УДК 669.58

ВЛИЯНИЕ ТЕРМОДИФФУЗИОННОГО ЦИНКОВАНИЯ НА ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА ТЕРМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННЫХ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

В.М. КОНСТАНТИНОВ, доктор техн. наук, профессор
И.А. БУЛОЙЧИК, научный сотрудник

В.М. Константинов – 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65
Белорусский национальный технический университет
e-mail: v_m_konst@mail.ru

В статье представлены данные о влиянии способа термодиффузионного цинкования в порошковых насыщающих средах на эксплуатационные свойства термически упрочненных стальных изделий. Определены границы температурных интервалов влияния термодиффузионного цинкования на изменение предела прочности при растяжении термообработанных деталей. Показано, что в условиях циклического усталостного нагружения обработка способом термодиффузионного цинкования может приводить к разупрочнению стальных изделий, что связано с формированием высокотвердых интерметаллидных фаз в поверхностной зоне диффузионного слоя.

Ключевые слова: цинкование в порошковых насыщающих смесях, цинковые покрытия, предел прочности, усталость металла

Введение

При использовании способа термодиффузионного цинкования в порошковых насыщающих средах (ТДЦ), принимая во внимание температурный интервал данного процесса, который находится в диапазоне от 300 до 700 ^{o}C могут возникнуть проблемы, связанные с потерей изделиями эксплуатационных свойств в связи с разупрочняющим воздействием температур ТДЦ на структуру стали. Согласно данным источника [1], диффузионное цинкование не оказывает влияние на относительное удлинение, а так же пределы прочности и текучести стали.

Так, согласно данным источника [2], где представлены исследования влияния цинкования в расплаве и электролитического цинкования на усталостную прочность сталей после различного типа термической обработки, отмечено снижение прочностных показателей для образцов, оцинкованных в расплаве, что связано с зарождением и распространением усталостных трещин в зоне формирования твердых интерметаллидных фаз диффузионного слоя.

В свою очередь данных о исследовании влияния процессов диффузионного цинкования в порошковых насыщающих средах на изменение прочностных характеристик термически обработанных стальных изделий не достаточно.

Таким образом, существует необходимость в исследовании влияния процессов термодиффузионного цинкования на изменение прочностных свойств стальных изделий подверженных термической обработке, а так же определении допустимых значений класса прочности и условий эксплуатации стальных изделий, целесообразных для цинкования данным способом.

Методика экспериментального исследования

Для проведения экспериментов использовали 2 типа образцов: 1) Крепеж прошедший окончательную термическую обработку, оцинкованный способом ТДЦ, и электролитическим цинкованием, подвергли испытаниям на разрыв согласно ГОСТ 1759.4-87 [3]. В ходе проведения испытаний разрушение всех образцов крепежных элементов происходило по резьбе (рисунок 1).

Рис. 1. Образцы крепежных элементов с диффузионным цинковым слоем после испытания

2) С целью определения влияния формирования цинкового диффузионного слоя на усталостные характеристики стальных изделий, провели сравнительное исследование механических свойств при циклических нагрузках термически обработанных образцов из стали 45 с дополнительной обработкой способом ТДЦ и без антикоррозионной обработки. Режимы термической обработки исследуемых образцов для усталостных испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1

Термическая обработка образцов перед проведением испытаний

Тип образцов	Режимы термической обработки	
	Закалка	Отпуск
Диффузионный слой отсутствует	Нагрев под закалку до 850 ^{0}С – в защитной атмосфере. Выдержка 30 мин. Охлаждение вертикально – в воду.	Отпуск 450 ^{0}С, 180 мин (3 часа)
Обработанные способом ТДЦ		ТДЦ в стационарном тигле при 450 ^{0}С, 120 мин.

Испытания проводили ускоренным методом ступенчатого нагружения согласно СТБ 1233-2000 [4] по схеме, представленной на рисунках 2, 3.

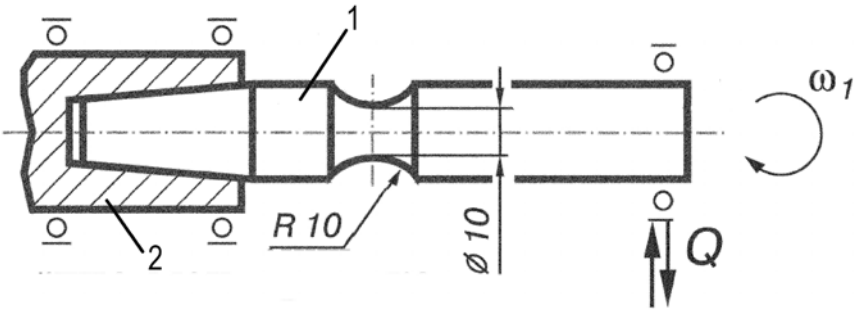


Рис. 2. Общая схема испытаний на консольный изгиб с вращением
1 – образец, 2 – шпиндель испытательной машины
Q – нагрузка на образец; ω – частота вращения образца.

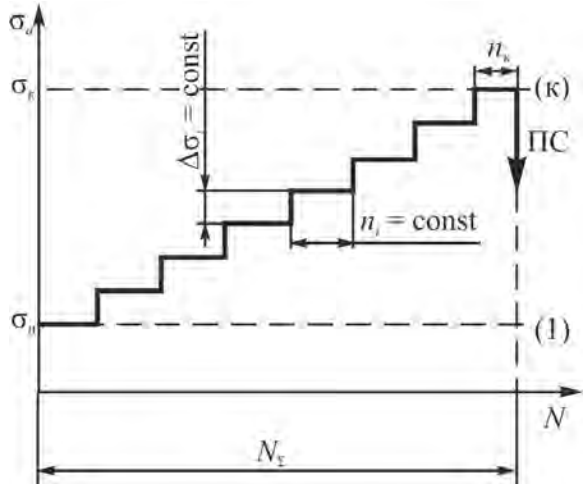


Рис. 3. Графическое представление режима испытаний

Частота вращения образца составляла 3000 мин$^{-1}$. Заданное значение начального уровня амплитуды напряжений при изгибе ($\sigma_н$) составляло 200 МПа. Интервал приращения амплитуды напряжений при изгибе ($\Delta\sigma_i$) приняли равным 50 МПа. Длительность ступени нагружения (n_i) составляла 10^5 циклов. Число циклов $n_к$ на последней ступени нагружения определяли достижением предельного состояния (изломом образца). Переход на каждую ступень нагружения осуществляли без промежуточных пауз. По результатам испытаний определяли предельное напряжение при изгибе $\sigma_к$ и долговечность образца N_Σ

Результаты и обсуждение

Результаты испытания на разрыв для термически обработанного крепежа, представленные в таблицах 2 не выявили изменения эксплуатационных характеристик диффузионно оцинкованного крепежа в сравнении с крепежом, оцинкованным электролитическим способом цинкованя.

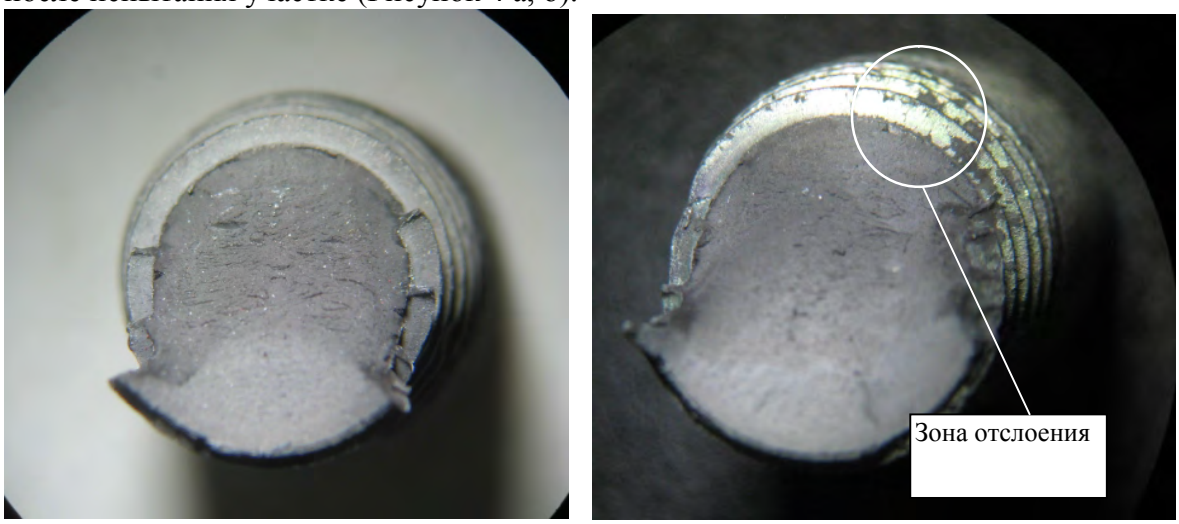
Таблица 2

Результаты испытания болтов на растяжение

Номинальный диаметр резьбы, мм	Вид обработки болта	Реальное значение временного сопротивления $\sigma_в$ (Н/мм^2)
1	2	3
8	Закалка + отпуск + ТДЦ (1)	552
8	Закалка + отпуск + ТДЦ (2)	601
8	Закалка + отпуск + ТДЦ (3)	612
8	Закалка + отпуск + гальваника (1)	519
8	Закалка + отпуск + гальваника (2)	525
8	Закалка + отпуск + гальваника (3)	607
6	Закалка + отпуск + ТДЦ (1)	627
6	Закалка + отпуск + ТДЦ (2)	647
6	Закалка + отпуск + ТДЦ (3)	587
6	Закалка + отпуск + гальваника (1)	677
6	Закалка + отпуск + гальваника (2)	706
6	Закалка + отпуск + гальваника (3)	617

Фактическое значение временного сопротивления для данной группы образцов, оцинкованных способом ТДЦ сопоставимо с данными временного сопротивления для образцов с электролитическим цинковым покрытием. Данный факт свидетельствует об исключении влияния температур реализации процессов ТДЦ порядка 420°С на прочностные характеристики изделий. Следует отметить, что с повышением температуры диффузионного цинкования свыше 420°С вероятность разупрочнения термически обработанного крепежа возрастает [5].

По результатам фрактографического анализа для всех типов образцов характерен вязкий излом. Отличительной особенностью разрушения образцов, оцинкованных электролитическим способом, является отслоение гальванического покрытия на удлиненном после испытания участке (Рисунок 4 а, б).



а б

Рис. 4. Фрактография изломов крепежных элементов с диффузионным (а) и электролитическим (б) типом цинкового покрытия после испытания на растяжение, Х10

На образцах, обработанных способом ТДЦ, следов отслоения слоя цинка не обнаружено, что связано с повышенной адгезионной прочностью такого типа защитного покрытия за счет диффузионного взаимодействия атомов цинка и стальной основы.

Результаты испытаний на механическую усталость для каждого исследуемого образца приведены в таблице 3.

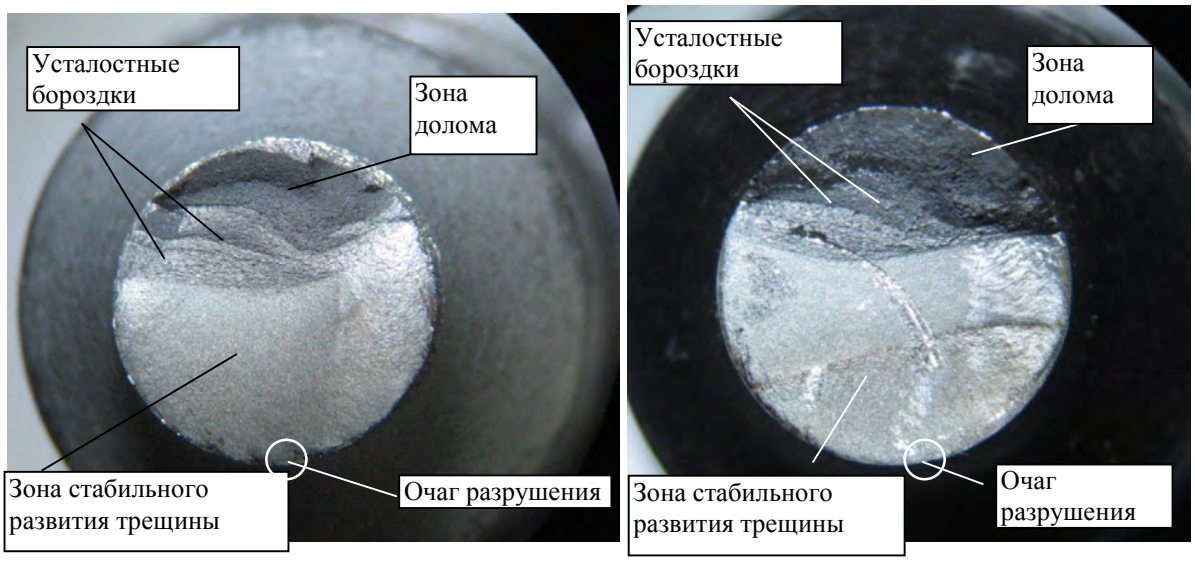
Таблица 3

Результаты испытаний образцов на механическую усталость

№ образца	Предельное напряжение при изгибе $\sigma_к$, МПа	Долговечность образца N_Σ, цикл
Образцы с диффузионным слоем		
1	350	332350
2	300	253523
3	350	353364
Образцы без защитного покрытия		
4	400	484016
5	400	436715
6	400	458241

Образцы с цинковым диффузионным слоем продемонстрировали меньшую долговечность и меньшее предельное напряжение при изгибе в сравнении со стальными образцами без защитного цинкового покрытия. Данный факт может быть обусловлен формированием хрупких интерметаллидных фаз (Г - фаза) в переходной зоне от стальной основы к диффузионному слою в исследуемых образцах. Они являются концентраторами напряжений, которые, при увеличении знакопеременной внешней нагрузки, могут являться причиной зарождения усталостной трещины [6].

Фрактографический анализ изломов образцов после испытаний с цинковым диффузионным слоем (а) и без защитного покрытия (б) свидетельствуют о формировании усталостной трещины в поверхностной зоне детали (рисунок 5).



а б

Рис. 5. Характер изломов образцов после проведения усталостных испытаний Х 20
(а) – образец с цинковым диффузионным слоем
(б) – образец без защитного покрытия

Выводы

Применяя технологии ТДЦ для антикоррозионной защиты деталей с регламентируемыми прочностными параметрами, следует учитывать влияние температур реализации процесса ТДЦ на структуру и эксплуатационные свойства изделий. Фактическое значение временного сопротивления образцов, оцинкованных способом ТДЦ, сопоставимо с данными временного сопротивления для образцов с электролитическим цинковым покрытием. Данный факт свидетельствует об исключении влияния температур реализации процессов ТДЦ до (420 °С) на прочностные характеристики изделий. С повышением температуры диффузионного цинкования свыше 420 °С вероятность разупрочнения термически обработанного крепежа возрастает.

Для деталей, работающих в условиях повторно статического (малоциклогвого) и усталостного (многоциклового) нагружений, испытывающих при эксплуатации свыше 10^4 циклов нагружений, антикоррозионная защита способом ТДЦ, может стать причиной снижения усталостных свойств за счет наличия высокотвердых хрупких фаз в цинковом диффузионном слое. В свою очередь способ термодиффузионного цинкования можно применять для ряда деталей, испытывающих в процессе эксплуатации до 10^2 циклов нагружений, (статическое нагружение) без потери эксплуатационных свойств изделий.

Для деталей подвергаемых термической обработки с использованием закалки и последующего отпуска для снятия закалочных напряжений, совмещение среднего отпуска с процессом нанесения защитного покрытия, является эффективным технологическим решением и позволяет повысить срок службы изделий с существенным снижением затрат на антикоррозионную обработку.

Список литературы

1. *Проскуркин Е.В., Горбунов Н.С.* Диффузионные цинковые покрытия. – М.: Металлургия, 1972. – 248 с.
2. *Swanger W.H., France R.D.* Effect of zinc coatings on the endurance properties of steel // Bureau of Standards Journal Research. – 1932. – Vol. 9. – RP 454.
3. ГОСТ 1759.4–87. Болты, винты и шпильки. Механические свойства и методы испытаний.
4. СТБ 1233–2000. Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Ускоренные испытания на контактно-механическую усталость.
5. *Konstantinov V.M., Buloichyk I.A.* Some aspects of sherardizing implementation during anti-corrosion protection of heat-treated metal parts // IOP Conference Series. Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 71. – P. 012063. – doi: 10.1088/1757-899X/71/1/012063.
6. The effect of Al and Cr additions on pack cementation zinc coatings / D. Chaliampalias, M. Papazoglou, S. Tsipas, E. Pavlidou, S. Skolianos, G. Stergioudis, G. Vourlias // Applied Surface Science. – 2010. – Vol. 256, iss. 11. – P. 3618–3623.

INFLUENCE OF THERMO DIFFUSION PACK CEMENTATION ON MECHANICAL PROPERTIES OF HEAT-TREATED STEEL ARTICLES

Konstantinov V.M., D. Sc. (Engineering), Professor, e-mail: v_m_konst@mail.ru
Buloichyk I.A., Scientific associate, e-mail: ilya.by@gmail.com

Belarusian National Technical University, Material Science in Mechanical department, 65 Nezavisimosty avenue, Minsk, 220013, Republic of Belarus

Abstract

The article reveals the data concerning the mechanical properties changes of heat-treated steel articles subjected to thermo diffusion pack cementation. The temperature frames of thermo diffusion influence on tensile strength were determined for heat-treaded steel articles. Results of tensile test of high strength bolts treated using thermo diffusion pack cementation at 420 °C show no any effect from the side of pack cementation treatment on working properties of the tested samples. It is shown that in conditions of cyclic fatigue loading thermo diffusion pack cementation of heat treated article may leads to strength loss that can be explained by formation of solid intermetallic phases in a surface area of the article.

Keywords
thermo diffusion pack cementation, zinc coatings, tensile strength, metal fatigue