



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-131-138>  
УДК 621.702

Поступила 29.10.2020  
Received 29.10.2020

## ВЛИЯНИЕ ТЕРМОДИФФУЗИОННОГО ЦИНКОВАНИЯ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ТЕРМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННЫХ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

*В. М. КОНСТАНТИНОВ, И. А. БУЛОЙЧИК, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: vm.konstantinov@bntu.by*

*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 высокопрочных интерметаллидных фаз в поверхностной зоне диффузионного слоя.*

**Ключевые слова.** Цинкование в порошковых насыщающих смесях, цинковые покрытия, предел прочности, усталость металла.

**Для цитирования.** Константинов, В. М. Влияние термодиффузионного цинкования на эксплуатационные свойства термически обработанных стальных изделий / В. М. Константинов, И. А. Булойчик // Литье и металлургия. 2020. № 4. С. 131–138. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-131-138>.

## INFLUENCE OF SHERARDIZING ON WORKING PROPERTIES OF METAL PARTS SUBJECTED TO PRIOR HEAT TREATMENT

*V. M. KONSTANTINOV, I. A. BULOICHYK, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: vm.konstantinov@bntu.by*

*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-treated 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

**For citation.** Konstantinov V. M., Bulovich I. A. Influence of sherardizing on working properties of metal parts subjected to prior heat treatment. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 4, pp. 131–138. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-131-138>.

### Введение

Одним из наиболее перспективных направлений повышения эффективности технологий термодиффузионного цинкования (ТДЦ) является их внедрение в общий цикл термической обработки изделий [1]. Температурный интервал процессов ТДЦ составляет от 300 до 700 °С 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 [2]. Наибольшую перспективу при реализации указанных технологий представляют крепежные изделия, обрабатываемые закалкой с последующим отпуском. Ряд таких изделий представлен на рис. 1.

Следует также принять во внимание тот факт, что при использовании данного способа цинкования для обработки изделий с регламентированными прочностными показателями, а также для изделий, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, могут возникнуть проблемы, связанные с потерей изделиями эксплуатационных свойств в связи с разупрочняющим воздействием температур ТДЦ на структуру стали [3]. Так, согласно данным [4], где представлены исследования влияния цинкования в расплаве

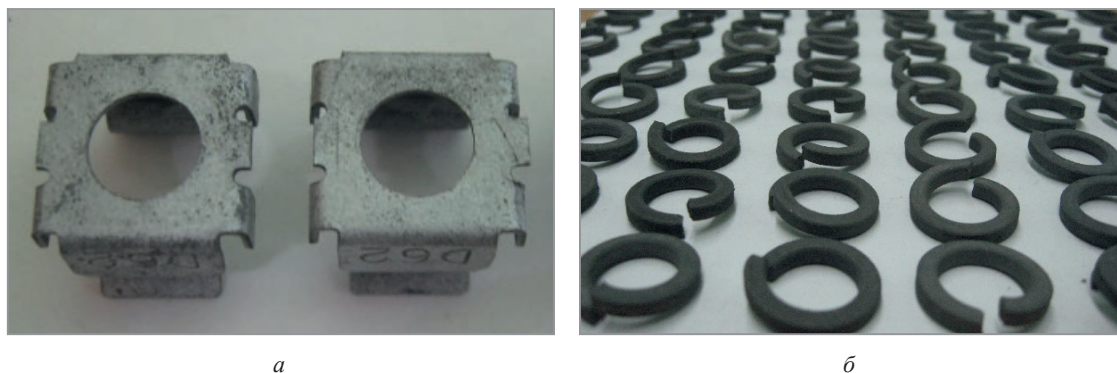


Рис. 1. Крепежные изделия, обработанные в соответствии с совмещенной технологией термической и антикоррозионной обработки с применением термодиффузионного цинкования: *а* – гайка квадратная, кузовная, клетьевая; *б* – граверная шайба

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 также определении допустимых значений класса прочности и условий эксплуатации стальных изделий, целесообразных для цинкования данным способом.

#### Материалы и методика исследований

Для проведения экспериментов использовали два типа образцов. 1. Крепеж, прошедший окончательную термическую обработку, оцинкованный способом ТДЦ и электролитическим цинкованием, подвергали испытаниям на разрыв согласно ГОСТ 1759.4–87 [5]. В ходе проведения испытаний разрушение всех образцов крепежных элементов происходило по резьбе (рис. 2).



Рис. 2. Образцы крепежных элементов с диффузионным цинковым слоем после испытания

2. С целью определения влияния формирования цинкового диффузионного слоя на усталостные характеристики стальных изделий проводили сравнительное исследование механических свойств при циклических нагрузках термически обработанных образцов из стали 45 и 65Г с дополнительной обработкой способом ТДЦ и без антикоррозионной обработки. Режимы термической обработки исследуемых образцов для усталостных испытаний приведены в табл. 1.

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

Испытания проводили ускоренным методом ступенчатого нагружения согласно СТБ 1233–2000 [6] по схеме, представленной на рис. 3, 4.

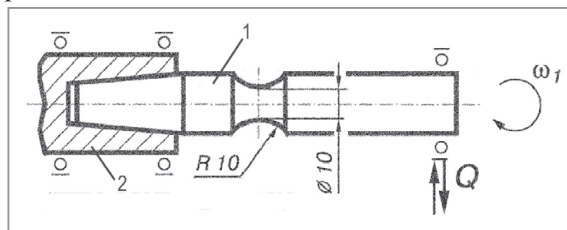


Рис. 3. Общая схема испытаний на консольный изгиб с вращением:

1 – образец; 2 – шпиндель испытательной машины;  $Q$  – нагрузка на образец;  $\omega$  – частота вращения образца

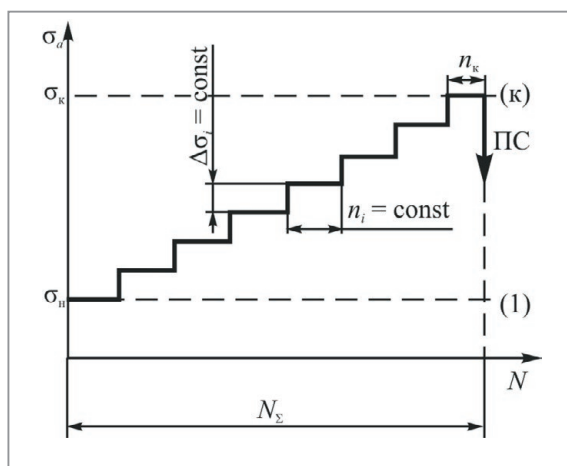


Рис. 4. Графическое представление режима испытаний

Частота вращения образца составляла  $3000 \text{ мин}^{-1}$ . Заданное значение начального уровня амплитуды напряжений при изгибе ( $\sigma_n$ ) – 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 осуществляли без промежуточных пауз. По результатам испытаний определяли предельное напряжение при изгибе  $\sigma_k$  и долговечность образца  $N_\Sigma$ .

### Результаты и обсуждение

Результаты испытания на растяжение (табл. 2) не выявили изменения эксплуатационных характеристик диффузионно-оцинкованного крепежа в сравнении с крепежом, оцинкованным электролитическим способом цинкования.

Таблица 2. Результаты испытания болтов на растяжение

Номинальный диаметр резьбы, мм	Вид обработки болта	Временное сопротивление $\sigma_b$ после испытания, Н/мм <sup>2</sup>
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



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. Для сравнения на рис. 5 приведены данные механических характеристик высокопрочного крепежа после диффузионного цинкования и модельного отжига при 450 °С. В ходе испытаний для образцов с различными классами прочности, подверженных термодиффузионному цинкованию (450 °С, 1 ч) и отпуску (450 °С, 1 ч), наблюдали снижение значений предела прочности  $\sigma_B$  и условного предела текучести  $\sigma_{0,2}$ , что связано с изменением структуры изделия при дополнительном термическом воздействии.

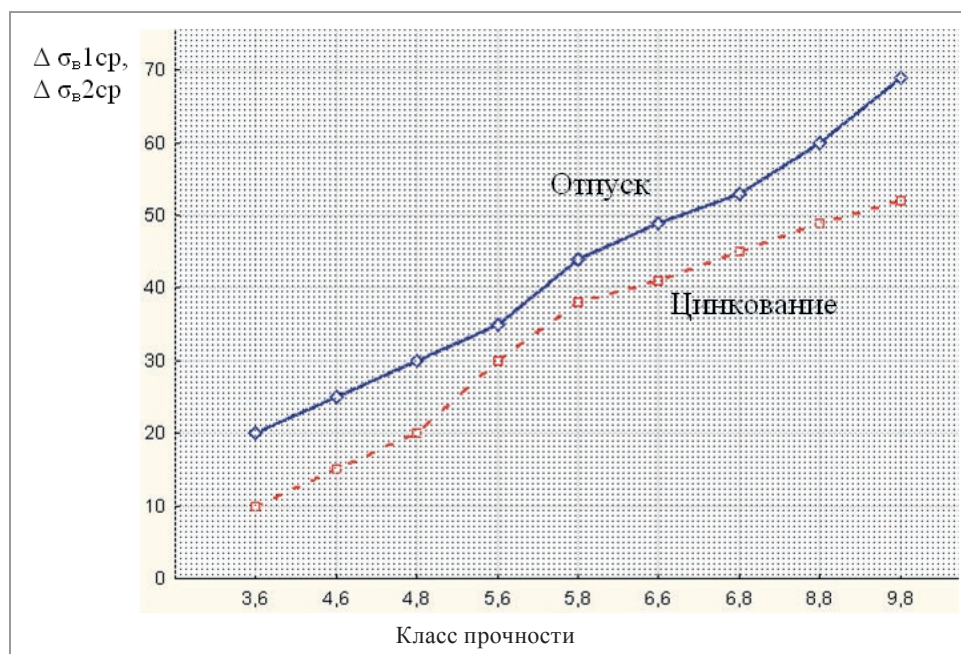


Рис. 5. Зависимость изменения разности среднего значения предела прочности при цинковании (450 °С, 1ч) –  $\Delta \sigma_{B1cp}$  и отпуске (450 °С, 1ч) –  $\Delta \sigma_{B2cp}$  от значения класса прочности

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. Несмотря 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 позволяет эффективно применять данный способ в качестве антикоррозионной защиты. В случае если требуется произвести антикоррозионную защиту деталей, прошедших окончательную термообработку, например, после закалки и отпуска, процесс термодиффузионного цинкования целесообразно проводить при температурах ниже температуры отпуска с выдержкой, обеспечивающей формирование диффузионного слоя необходимой толщины, но не достаточной для существенного разупрочнения обрабатываемого изделия.

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 [7].

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 (рис. 6 а, б).

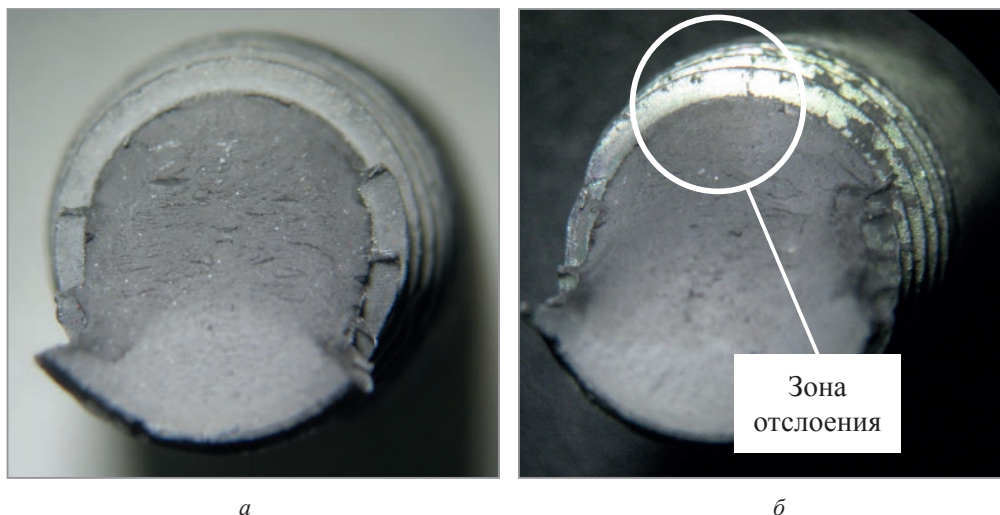


Рис. 6. Фрактография изломов крепежных элементов с диффузионным (а) и электролитическим (б) типом цинкового покрытия после испытания на растяжение.  $\times 10$

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.

Согласно данным результатов усталостных испытаний, представленных в табл. 3, 4, образцы с цинковым диффузионным слоем продемонстрировали меньшую долговечность и меньшее предельное напряжение при изгибе в сравнении со стальными образцами без защитного цинкового покрытия.

Таблица 3. Результаты испытаний образцов на механическую усталость для стали 45

Номер образца	Предельное напряжение при изгибе $\sigma_k$ , 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
6	400	458241

Таблица 4. Результаты испытаний образцов на механическую усталость для стали 65Г

Номер образца	Предельное напряжение при изгибе $\sigma_k$ , МПа	Долговечность образца $N_{\Sigma}$ , цикл
Образцы с диффузионным слоем		
1	250	362186
2	250	334692
3	250	357462
Образцы без защитного покрытия		
4	350	528871
5	350	495309
6	350	525662

Данный факт может быть обусловлен формированием хрупких интерметаллидных фаз ( $\Gamma$ -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 [8].

На основании данных фрактографического анализа (рис. 7, 8) для обеих марок сталей характерен вязкий излом. Отличительной особенностью изломов, характерных для стали 65Г с цинковым диффузионным слоем, является формирование сразу нескольких очагов разрушения в приповерхностной зоне

образца. Данный факт может быть объяснен большим количеством структурных напряжений за счет большей твердости образцов из стали 65Г в сравнении с образцами из стали 45, что послужило более активному зарождению усталостных трещин.

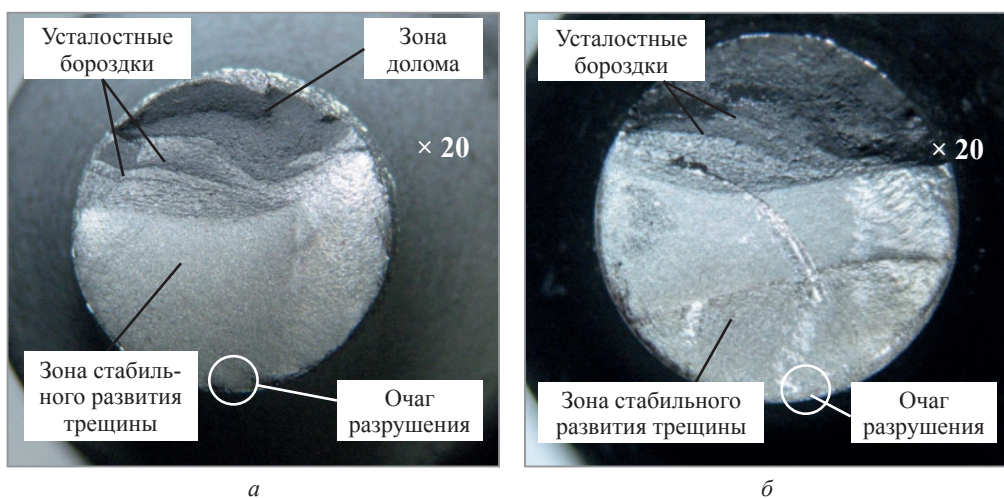


Рис. 7. Характер изломов образцов после проведения испытаний для стали 45: *а* – образец с цинковым диффузионным слоем; *б* – образец без защитного покрытия

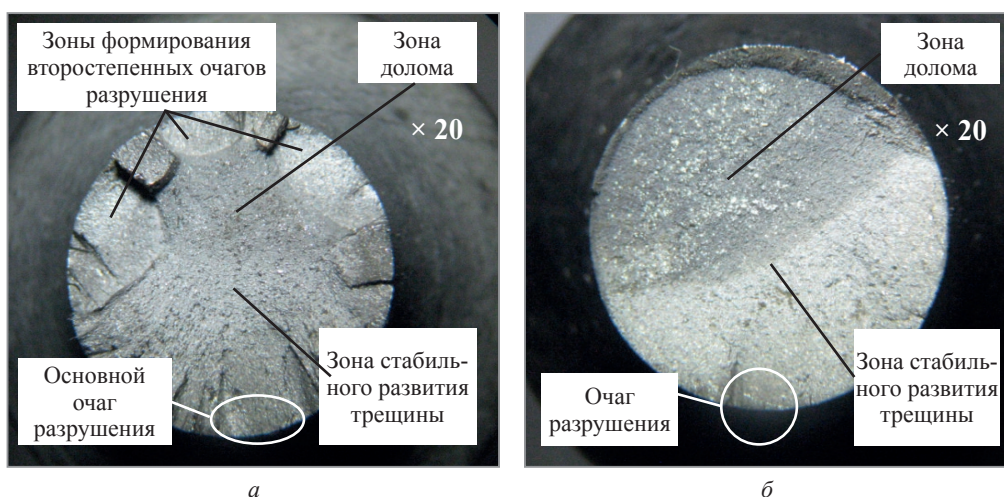


Рис. 8. Характер изломов образцов после проведения испытаний для стали 65Г: *а* – образец с цинковым диффузионным слоем; *б* – образец без защитного покрытия

Следует отметить, что в условиях коррозионно-усталостного воздействия число циклов до полного разрушения (долговечность  $N_{\Sigma}$ ) для образцов с цинковым диффузионным слоем было сопоставимо со значениями для образцов без защитного покрытия (табл. 5). Данный факт можно объяснить созданием дополнительных концентраторов напряжений по периметру образцов без защитного диффузионного слоя, сформировавшихся под воздействием коррозии (рис. 9, 10).

Таблица 5. Результаты испытаний образцов на механическую усталость для стали 65Г (после коррозионных испытаний)

Номер образца	Предельное напряжение при изгибе $\sigma_{\text{ж}}$ , МПа	Долговечность образца $N_{\Sigma}$ , цикл
Образцы с диффузионным слоем		
1	250	365159
2	300	398041
3	300	419716
Образцы без защитного покрытия		
4	300	395994
5	300	396893
6	300	439398



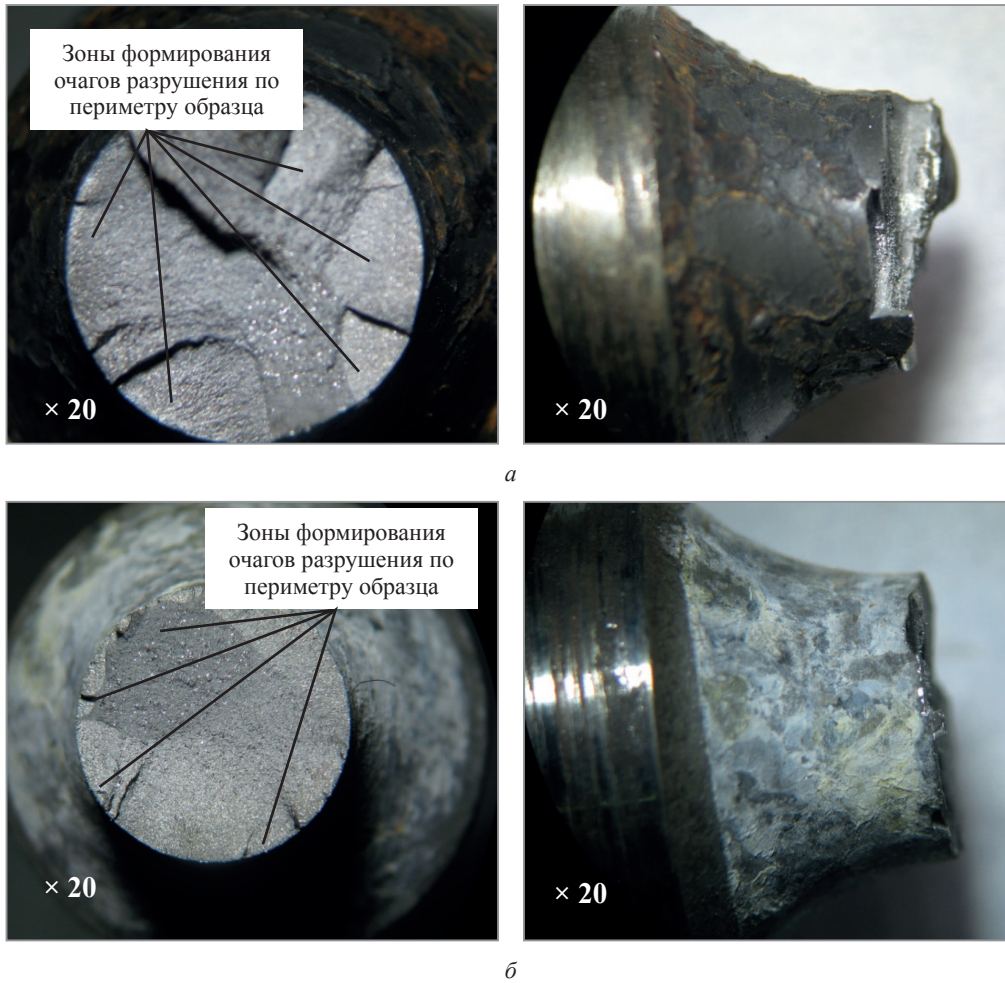


Рис. 9. Характер изломов образцов после проведения коррозионно-усталостных испытаний для стали 65Г без защитного диффузионного слоя (а) и с защитным диффузионным слоем (б).

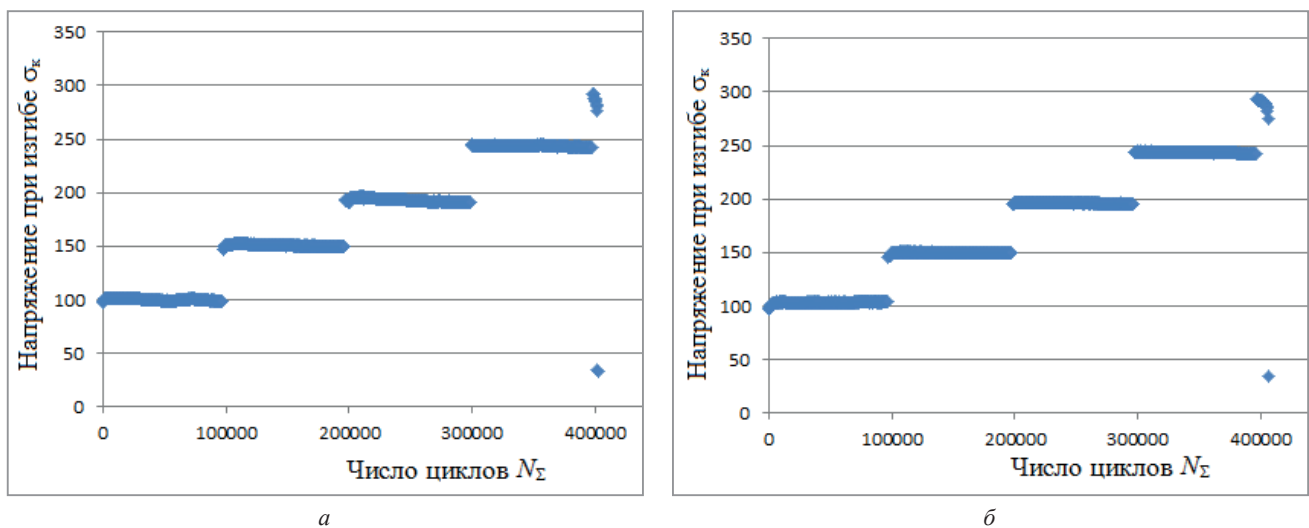


Рис. 10. Сравнение зависимостей напряжений при изгибе от числа циклов испытаний для образцов с защитным диффузионным слоем (а) и без защитного слоя (б)

### 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 (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 свою очередь, в условиях коррозионно-усталостного нагружения при абразивном воздействии коррозионно-активной среды обработка способом ТДЦ не снижает долговечность обработанных данным способом деталей.

Несмотря 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 позволяет эффективно применять данный способ в качестве антикоррозионной защиты. В случае если требуется произвести антикоррозионную защиту деталей, прошедших окончательную термообработку, например, после закалки и отпуска, процесс термодиффузионного цинкования целесообразно проводить при температурах ниже температуры отпуска с выдержкой, обеспечивающей формирование диффузионного слоя необходимой толщины, но не достаточной для существенного разупрочнения обрабатываемого изделия.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Булойчик, И. А. Термодиффузионное цинкование улучшаемых и пружинных сталей / И. А. Булойчик // *Литье и металлургия*. 2013. № 4. С. 121–125.
2. Патент РБ на изобретение № 20319 С23С 10/02 от 26.04.2016 «Способ термодиффузионного цинкования стальных упругих элементов». В. М. Константинов, И. А. Булойчик, А. М. Скибарь.
3. Проскуркин, Е. В. Диффузионные цинковые покрытия / Е. В. Проскуркин, Н. С. Горбунов М.: Металлургия, 1972. 248 с.
4. Swanger W. H. Влияние цинковых покрытий на усталостные характеристики стали / W. H. Swanger, R. D. France // *Бюро стандартов и научно-исследовательских журналов*. Вашингтон, 30.04.1932.
5. ГОСТ 1759.4–87 Болты, винты и шпильки. Механические свойства и методы испытаний.
6. СТБ 1233–2000 Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Ускоренные испытания на контактно-механическую усталость.
7. Some aspects of sherardizing implementation during anticorrosive defence of heat-treated metal parts [Электронный ресурс] / V. M. Konstantinov, I. A. Bulojchik. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering № 71, 2015 Article ID: 012063. – Режим доступа: <http://iopscience.iop.org/1757-899X/71/1/012063>. – Дата доступа: 08.05.17.
8. Константинов, В. М. Исследование влияния термодиффузионного цинкования на усталостную прочность сталей / В. М. Константинов, И. А. Булойчик // XII Междунар. науч.-техн. конф. «Современные методы и технологии создания и обработки материалов». ФТИ НАН Беларуси. Минск, 2017. С. 100–101.

#### REFERENCES

1. Bulojchik I. A. Termodiffuzionnoe cinkovanie uluchshaemyh i pruzhinnyh stalej [Sherardizing for hardened spring steels]. *Lit'e i metallurgija = Foundry production and metallurgy*, 2013, no. 4, pp. 121–125
2. Konstantinov V. M., Bulojchik I. A., Skibar' A. M. *Sposob termodiffuzionnogo cinkovanija stal'nyh uprugih jelementov* [Method of thermal diffusion galvanizing of steel elastic elements]. Patent RB, no. 20319 S23S 10/02 of 26.04.2016.
3. Proskurkin E. V., Gorbunov N. S. *Diffuzionnye cinkovye pokrytija* [Zinc diffusion coatings]. Moscow, Metallurgija Publ., 1972, 248 p.
4. Swanger W. H., France R. D. *Vlijanie cinkovyh pokrytij na ustalostnye harakteristiki stali* [Influence of zinc coatings on metal fatigue] *Bjuro standartov i nauchno-issledovatel'skih zhurnalov*. Vashington, 30.04.1932.
5. ГОСТ 1759.4–87 Bolty, vinty i shpil'ki. Mehanicheskie svojstva i metody ispytanij [Bolts, screws and studs of specified property classes with coarse and fine pitch thread].
6. СТБ 1233–2000 Tribofatika. Metody iznosoustalostnyh ispytanij. Uskorennyye ispytaniya na kontaktno-mehanicheskuju ustalost' [Tribo-fatigue. Wear-fatigue test methods. Accelerated mechanical contact fatigue tests].
7. Some aspects of sherardizing implementation during anticorrosive defence of heat-treated metal parts. Available at: <http://iopscience.iop.org/1757-899X/71/1/012063>. – Date of access: 08.05.17
8. Konstantinov V. M., Bulojchik I. A. *Issledovanie vlijanija termodiffuzionnogo cinkovanija na ustalostnuju prochnost' stalej* [Influence of sherardizing on metal fatigue]. *XII Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Sovremennye metody i tehnologii sozdaniya i obrabotki materialov»* [XII International Scientific and Technical Conference “Modern Methods and Technologies of Creation and Processing of Materials”]. FTI NAN RB Publ., Minsk, 2017, pp. 100–101.