

**9. Соколов, Ю.В.** Исследование оксидных пленок, полученных методом высоковольтного электрохимического оксидирования / Ю.В. Соколов, В.А. Кукареко, А.А. Паршуту // *Металлургия: Республ. межведом. сб. науч. тр.* – Минск : БНТУ. – 2014. – Вып. 35. – С. 199–207.

**10. Метод** высоковольтного электрохимического оксидирования алюминия / А.А. Паршуту [и др.]. // *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: Материалы VI междунар. науч.-техн. конф., Минск, 14–16 сент. 2011 : в 3 кн.* – Минск, 2011. – Кн. 2. – С. 294–298.

**11. Мозалев, А.М.** Формирование пористых оксидных пленок в условиях самолокализации ионного тока при гальваностатическом анодировании алюминия в растворах фосфорной кислоты / А.М. Мозалев, И.И. Мозалева, А.А. Позняк // *Доклады БГУИР.* – Минск. – 2006. – Т. 2. – С. 127–133.

*УДК 669.58*

**В.М. КОНСТАНТИНОВ**, д-р техн. наук,  
**П.С. ГУРЧЕНКО**, д-р техн. наук,  
**И.А. БУЛОЙЧИК** (БНТУ),  
**В.О. ЗАМЯТНИН**,  
**С.А. ТЮРИН** (ЛИИ ОАО «Гомсельмаш»)

## **ВЛИЯНИЕ ТЕРМОДИФфуЗИОННОГО ЦИНКОВАНИЯ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ СТАЛИ 45**

Одной из эффективных технологий антикоррозионной защиты на основе цинка является термодиффузионное цинкование в порошковых насыщающих средах (ТДЦ). Этот способ нашел широкое применение в различных отраслях машиностроения за счет специфических особенностей формируемого на изделии защитного слоя, обеспечивающего повышенную стойкость к истиранию и адгезионную прочность сцепления с основой.

Процесс ТДЦ в 70-е–90-е годы XX века активно исследовался и совершенствовался на кафедре «Материаловедение в машиностроении» БНТУ (БПИ) под руководством профессоров Ляховича Л.С. и Ворошина Л.Г. Значимый вклад в данном направлении внесли

ученые БПИ–БНТУ: Пантелеенко Ф.И., Кухарев Б.С., Галин Р.Г., Щербаков Э.Д., Астрейко Л.А. и др.[1–3].

На современном этапе исследований разрабатывается новый подход к реализации процессов ТДЦ, заключающийся в использовании способа (ТДЦ) в качестве заключительной операции термической и антикоррозионной обработки изделий из металла [4, 5]. Учитывая широкий температурный интервал реализации процессов ТДЦ (от 300 до 700 °С), целесообразно совмещение ТДЦ и отпуска закаленной стали [6]. Указанный интервал рабочих температур дает принципиальную возможность подобрать необходимый режим цинкования с учетом предварительной термической обработки изделий. Ранее проведенные исследования выявили неоднозначное влияние ТДЦ на свойства изделий с регламентируемыми прочностными характеристиками [7]. В ходе испытаний для образцов с различными классами прочности, подверженных ТДЦ, наблюдали определенное снижение значений предела прочности  $\zeta_v$  и условного предела текучести  $\zeta_{0,2}$ , что связано с активацией диффузионных процессов и дополнительным термическим воздействием на структуру стали.

При использовании ТДЦ в качестве завершающей операции химико-термической обработки закаленных изделий, работающих в условиях циклического нагружения, возможно снижение прочностных свойств, обусловленное формированием в поверхностной зоне детали интерметаллидного диффузионного слоя, представленного на рисунке 1.

Проведенный анализ свидетельствует, что, обладая высокой микротвердостью (порядка 3300–4500 МПа), цинковые интерметаллидные диффузионные слои могут выступать в качестве источника формирования усталостных трещин, что, в свою очередь, может привести к преждевременному разрушению изделия.

С целью определения влияния формирования цинкового диффузионного слоя на усталостные характеристики стальных изделий, были проведены исследования изменения механической усталости термически обработанных образцов из стали 45, представленных на рисунке 2, после ТДЦ и без антикоррозионной обработки согласно режимам, представленным в таблице 1. Схема испытаний – консольный изгиб с вращением (рисунок 3).

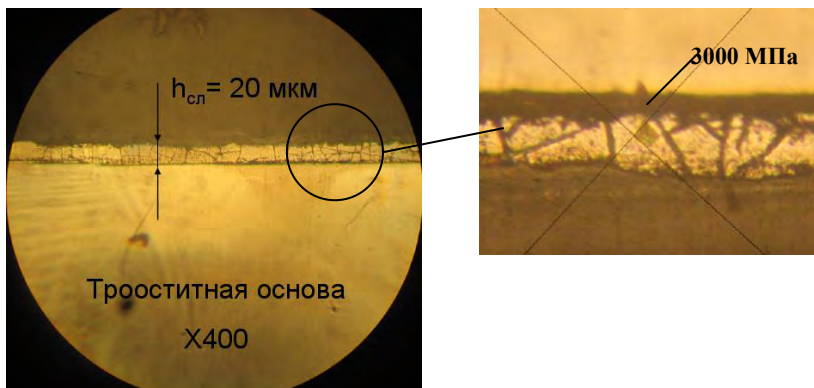


Рисунок 1 – Цинковый диффузионный слой, сформированный на закаленной стали (шлиф не травлен)

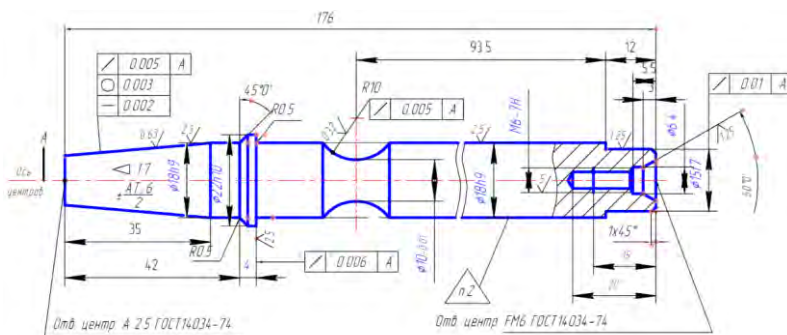
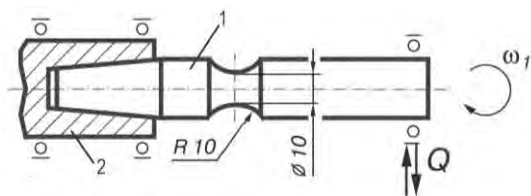


Рисунок 2 – Чертеж образца для испытаний

Таблица 1 – Термическая обработка образцов перед проведением испытаний

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



1 – образец; 2 – шпиндель испытательной машины

Рисунок 3 – Общая схема испытаний на консольный изгиб с вращением

Испытания проводили ускоренным методом ступенчатого нагружения в ЛИИ ОАО «ГОМСЕЛЬМАШ» на испытательной машине СИ-03М согласно схеме, представленной на рисунке 4.

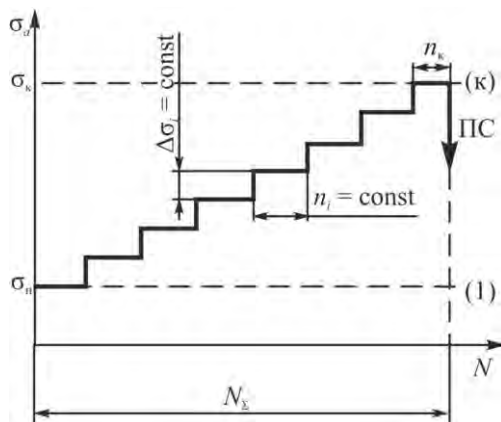


Рисунок 4 – Схема испытаний

Условия испытаний приведены в таблице 2. Частота вращения образца составляла  $3000 \text{ мин}^{-1}$ . Заданное значение начального уровня амплитуды напряжений при изгибе ( $\sigma_n$ ) составлял 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  $n_k$  на последней ступени нагружения определяли достижением предельного состояния (изломом образца). Переход на каждую ступень нагружения осуществля-

ли без промежуточных пауз. Испытания проводили непрерывно до наступления предельного состояния (излома образца). По результатам испытаний определяли предельное напряжение при изгибе  $\sigma_k$  и долговечность образца  $N_\Sigma$

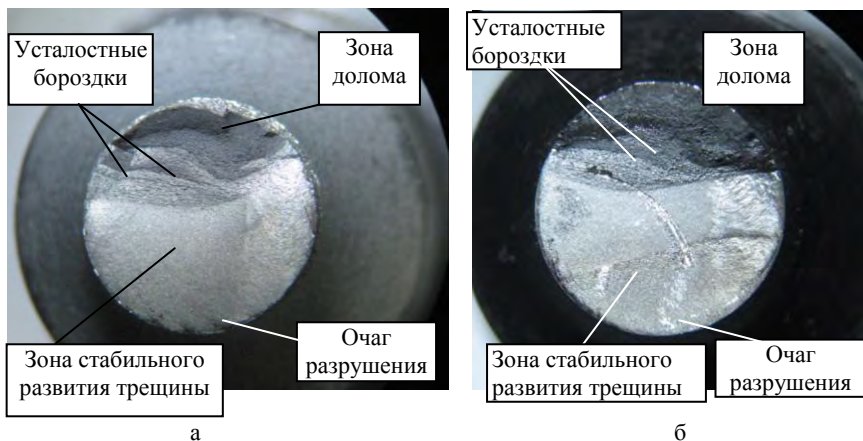
Результаты испытаний для каждого исследуемого образца приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты испытаний образцов на механическую усталость

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

Образцы с цинковым диффузионным слоем продемонстрировали меньшую долговечность и меньшее предельное напряжение при изгибе в сравнении с образцами без защитного цинкового покрытия. Этот факт может быть обусловлен формированием в переходной зоне от стальной основы к диффузионному слою высокотвердых хрупких интерметаллидных фаз ( $\Gamma$ -фаза с микротвердостью порядка 5000 МПа). Такой тип фазы является концентратором напряжений, которые при увеличении внешней нагрузки могут реализоваться в трещину.

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 – образец с цинковым диффузионным слоем; б – образец без защитного покрытия

Рисунок 5 – Характер изломов образцов после проведения испытаний

Таким образом, для ряда деталей, испытывающих в процессе эксплуатации до  $10^2$  циклов нагружений (статическое нагружение), совмещение среднего отпуска с процессом нанесения защитного покрытия является эффективным технологическим решением и позволяет повысить срок службы изделий при существенном снижении затрат на антикоррозионную обработку. Для деталей, работающих в условиях повторно статического (малоциклового) 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 отличие от классических способов нанесения защитных покрытий на основе цинка для термодиффузионного цинкования возможно разупрочнение изделий, прошедших предварительную термическую обработку. Однако есть основания полагать, что рациональный подход к выбору температурных режимов, а также учет регламентируемых прочностных параметров обрабатываемого изделия позволит рационально применять предложенный способ в качестве антикоррозионной защиты.

## Литература

- 1. Ворошнин, Л.Г.** Экологически безопасная технология цинкования железоуглеродистых сплавов в порошковых насыщающих средах / Л.Г. Ворошнин, Л.А. Астрейко // СО-МАТ-ТЕСН-98: 6-я Междунар. конф., Трнава, 22–23 октября, 1998 г. / Materialovotechnologicka faculta STU v Trnave. – Трнава, Словакия, 1998. – С. 24.
- 2. Галин, Р.Г.** Новая технология изготовления порошковых насыщающих сред для диффузионного цинкования / Р.Г. Галин, А.Л. Ворошнин // МиТОМ. – 1989. – № 9. – С. 21–25.
- 3. Пантелеенко, Ф.И.** Исследование механизма формирования, строения и свойств карбидных покрытий на основе хрома на предварительно цинкованных сталях: автореф. дис.... канд. техн. наук : 05.16.01 / Ф.И. Пантелеенко ; БПИ. – Минск, 1977. – 21 с.
- 4. V.M. Konstantinov, I.A. Buloichyk.** IOPScience. [Электронный ресурс] / Some aspects of sherardizing implementation during anticorrosive defence of heat-treated metal parts. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 71. – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/71/1/012063/meta;jsessionid=4FD67EC3BD18B2C5B4C109E615F1B569.c4.iopscience.cld.iop.org/> – Дата доступа: 10.11.2015.
- 5. Булойчик, И.А.** Термодиффузионное цинкование улучшаемых и пружинных сталей / И.А. Булойчик // Литье и металлургия. – 2013. – № 4, – С. 121–125
- 6. Константинов, В.М.** Особенности реализации процессов термодиффузионного цинкования при антикоррозионной защите термообработанных стальных изделий / В.М. Константинов, И.А. Булойчик // Создание новых и совершенствование действующих технологий и оборудования нанесения гальванических и их замещающих покрытий : Материалы 3-го Республ. науч.-техн. семинара, Минск, 5–6 дек., 2013 г. / БГТУ. – Минск, 2013. – С. 66–70.
- 7. Константинов, В.М.** К проблеме прочности диффузионно оцинкованных изделий / В.М. Константинов, И.А. Булойчик // Перспективные материалы и технологии: материалы Междунар. симпозиума. – Витебск, 2013. – С. 166–168.