

УДК 669.58

**Константинов В.М., Булойчик И.А.****ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПРОЧНОСТИ ТЕРМООБРАБОТАННЫХ СТАЛЬНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПОСЛЕ ДИФфуЗИОННОГО ЦИНКОВАНИЯ**

В большинстве случаев нанесение защитных покрытий на крепежные элементы производится непосредственно после окончательной термообработки деталей. Детали, не подверженные термообработке, а так же изделия с нерегламентируемыми требованиями к классу прочности можно цинковать практически всеми способами цинкования. В данном случае выбор способа цинкования зависит от целесообразности цинкования конкретного вида деталей с учетом их размеров и сложности формы.

Известно, что для качественной антикоррозионной защиты крепежных элементов широко применяется способ термодиффузионного цинкования в порошковых насыщающих средах (ТДЦ), который, в отличие от других способов цинкования, позволяет формировать в поверхностной зоне детали интерметаллидные диффузионные слои, механические и защитные свойства которых существенно превосходят обычные покрытия на основе цинка [1, 2].

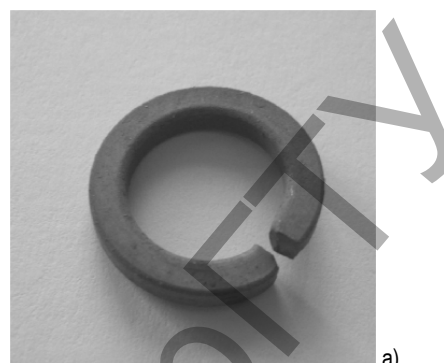
Однако при использовании данного способа для защиты термообработанных элементов металлоконструкций с регламентируемыми требованиями к классу прочности возникают проблемы, связанные с потерей изделиями прочностных характеристик в связи с воздействием температуры на структуру металла во время процесса цинкования.

Таким образом, существует необходимость в исследовании влияния процессов термодиффузионного цинкования на снижение прочностных характеристик изделий, подверженных термической обработке, а также определении допустимых значений класса прочности подходящих для цинкования данным способом.

Следует отметить, что температурный интервал процессов термодиффузионного цинкования составляет от 350 до 700°C в зависимости от времени выдержки и ряда особых технологических параметров процесса. Такой широкий интервал рабочих температур позволяет подобрать необходимый режим цинкования с учетом предварительной термической обработки изделий. В случае если требуется произвести антикоррозионную защиту деталей прошедших окончательную термообработку, например, закалка и отпуск, процесс термодиффузионного цинкования целесообразно проводить при температурах ниже температуры отпуска с выдержкой, обеспечивающей формирование диффузионного слоя необходимой толщины, но недостаточной для существенного разупрочнения обрабатываемого изделия.

Если в процессе термической обработки изделия предполагается использовать операции отпуска, то наиболее рациональным решением проблемы будет совмещение либо замена отпуска процессом термодиффузионного цинкования. Данный вариант обработки особенно актуален для ряда упругих элементов, термообработка которых заключается в реализации процессов закалки и среднего отпуска. С учетом того, что для большинства марок сталей, из которых изготавливают упругие элементы, температурный интервал среднего отпуска совпадает с температурами термодиффузионного цинкования, замена стандартной операции для снятия внутренних напряжений цинкованием является актуальной альтернативой.

На рисунке 1а представлен образец упругого элемента на примере граверной шайбы. Данная деталь обработана по интегрированной технологии, включающей закалку и отпуск цинкованием. Толщина цинкового диффузионного слоя после обработки составила порядка 20 мкм (рис. 1б).



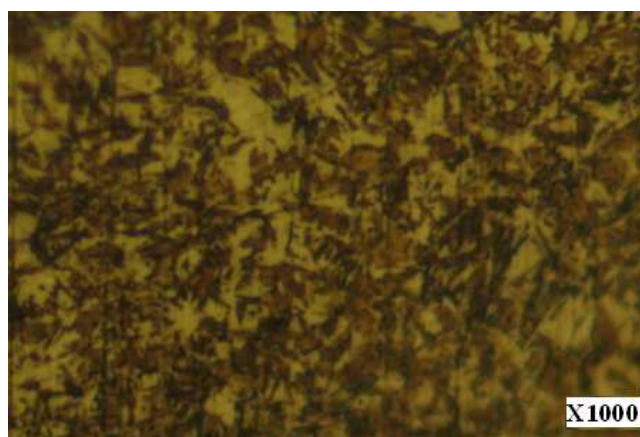
а)



б)

**Рис. 1.** а) Образец гравера, после термодиффузионного цинкования; б) Микроструктура диффузионного цинкового слоя, X200

На рисунке 2 представлена микроструктура стали 65Г после закалки, которая соответствует мартенситу и некоторому количеству аустенита остаточного.



**Рис. 2.** Микроструктура стали 65Г после закалки

Окончательная структура изделия формируется в процессе термодиффузионного цинкования в порошковой насыщающей среде. Под воздействием температур термодиффузионного цинкования происходит распад пересыщенного твердого раствора (мартенсита) с формированием трооститной структуры, представленной на рисунке 3.

**Константинов Валерий Михайлович**, заведующий кафедрой «Материаловедение в машиностроении» Белорусского национального технического университета.

**Булойчик Илья Александрович**, аспирант Белорусского национального технического университета.

Беларусь, БНТУ, г. Минск, Беларусь, e-mail: v\_m\_konst@mail.ru, ilya.by@gmail.com.

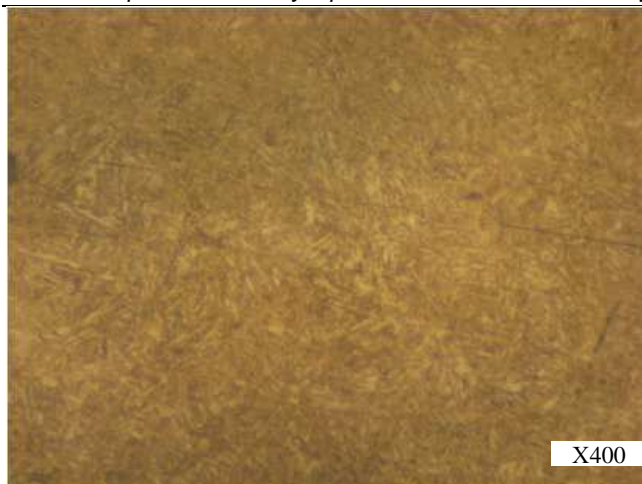


Рис. 3. Микроструктура сердцевины шайбы после ТДЦ

После цинкования, твердость граверов составляла 43–47 HRC, что обеспечивает соответствие регламентируемых параметров эксплуатационных свойств для данного типа деталей [3].

Следует также учесть, что в случае необходимости цинкования упругих элементов, предварительно упрочненных холодной пластической деформацией с последующим низкотемпературным старением, целесообразно применять низкотемпературные способы цинкования, так как рабочая температура большинства деталей после такой обработки не превышает 150–200°C [4].

При использовании способа ТДЦ для защиты термообработанного крепежа с высоким классом прочности возникают проблемы, связанные с потерей изделиями прочностных характеристик при воздействии температуры на структуру металла во время процесса цинкования. С целью определения возможного снижения прочностных свойств были проведены испытания на растяжение болтов в состоянии поставки, после отжига по режимам, совпадающим с режимами цинкования и непосредственно после цинкования.

В качестве образцов для анализа были предоставлены высокопрочные термообработанные болты различных классов прочности 4,6; 8,8; 9,8; 10,6 [5]. Количество испытаний составляло не менее 3-х для образцов с различными классами прочности. Для каждого класса прочности определяли предел прочности при растяжении в состоянии поставки, после отжига и термодиффузионного цинкования. Средние значения результатов испытаний для классов прочности 4,6; 8,8; 9,8 представлены в таблице 1.

В ходе испытаний для образцов с различными классами прочности, подверженных термодиффузионному цинкованию (450°C, 1 ч) и отпуску (450°C, 1 ч), наблюдали снижение значений предела прочности  $\sigma_B$  и условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$ , что связано с активацией диффузионных процессов при дополнительном термическом воздействии и, как следствие, изменении структуры стали. Установлено,

что для образцов с классами прочности вплоть до 8,8 снижение указанных характеристик не выходит за пределы допустимых значений, оговоренных соответствующей нормативно-технической документацией. Однако при обработке деталей с различными габаритами и массой возможно изменение допустимого значения класса прочности изделия, подходящего для обработки способом термодиффузионного цинкования, что связано с изменением температурно-временных параметров процесса. Так, например, для высокопрочного крепежа с классами прочности 9,8-10,6, имеющего структуру сорбита, отпуск, нагрев и выдержка свыше 650°C приводит к распаду «игольчатой» структуры цементитных пластин и формированию мелких равновесных зерен. Дальнейшее повышение температуры приводит к процессам возврата и рекристаллизации, что является причиной снижения прочности металла [6].

Не смотря на то, что в отличие от классических способов нанесения защитных покрытий на основе цинка, для термодиффузионного цинкования возможно разупрочнение изделий, прошедших предварительную термическую обработку, рациональный подход к выбору температурных режимов, а также учет класса прочности обрабатываемого изделия позволит выгодно применять данный способ в качестве антикоррозионной защиты. Для ряда деталей, таких например, как граверные шайбы, эффективным решением является совмещение среднего отпуска с процессом нанесения защитного покрытия, что позволяет повысить срок службы изделий с существенным снижением затрат на антикоррозионную обработку. При необходимости цинкования элементов, прошедших окончательную термическую обработку (крепеж высокого класса прочности), следует учитывать, что с увеличением класса прочности при нанесении цинкового диффузионного покрытия разупрочнение возрастает. Поэтому данным способом можно обрабатывать изделия с классами прочности до 8,8.

#### СИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Проскуркин, Е.В. Диффузионные цинковые покрытия / Е.В. Проскуркин, Н.С. Горбунов. – Москва: Металлургия, 1972. – 248 с.
2. Константинов, В.М. Анализ перспективных технологий цинкования в условиях современного производства: сборник материалов Международной научно-практической конференции «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении» / В.М. Константинов, И.А. Булойчик, Д.В. Гегеня, 2012.
3. Шайбы пружинные. Технические условия: ГОСТ 6402-70.
4. Гольдштейн, М.И. Специальные стали: учебник для вузов / М.И. Гольдштейн, С.В. Грачев, Ю.Г. Векслер – М.: Металлургия, 1985. – 408 с.
5. Болты высокопрочные цилиндрические и конические для мостостроения, гайки и шайбы к ним. Технические условия: ГОСТ 53644-2009.
6. Гуляев, А.П. Металловедение: учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.

Таблица 1. Результаты испытания на растяжение

№п/п	Наименование и обозначение изделия	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
Испытуемый образец – болт М5, класс прочности: 4,6				
1	В сост. поставки	418	245	20
2	Отпущенный 450°C, 1ч	397,5	200	20
3	Цинкованный 450°C, 1ч	402,2	210	20
Испытуемый образец – болт М5, класс прочности: 8,8				
4	В сост. поставки	830,1	643,3	11
5	Отпущенный 450°C, 1ч	770,3	503,3	11
6	Цинкованный 450°C, 1ч	780,5	546,7	11
Испытуемый образец – болт М8, класс прочности: 9,8				
7	В сост. поставки	960,4	730	10
8	Отпущенный 450°C, 1ч	892,4	610	10
9	Цинкованный 450°C, 1ч	908,3	640	10

Материал поступил в редакцию 09.11.12

## 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.

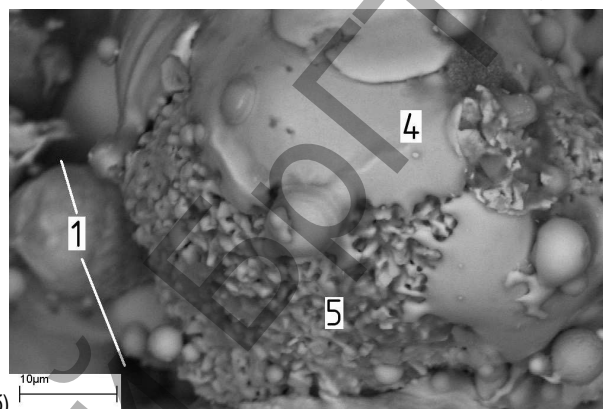
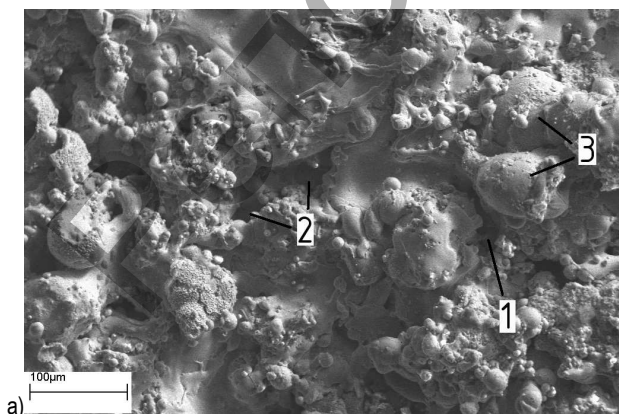
## ИССЛЕДОВАНИЕ МОРФОЛОГИИ И МИКРОСТРУКТУРЫ ПОКРЫТИЙ ИЗ ДИФфуЗИОННО-ЛЕГИРОВАННОГО ПОРОШКА ПР-Х18Н9, ПОЛУЧЕННЫХ ПЛАЗМЕННЫМ НАПЫЛЕНИЕМ С ПОСЛЕДУЮЩИМ ЛАЗЕРНЫМ МОДИФИЦИРОВАНИЕМ

**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).



б) 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.