), так и по поверхности покрытия (2). Представленный при большем увеличении фрагмент покрытия (рис. 1б) подтверждает сделанные выводы.

Следует отметить, что в процессе напыления некоторые порошки при их переносе плазменным потоком не расплавляются полностью, а лишь нагреваются, что ведет к формированию покрытия с сильно выраженным «рельефом», на поверхности которого четко различимы оплавленные зоны (4), частицы с практически неразрушенным столбчатым (5) боридным слоем (рис. 1б).



1 – поры возле нетрансформировавшихся частиц; 2 – поры между фрагментами покрытия; 3 – нетрансформировавшаяся частица; 4 – оплавленная зона; 5 – неоплавленные столбчатые бориды  
Рис. 1. Морфология плазменно-напыленного покрытия

В случае соблюдения оптимальных параметров плазменного напыления для наносимого материала покрытие должно иметь слоистую морфологию [4]. В нашем случае, в отличие от классических представлений, особенностью поведения частиц является следующее: 1) композиционное строение частицы, каждая зона которой обладает различной теплопроводностью; 2) пониженная теплопроводность аустенитной матрицы по сравнению с углеродистой сталью.

Вероятно, эти и некоторые другие причины и объясняют неполное расплавление и деформирование наиболее крупных частиц или частиц попавших в периферийную зону плазменного потока с минимальной температурой, при соударении с подложкой и сохранение их в первоначальном виде.

Проведя анализ работ данных авторов [1, 2, 4], можно предположить следующий механизм поведения частицы диффузионно-легированного самофлюсующегося порошка ПР-Х18Н9 в плазменном потоке, отличный от классических представлений: при попадании в плазменный поток происходит нагрев частицы, однако, из-за различной теплопроводности и температуры плавления [5] первой расплавляется боридная оболочка, преимущественно в местах, где наибольшее содержание низкобористой фазы Fe<sub>2</sub>B, этим и можно объяснить локальный характер зон оплавления на поверхности частицы (рис. 1б), затем происходит дальнейшее оплавление боридной оболочки одновременно с нагревом аустенитной сердцевины; при соударении частицы с подложкой происходит её распределение по поверхности. В том случае, если на поверхности диффузионно-легированных частиц порошка ПР-Х18Н9 сформирован сплошной слой бориды FeB, он оплавляется после расплавления зоны низшего бориды Fe<sub>2</sub>B и аустенитной матрицы. Хотя это требует значительных тепловых вложений, такая частица хорошо растекается при соударении с поверхностью в процессе плазменного напыления.

Пантелеенко Алексей Федорович, ассистент кафедры порошковой металлургии, сварки и технологии материалов Белорусского национального технического университета.

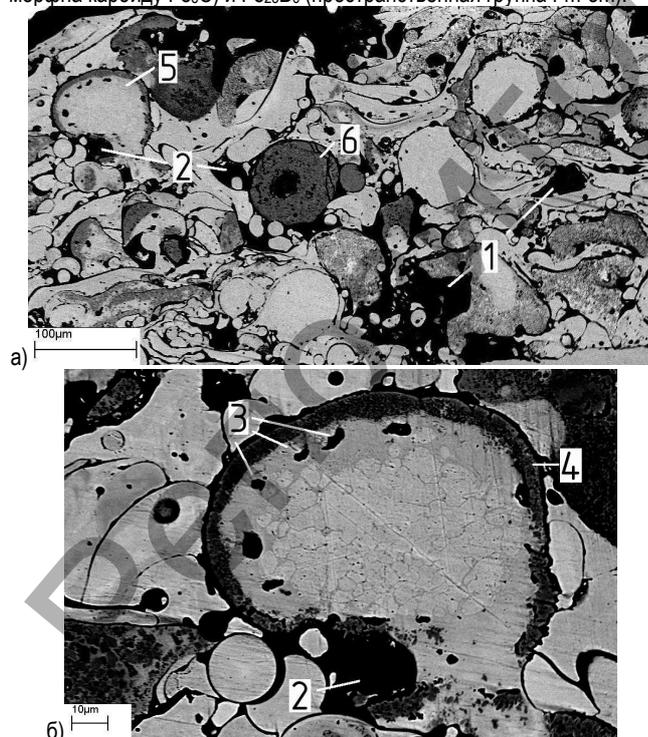
Беларусь, БНТУ, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

При данном характере взаимодействия «частица-подложка» возможна повышенная пористость, плохая сцепляемость с подложкой (рис. 2). Данные недостатки могут быть устранены последующей лазерной обработкой, кроме того, данный вид обработки мог бы способствовать измельчению микроструктуры, более равномерному распределению элементов по объему покрытия, и, следовательно, более высокому комплексу физико-механических свойств.

Одним из важнейших параметров, определяющих характеристики покрытия, является его микроструктура (рис. 2 а, б).

Напыленное покрытие характеризуется высокой пористостью, причем следует отметить несколько типов пористости: традиционные газовые поры (1), возникающие при напылении покрытия [4]; пористость, возникающая вблизи от нерасплавленных частиц (2); ряд пор обладает «наследственным» характером (3) – они образуются в частицах при диффузионном легировании аустенитного порошка ПР-Х18Н9 и, соответственно, выявляются в нетрансформировавшейся частице в напыленном покрытии (3). Также для напыленного покрытия характерны оксидные пленки, образующиеся на поверхности частиц при их нахождении в плазменном потоке.

Как мы и предполагали ранее, в самом покрытии содержится некоторое количество полностью нерасплавившихся (5) частиц (рис. 2 а, б), которые существенно влияют на прочностные характеристики покрытия. Предположение об отсутствии деформации частиц верно, так как у них полностью сохраняется собственная микроструктура, образовавшаяся при диффузионном легировании: четко различимы боридные оболочки  $Fe_2B$  и  $FeB$  (4), хорошо прослеживается сетка карбидов и карбоборидов с аустенитными зёрнами. Различие в интенсивности окраски нерасплавившихся частиц объясняется методикой приготовления образца – у более темных частиц на шлифе (6) не снят внешний боридный слой, не видна аустенитная сердцевина частицы. Данные микроструктурного анализа полностью подтверждаются результатами рентгеновского фазового анализа: дифрактограмма показывает присутствие в покрытии фаз  $Fe_2B$  и  $FeB$ , также выявлено наличие метастабильных боридов  $Fe_3B$  (структура изоморфна карбиду  $Fe_3C$ ) и  $Fe_23B_6$  (пространственная группа  $Fm-3m$ ).



1 – традиционные газовые поры, возникающие при плазменном напылении; 2 – поры возле нетрансформировавшихся частиц; 3 – поры в частице; 4 – диффузионная боридная оболочка частицы; 5 – нерасплавленная диффузионно-легированная частица; 6 - нерасплавленная диффузионно-легированная частица, закрытая боридами

Рис. 2. Микроструктура напыленного покрытия

Согласно дифрактограмме, в покрытии содержится 2 модификации железа –  $\gamma$ -Fe,  $\alpha$ -Fe, здесь, вероятно, обнаружены частицы порошка ПР-Х18Н9, имеющие аустенитную структуру, и  $\alpha$ -Fe которое образуется при модифицировании в плазменном потоке аустенитной сердцевины порошка и его взаимодействии с подложкой.

Большая пористость, оксидные пленки, нерасплавленные полностью частицы оказывают неблагоприятное воздействие на физико-механические характеристики покрытия. На основании вышеперечисленного можно предположить также недостаточную адгезию покрытия с подложкой. Для устранения данных недостатков было использовано лазерное модифицирование покрытий.

Далее исследовали изменения, произошедшие в морфологии плазменно-напыленного покрытия после лазерной обработки.

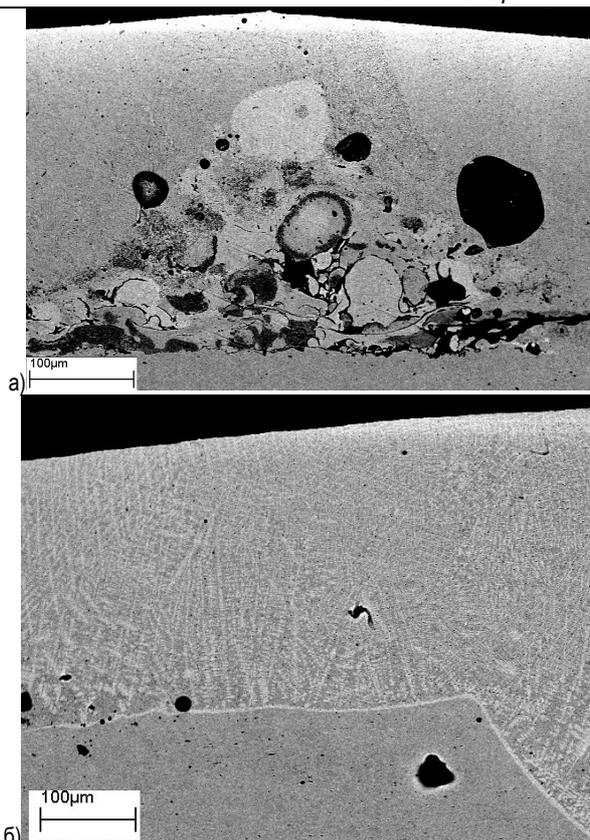
Можно выделить ряд характерных особенностей покрытия: четко прослеживается «структура оплавления», образующаяся при расплавлении лазерным источником напыленного покрытия и его последующей кристаллизации, причем по самой структуре можно определить направление перемещения лазерного луча; также хорошо видны «выходы» дендритов на поверхность образца – различие в их формах и размерах объясняется разным направлением теплоотвода при кристаллизации расплавленной ванны, неравномерным нагревом образцов при последовательном оплавлении и переплавлении покрытия и неоднородной ориентацией дендритов в пространстве.

Сканогаммы, полученные в характеристическом излучении кремния, бора и кислорода, позволяют подтвердить наше предположение, что полученный порошок является самодиффузионным, так как на поверхности четко видно присутствие соединений B, Si, O. Явно выраженные оксидные пленки, наблюдавшиеся ранее в напыленном покрытии, удаляются на поверхность при лазерном модифицировании. Таким образом, можно сделать вывод об образовании на поверхности модифицированного покрытия тонкого слоя боросиликатных стекол, предотвращающих окисляющее негативное воздействие кислорода воздуха на качество покрытия.

Анализ микроструктуры напыленных покрытий, модифицированных лазером, позволяет сделать несколько выводов: имеет место практически полное переплавление покрытия (степень переплавления сильно зависит от параметров лазерного модифицирования) (рис. 3 а, б); образуется покрытие более однородной структуры, которое, как все полученные аналогичными способами, имеет мелкодисперсное строение (рис. 3 б); подтверждается заключение о росте дендритов в направлении теплоотвода (рис. 3 б), что вписывается в классическое представление о формировании микроструктуры покрытий после лазерной обработки [6]. Дендриты первого порядка растут перпендикулярно поверхности теплоотвода, например, в зоне прямого воздействия лазерного луча они растут под углом, так как зона термического влияния имеет сферическую форму.

При недостаточном теплоэнергетическом воздействии в процессе лазерного модифицирования в покрытии могут сохраняться нерасплавленные частицы (рис. 3а), что позволяет регулировать степень изменения структуры покрытия, а, следовательно, и его эксплуатационные характеристики. Обеспечивая полный и частичный переплав, можно получать композиционное покрытие с «полосчатой» структурой [7, 8], обладающее высоким комплексом физико-механических и эксплуатационных свойств, без значительных экономических затрат. Также модифицирование позволяет значительно снизить величину остаточных напряжений в покрытии. Оперирова технологическими условиями обработки, можно влиять на параметры дендритов (размеры, ориентацию в пространстве) [9].

Следует отметить положительное влияние процесса лазерной обработки на пористость покрытия. При различных режимах наблюдается схожая картина – под воздействием зоны термического влияния поры как технологические, присущие самому покрытию, так и «наследуемые» покрытием при нерасплавлении целых частиц мигрируют к подложке, происходит их оттеснение (рис. 3 а, б). Более того, они могут коалесцировать при столкновении. Например, пористость модифицированного лазером покрытия снижается с 10...12 % до 2...5.% (в зависимости от режима модифицирования). При достаточных тепловых воздействиях даже на периферии покрытия поры оттесняются к границе «покрытие – подложка», коалесцируют и не оказывают большого воздействия на физико-механические и эксплуатационные характеристики (рис. 3б).



а – скорость перемещения луча –  $v = 300$  мм/мин; плотность энергии –  $q = 2 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>  
 б – скорость перемещения луча –  $v = 200$  мм/мин; плотность энергии –  $q = 4 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>

**Рис. 3.** Микроструктура плазменно-напыленного покрытия с лазерным модифицированием

Для всех образцов, модифицированных лазерным излучением, можно выделить 3 характерных типа микроструктуры: доэвтектический, эвтектический (квазиэвтектический), заэвтектический. В данном случае речь идет о квазиэвтектической структуре, так как для покрытий чистый эвтектический (квазиэвтектический) тип структуры был получен при параметрах лазерной обработки: скорость перемещения луча  $v = 300$  мм/мин; плотность энергии  $q = 1 \cdot 10^9$  Вт/м<sup>2</sup>; в ряде случаев наблюдалось частичное присутствие квазиэвтектической структуры в модифицированном покрытии.

Микроморфология эвтектики, ее количество относительно избыточной фазы, как это следует относительно представлений о классических методах обработки, зависит от ряда факторов:

- 1) от плотности энергии и скорости охлаждения расплава: чем быстрее охлаждение, тем больше возрастает доля квазиэвтектики и близких состояний [10];
- 2) состава жидкости в точке эвтектики [10];
- 3) от размеров и теплопроводности изделия [1].

Данные микроструктурного анализа полностью подтверждаются результатами микродюрометрических исследований.

**Заключение.** Таким образом, в результате исследования топологии, микроструктуры, фазового состава, микротвердости, пористости плазменно-напыленных и модифицированных лазером покрытий из диффузионно-легированного аустенитного порошка ПР-Х18Н9 установлено, что лазерное модифицирование позволяет уменьшить пористость, обеспечить мелкодисперсность и однородность структуры с повышенными физико-механическими свойствами, а также предположить, что это обеспечит лучшую сцепляемость, триботехнические и эксплуатационные свойства в целом.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Поляк, М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения: в 2 т. – Москва: ЛВМ-СКРИПТ, Машиностроение, 1995. – Т. 1. – 832 с.
2. Поляк, М.С. Технология упрочнения. Технологические методы упрочнения: в 2 т. – Москва: ЛВМ-СКРИПТ, Машиностроение, 1995. – Т. 2. – 688 с.
3. Пантелеенко, А.Ф. Исследование морфологии и микроструктуры диффузионно-легированных порошковых самофлюсующихся материалов / А.Ф. Пантелеенко // Сварка и родственные технологии: сборник докладов международного симпозиума. Минск, 12 апреля 2012. – С. 150–152.
4. Витязь, П.А. Теория и практика нанесения защитных покрытий / П.А. Витязь, В.С. Ивашко, А.Ф. Ильющенко [и др.]. – Мн.: Беларуская навука, 1998. – 583 с.
5. Przybylowicz, Karol. Teoria i praktyka borowania stali / Karol Przybylowicz. – Kielce: Wydawnictwo Politechniki Swietokrzyskiej w Kielcach, 2001. – 246 p.
6. Григорьянц, А.Г. Основы лазерной обработки материалов / А.Г. Григорьянц. – Москва: Машиностроение, 1989. – 304 с.
7. Иващенко, С.А. Теоретические и технологические основы формирования многофункциональных газотермических и вакуумно-плазменных покрытий: автореф. дисс. ... док. техн. наук: 05.02.08; 05.03.01 / С.А. Иващенко. – Минск: БГПА, 2002. – 42 с.
8. Parallel laser melted tracks: Effects on the wear behaviour of plasma-sprayed Ni-based coatings / D. Felgueroso, R. Vijande, J.M. Cuetos, R. Tucho, A. Hernandez // Wear. 2008. – Vol. 264. – P. 257–263.
9. Закономерности электронно-лучевого воздействия на борсодержащие материалы и принципы оптимизации электронно-лучевого оборудования и технологий упрочнения и восстановления / Ф.И. Пантелеенко [и др.]; под общ. ред. Ф.И. Пантелеенко. – Минск: Технопринт; Полоцк: ПГУ, 2005. – 119 с.
10. Таран, Ю.Н. Структура эвтектических сплавов / Ю.Н. Таран, В.Н. Мазур. – М.: Металлургия, 1978. – 312 с.

Материал поступил в редакцию 18.01.13

#### PANTELEENKO A.F. The examination of morphology and microstructure of coatings made of diffusion-alloyed powder ПР-Х18Н9 received with plasma spraying and subsequent laser modification

The morphology and microstructure of plasma-sprayed coatings made of diffusion-alloyed powder ПР-Х18Н9. The changes of characteristics after laser modification are studied.

УДК 621:787

**Довгалев А.М.**

### МАГНИТНО-ДИНАМИЧЕСКОЕ УПРОЧНЕНИЕ ВНУТРЕННЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ И ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРОВ БОЛЬШОЙ ДЛИНЫ

**Введение.** В машиностроении существует широкая номенклатура изделий типа «цилиндр», имеющих большую длину, использу-

емых в пневмо- и гидросистемах различных машин и механизмов.

К внутренней рабочей поверхности пневматических и гидравли-

**Довгалев Александр Михайлович**, декан факультета довузовской подготовки и профориентации Белорусско-Российского университета. Беларусь, БРУ, 212000, г. Могилев, пр. Мира, 43.