

УДК 621.702

**В.М. Константинов, П.С. Гурченко, И.А. Булойчик**

Белорусский национальный технический университет. г. Минск

### **ПРИМЕНЕНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИФФУЗИОННОГО ЦИНКОВАНИЯ ДЛЯ ТЕРМИЧЕСКИ УПРОЧНЕННЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ МЕТАЛЛА**

Способ термодиффузионного цинкования в порошковых насыщающих средах (ТДЦ) является актуальной альтернативой традиционным процессам антикоррозионной защиты на основе цинка за счет ряда специфических свойств формируемого на изделии защитного диффузионного слоя, а также возможности совмещения с общим циклом термической обработки изделий из металла [1, 2]. В отличие от других способов цинкования, ТДЦ позволяет формировать в поверхностной зоне детали интерметаллидный диффузионный слой, механические и защитные свойства которого существенно превосходят обычные покрытия на основе цинка.

В большинстве случаев, нанесение защитных покрытий на металлические изделия производится непосредственно после окончательной термообработки. Реализация процессов ТДЦ на одной из стадий основной термической обработки позволяет существенно снизить энергетические и временные затраты на антикоррозионную обработку изделий. С учетом широкого температурного интервала реализации процессов термодиффузионного цинкования, который составляет от 350 до 700°C, существует возможность подбора необходимого режима ТДЦ в качестве заключительной операции термической и антикоррозионной обработки. 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 рис. 1 представлены сравнительные схемы режимов термической и антикоррозионной обработки деталей с использованием стандартной технологии антикоррозионной защиты и интегрированного процесса диффузионного цинкования.

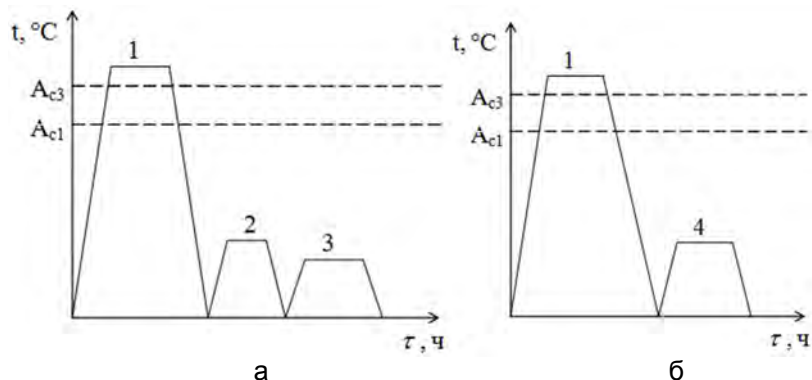


Рис. 1. Сравнение обработки изделий по стандартной технологии (а) и технологии с интеграцией процесса ТДЦ (б):  
1 – нагрев под закалку, выдержка; 2 – отпуск, выдержка;  
3 – нанесение защитного покрытия; 4 – формирование антикоррозионного слоя способом ТДЦ

Из рис. 1 видно, что внедрение процесса диффузионного цинкования в общий цикл термической обработки изделий позволяет снизить затраты на нагрев металла и сократить общее время техпроцесса. На рис. 2 представлен образец гравера с толщиной диффузионного слоя порядка 20 мкм, обработанный по интегрированной технологии цинкования.

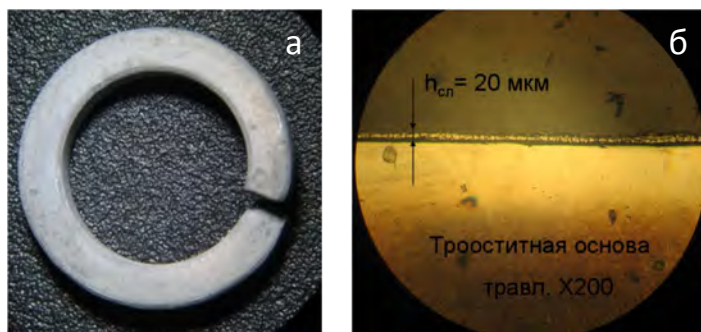


Рис. 2. образец гравера, после термодиффузионного цинкования,  $\times 10$  (а) и плоскость шлифа граверной шайбы (цинковый диффузионный слой) (б)

Окончательная структура изделия формируется в процессе термодиффузионного цинкования в порошковой насыщающей среде (рис. 3). Под воздействием температуры цинкования происходит распад пересыщенного твердого раствора (мартенсита) с формированием трооститной структуры. После цинкования твердость граверов составляет 43–47 HRC, что обеспечивает соответствие регламентируемых параметров эксплуатационных свойств для данного типа изделий [4].

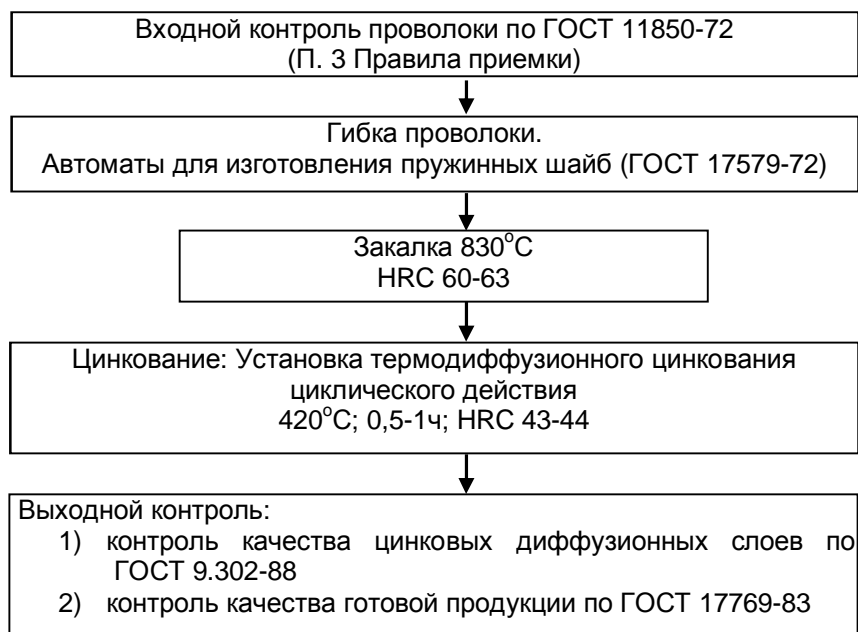


Рис. 3. Блок-схема процесса термической обработки, совмещенного с диффузионным цинкованием граверных шайб

С целью исследования влияния температур реализации процесса ТДЦ на эксплуатационные характеристики изделий после предварительного термического упрочнения проанализировали изменение твердости граверных шайб после закалки и последующего отпуска способом термодиффузионного цинкования. На рис. 4 представлена зависимость изменения твердости граверных шайб после закалки от воздействия температур ТДЦ в интервале 360–420°C. Длительность обработки составляла 1 ч.

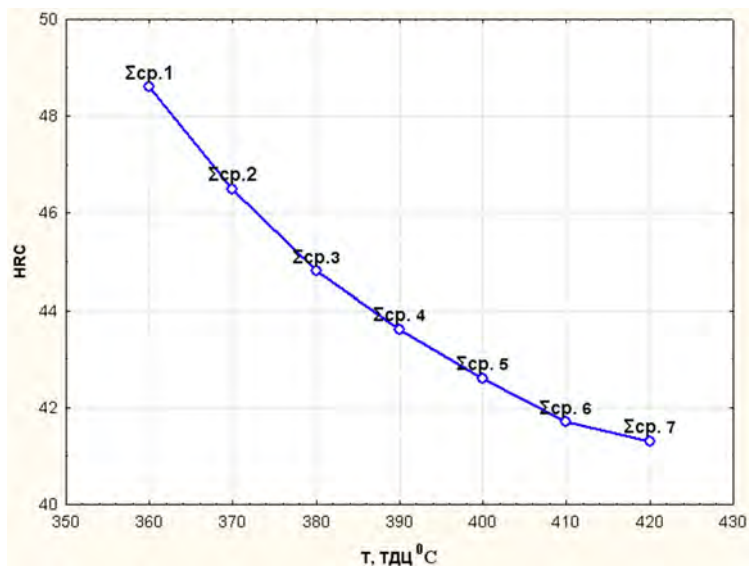


Рис. 4. Изменение твердости обработанных по интегрированной технологии граверов в зависимости от температуры реализации ТДЦ

Несмотря на приближение твердости обработанных элементов к нижнему пороговому значению, регламентированному ГОСТ 6402-70 (40 HRC) [4], обработка данного типа изделий способом ТДЦ возможна до температуры реализации процесса порядка 430<sup>0</sup>С. Минимальная температура обработки изделий указанным способом составляет 350–360<sup>0</sup>С и ограничена снижением насыщающей способности смеси при понижении температуры реализации процессов ТДЦ ниже указанного диапазона.

Следует учитывать, что при использовании способа ТДЦ в качестве заключительной операции термической обработки после закалки изделия поступают на обработку в структурном состоянии – мартенсит закалки (пересыщенный твердый раствор углерода в  $\alpha$ -железе). В зависимости от марки стали и степени ее легирования, а также принимая во внимание различную устойчивость мартенсита к термическому воздействию, формирование диффузионного цинкового слоя может происходить в условиях полного и неполного распада мартенсита. В случае использования легированных сталей с мартенситной структурой после закалки, устойчивой к

термическому воздействию при температурах протекания процессов ТДЦ, формирование диффузионного слоя будет происходить в условиях неполного распада пересыщенного твердого раствора (мартенсита). При использовании сталей с малой устойчивостью мартенсита после закалки реализация заключительных стадий формирования диффузионного слоя будет происходить в условиях полного распада пересыщенного твердого раствора (мартенсита) при наличии тросто-сорбитных структур. На рис. 5 представлена зависимость изменения толщины цинкового диффузионного слоя от времени и температуры термодиффузионного цинкования.

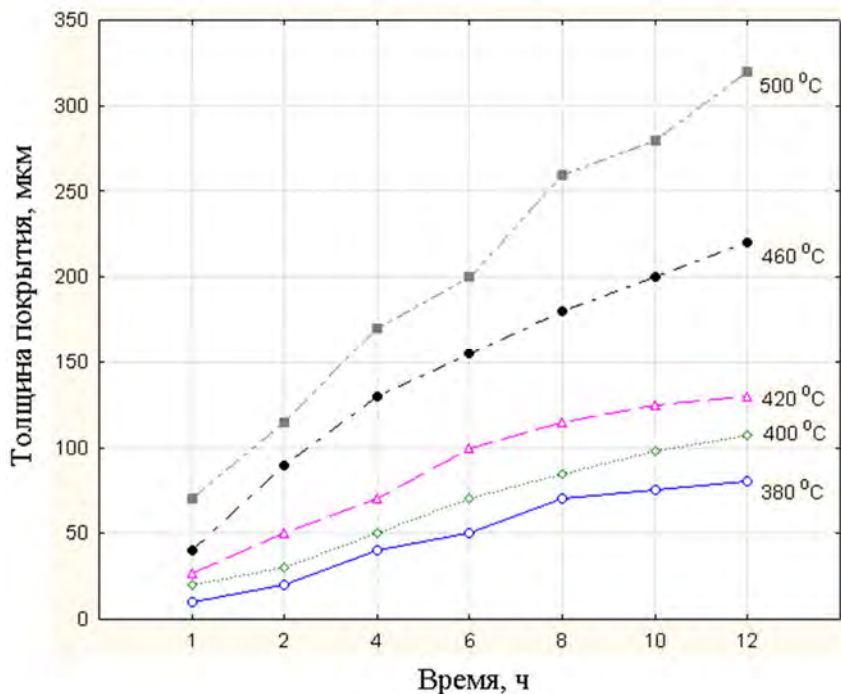


Рис. 5. Зависимость толщины диффузионного слоя от продолжительности и температуры цинкования [4]

Приведенная зависимость справедлива только для углеродистых нелегированных сталей. При цинковании изделий после закалки с высокой устойчивостью мартенсита возможно изменение скорости формирования цинкового диффузионного, что станет

следствием изменения температурно-временных параметров реализации процесса ТДЦ.

До температур 150–200°C карбидообразующие легирующие элементы незначительно влияют на кинетику распада мартенсита закаленной стали. Структура стали, сформированная при отпуске до указанных температур, состоит из мартенсита отпуска, аустенита остаточного и  $\epsilon$  карбида. Если в углеродистой стали практически весь углерод выделяется из мартенсита при температуре 250–300°C, то в сталях с карбидообразующими элементами данный процесс сдвигается в сторону более высоких температур (до 400–500°C) [5]. На рис. 6 представлена сравнительная зависимость изменения содержания углерода в мартенситах от температуры отпуска для углеродистых (1) и легированных карбидообразующими элементами сталей (2).

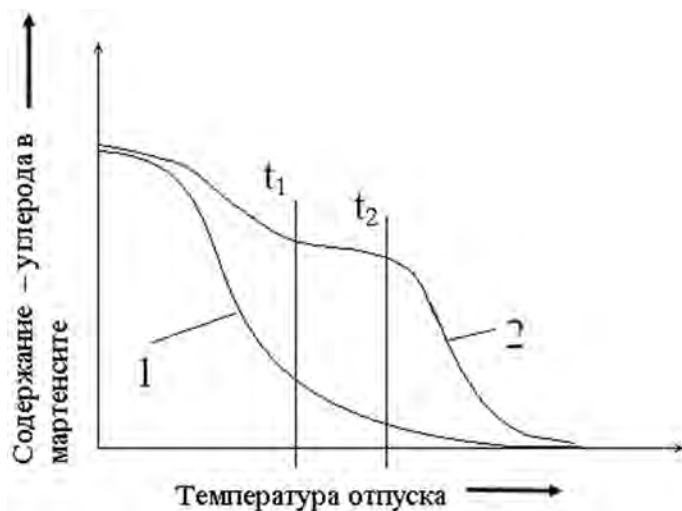


Рис. 6. Изменение концентрации углерода в мартенситах при изменении температуры отпуска [5]

При температуре  $t_1$  содержание углерода в мартенситах углеродистых сталей (1) существенно ниже в сравнении с легированными карбидообразующими элементами сталями (2). При температуре  $t_2$  из мартенсита легированной стали начинается выделение углерода, в то время как для углеродистой стали при данной температуре практически весь углерод уже выделился.

Следовательно, при необходимости совмещения процессов ТДЦ с низким отпуском, в отличие от углеродистых сталей, для сталей, легированных карбидообразующими элементами, появляется возможность использования стандартных режимов ТДЦ без снижения активности насыщающей смеси и, как следствие, формирование требуемой толщины диффузионного слоя. При реализации процессов среднего и высокого отпуска для легированных карбидообразующими элементами сталей требуется изменение стандартных режимов ТДЦ с учетом повышения температуры и времени обработки закаленных изделий. При реализации отпуска способом ТДЦ для данного типа сталей целесообразно использовать гидротермально обработанные порошковые смеси с возможностью обработки изделия при температурах порядка 500–600 °С.

При использовании термодиффузионного цинкования для защиты стальных элементов с регламентируемыми требованиями к классу прочности важным является вопрос обеспечения изделиями требуемых прочностных характеристик в связи с воздействием температуры на структуру стали во время процесса цинкования. В этой связи были проведены исследования изменения прочности крепежа после окончательной термической обработки с последующим ТДЦ. Крепеж с классами прочности 5.8, 10.9, прошедший окончательную термическую обработку, оцинкованный способом ТДЦ, электролитическим цинкованием и без нанесения защитного покрытия подвергли испытаниям на разрыв (табл. 1).

Таблица 1  
Испытание высокопрочных болтов на растяжение

№ п/п	Вид обработки болта	Класс прочности	Временное сопротивление $\sigma_b$ (Н/мм <sup>2</sup> )
1	Закалка 850°C + отпуск 560°C + ТДЦ (420°C) (1)	10.9	1110
2	Закалка 850°C + отпуск 560°C + ТДЦ (420°C) (2)	10.9	1090
3	Закалка 850°C + отпуск 560°C + гальваника (1)	10.9	1120
4	Закалка 850°C + отпуск 560°C + гальваника (2)	10.9	1090
5	Закалка 850°C + отпуск 560°C	10.9	1090

Окончание табл. 1

№ п/п	Вид обработки болта	Класс прочности	Временное сопротивление $\sigma_b$ (Н/мм <sup>2</sup> )
6	Закалка 850°C + отпуск 560°C + ТДЦ (420°C)	10.9	1120
7	Холодная штамповка + ТДЦ (420°C) (1)	5.8	415
8	Холодная штамповка + ТДЦ (420°C) (2)	5.8	425
9	Холодная штамповка (1)	5.8	420
10	Холодная штамповка (2)	5.8	430

Результаты испытания на растяжение не выявили изменения эксплуатационных характеристик диффузионно оцинкованного крепежа классов прочности 5.8 и 10.9. Однако следует отметить, что с повышением температуры диффузионного цинкования выше 420°C вероятность разупрочнения термически обработанного крепежа возрастает. В табл. 2 приведены сравнительные данные прочностных характеристик высокопрочного крепежа после диффузионного цинкования и модельного отжига при 450°C.

Таблица 2

Результаты испытания на растяжение

Наименование и обозначение изделия	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
Болт М5, класс прочности 4.6			
В сост. поставки	418	245	20
После модельного отжига 450°C, 1 ч	397,5	200	20
Цинкованный 450°C, 1 ч	402,2	210	20
Болт М5, класс прочности 8.8			
В сост. поставки	830,1	643,3	11
После модельного отжига 450°C, 1 ч	770,3	503,3	11
Цинкованный 450°C, 1 ч	780,5	546,7	11



Окончание табл. 2

Наименование и обозначение изделия	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
Болт М8, класс прочности 9.8			
В сост. поставки	960,4	730	10
После модельного отжига 450 <sup>0</sup> С, 1 ч	892,4	610	10
Цинкованный 450 <sup>0</sup> С, 1 ч	908,3	640	10

В ходе испытаний для образцов с различными классами прочности, подверженных термодиффузионному цинкованию (450<sup>0</sup>С, 1 ч) и отпуску (450<sup>0</sup>С, 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. Следует также отметить, что 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.

Таким образом, совмещение процессов ТДЦ с общим циклом термической обработки ряда изделий из металла позволяет снизить затраты на антикоррозионную обработку, а также обеспечит повышение эксплуатационных характеристик обрабатываемых изделий за счет формирования цинкового интерметаллидного диффузионного слоя в поверхностной зоне детали. С учетом объема производства, номенклатуры обрабатываемых изделий и особенностей применяемого оборудования для диффузионного цинкования выигрыш в экономии энергии может достигать 50% за счет исключения термических печей для реализации операций «отпуск».

При реализации процессов ТДЦ в качестве заключительных операций антикоррозионной обработки изделий, прошедших окончательную термическую обработку, следует учитывать возможное изменение прочностных характеристик изделий. Наиболее целесообразна указанная обработка для стального крепежа и упругих

элементов. Совмещение ТДЦ и отпуска для указанных деталей обеспечивает сохранение требуемых механических свойств и высокую атмосферную коррозионную стойкость.

#### Список литературы

1. Чертов В.М. Новые способы цинкования // Технология машиностроения. – 2007. – №11. – С. 10–12.
2. Константинов В.М., Булойчик И.А. Энергосберегающая интеграция технологии термодиффузионного цинкования в общий цикл термической обработки конструкционных сталей // Сборник МНТК ФТИ. – 2013. – Т. 2. – С. 249–255.
3. ГОСТ 6402-70. Шайбы пружинные. Технические условия.
4. Проскуркин Е.В., Горбунов Н.С. Диффузионные цинковые покрытия. – М.: Металлургия, 1972. – 248 с.
5. Гуляев А.П. Металловедение: учебник для вузов. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.

УДК 621.74

**С.П. Нефедьев, Г.В. Агутин, М.Н. Козлова**

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

### **ВИНТОВАЯ ПЛАЗМЕННО-ПОРОШКОВАЯ НАПЛАВКА ДЕТАЛЕЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА**

Штоки малого диаметра 50 мм и менее невозможно восстановить традиционными методами дуговой наплавки в связи с их короблением и деформацией, а также сложностью формирования правильных валиков на столь малых диаметрах. Поэтому плазменно-порошковая наплавка является единственно возможным способом их восстановления.

В данной работе исследовалась возможность восстановления изношенных штоков гидроцилиндров упрочняющей плазменно-порошковой наплавкой покрытия системы Fe-C-Cr-V.

Химический состав присадочного порошка приведён в таблице. При плазменной наплавке происходит угар легирующих эле-