

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМОДИФФУЗИОННОГО ЦИНКОВАНИЯ НА УСТАЛОСТНУЮ ПРОЧНОСТЬ СТАЛЕЙ

В.М. Константинов, И.А. Булойчик

Белорусский национальный технический университет,  
Минск, Беларусь,

*В статье представлены данные о влиянии цинковых интерметаллидных диффузионных слоев на эксплуатационные свойства изделий, работающих в условиях циклического усталостного нагружения. Показано, что при контактно-механическом усталостном воздействии обработка способом термодиффузионного цинкования может приводить к разупрочнению стальных изделий, что связано с формированием высокопрочных интерметаллидных фаз в поверхностной зоне диффузионного слоя. В то же время, при эксплуатации в условиях воздействия атмосферной коррозии усталостная прочность стальных образцов, подвергнутых термодиффузионному цинкованию и без защитного покрытия находятся на одном уровне.*

**Ключевые слова:** цинкование в порошковых насыщающих смесях, диффузионные покрытия, усталость металла, коррозия

## INVESTIGATION OF PACK GALVANOZING INFLUENCE ON FATIGUE STRENGTH OF STEEL ARTICLES

V.M. Konstantinov, I.A. Buloichyk

Belorussian National Technical University,  
Minsk, Belarus

*The article presents the data concerning the mechanical properties of heat-treated steel articles subjected to thermo-diffusion galvanizing in powder mixtures. It is shown that in the conditions of cyclic fatigue loading pack galvanizing of heat treated article may lead to the loss of strength, which can be explained by the formation of hard intermetallic phases in the outer area of the diffusion layer. Nevertheless, cyclic fatigue loading tests in condition of atmospheric corrosion revealed the comparative values of endurance both for samples with and without pack galvanizing treatment.*

**Key words:** Pack galvanizing, diffusion coatings, rotation-bending fatigue, corrosion

**E-mail:** v\_m\_konst@mail.ru, ilya.by@gmail.com

## Введение

Одним из альтернативных направлений в сфере получения защитных цинковых покрытий на стальных изделиях является способ термодиффузионного цинкования в порошковых насыщающих средах (ТДЦ) [1]. Преимущественной особенностью данного способа является возможность замены процессом ТДЦ ряда операций термической обработки деталей (отпуска), что ведет к снижению затрат на термическую и антикоррозионную обработку изделий [2, 3].

При использовании данного способа в качестве завершающей операции химико-термической обработки закаленных изделий, работающих в условиях различного нагружения, возможно изменение прочностных свойств, обусловленное формированием в поверхностной зоне детали интерметаллидного диффузионного слоя. Как известно, для конструкционных деталей решающее значение имеют механические свойства. Ранее выполненными исследованиями установлено влияние цинкового диффузионного слоя на прочностные характеристики крепежных элементов при статических испытаниях [4, 5]. Было установлено, что диффузионное цинкование в порошковых средах при температурах, не превышающих 420 °С, не оказывает существенного влияния на прочностные характеристики крепежных элементов (граверов, фиксаторов), работающих в условиях статического нагружения.

Для ряда конструкционных деталей существенным является долговечность в условиях знакопеременных действующих нагрузок. Известно, что наличие сжимающих напряжений в поверхностном слое после ряда процессов химико-термической обработки (азотирование, цементация) способствует существенному повышению предела выносливости [6]. Однако далеко не все процессы химико-термической обработки обеспечивают аналогичный эффект. Проведенный литературный анализ не обнаружил данных об усталостной прочности стальных изделий после термодиффузионного цинкования. Есть основания полагать, что относительно твердые (порядка 3300 МПа) цинковые интерметаллидные диффузионные слои могут выступать в качестве источника формирования усталостных трещин при знакопеременных нагрузках и способствовать преждевременному разрушению изделия. В этом случае при знакопеременных нагрузках разрушение детали может происходить постепенно при напряжениях, существенно меньших, чем предел прочности. Различные типы концентраторов напряжения (дефекты механической обработки, коррозионные раковины), создавая напряжения растяжения, также понижают предел выносливости [7].

Важную роль в протекании процесса усталостного разрушения играет тип кристаллической решетки и фазовый состав металла в зоне усталостного разрушения. Так, для процесса вязкого разрушения в случае для металлов с гранецентрированной кубической решеткой, когда нет факторов, затрудняющих процесс течения металла, разрушение происходит путем вытягивания шейки образца в точку и разделением образца на части срезом. Если действующая система может быть заблокирована (например, объемно-центрированная кубическая решетка с частицами другой фазы), то причиной разрушения образца являются концентрации напряжений от скопления дислокаций около инородных включений [8]. Поэтому при рассмотрении процессов усталостного разрушения для стальных деталей с цинковыми диффузионными слоями следует учитывать наличие в приповерхностной зоне образца различных фаз, с отличным друг от друга типом кристаллической решетки.

## Материалы и методики исследования

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 и 65Г, обработанных способом ТДЦ и без антикоррозионной обработки. Схема испытаний — консольный изгиб с вращением (рис. 1). Диффузионное цинкование проводили с использованием стационарных тиглей в порошковой насыщающей среде состава (% масс.): Zn — 70 %; Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 29 %; NH<sub>4</sub>Cl — 1 %. Цинкованию подвергали только шейку образцов, как указано на рис. 1. Остальная часть образца была изолирована с использованием пасты на основе жидкого стекла. Часть образцов из стали 65Г с защитным диффузионным слоем и без антикоррозионной обработки подвергли ускоренным коррозионным испытаниям в камере соляного тумана (5%-ный р-р NaCl) в течение 96 ч.

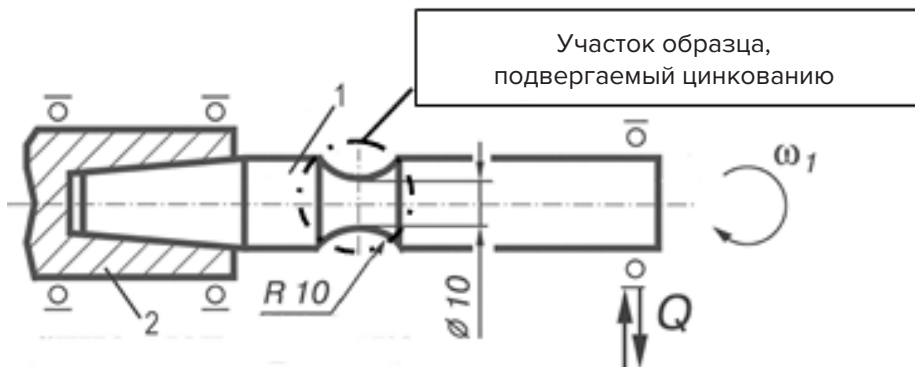


Рис. 1. Общая схема испытаний на консольный изгиб с вращением:  
1 — образец, 2 — шпиндель испытательной машины  
Q — нагрузка на образец;  $\omega$  — частота вращения образца.

Режимы термической обработки исследуемых образцов приведены в табл. 1.

Табл. 1

### Термическая обработка образцов перед проведением испытаний

Тип образцов		Режимы термической обработки		HRC
		закалка	отпуск	
Сталь 45	Диффузионный слой отсутствует	Нагрев под закалку до 850 °С — в защитной атмосфере. Выдержка 30 мин. Охлаждение вертикально — в воду	Отпуск 450 °С, 180 мин	32
	ТДЦ		ТДЦ в стационарном тигле при 450 °С, 120 мин	
Сталь 65Г	Диффузионный слой отсутствует	Нагрев под закалку до 830 °С — в защитной атмосфере. Выдержка 30 мин. Охлаждение вертикально — в масло	Отпуск 400 °С, 120 мин	43
	ТДЦ		ТДЦ в стационарном тигле при 400 °С, 120 мин	

Усталостные испытания проводили ускоренным методом ступенчатого нагружения на испытательной машине СИ-03М для образцов из стали 45 и на испытательном центре SZ-01 для образцов из стали 65Г согласно СТБ 1233-2000 [9]. Частота вращения образца составляла 3000 мин<sup>-1</sup>. Заданное значение начального уровня амплитуды напряжений при изгибе ( $\sigma_H$ ) составляло 200 МПа для образцов из стали 45 и 100 МПа для образцов из стали 65Г. Интервал приращения амплитуды напряжений при

изгибе ( $\Delta\sigma$ ) 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. 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 исследования и их обсуждение

Полученные результаты ожидаемо свидетельствуют о снижении долговечности образцов с цинковыми термодиффузионными слоями на 23...27 % для стали 45 и 27...36 % для стали 65Г (табл. 2, 3). Образцы с цинковым диффузионным слоем продемонстрировали меньшую долговечность и меньшее предельное напряжение при изгибе в сравнении со стальными образцами без защитного цинкового покрытия из-за наличия хрупкой интерметаллидной фазы (Г-фаза) в переходной зоне от стальной основы к диффузионному слою (рис. 2). Данная фаза является концентратором напряжений и при увеличении знакопеременной внешней нагрузки может являться причиной зарождения усталостной трещины. Специфика строения цинковых термодиффузионных слоев также способствует снижению усталостных характеристик.

Табл. 2

#### Результаты испытаний образцов на механическую усталость для стали 45

№ 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

Табл. 3

#### Результаты испытаний образцов на механическую усталость для стали 65Г (не подверженные коррозионным испытаниям)

№ 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

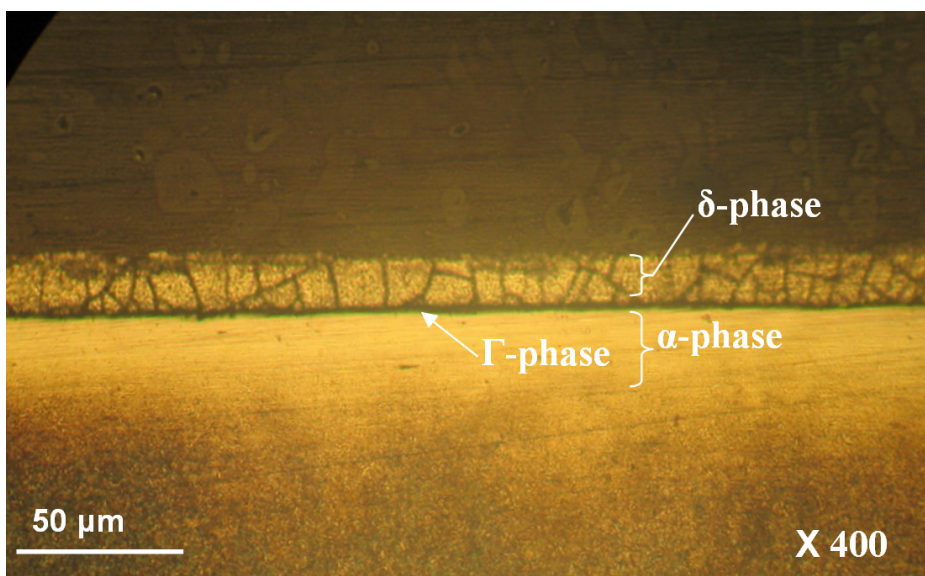


Рис. 2. Микроструктура стали 65Г после закалки и диффузионного цинкования при 400 °С. Микротвердость слоя в зоне  $\delta$  фазы — 3000–3500 МПа

Фрактографический анализ показал, что для обеих марок сталей характерен вязкий излом (рис. 3, 4). Зарождение трещины, вероятно, происходит в переходной зоне между  $\Gamma$ -фазой, являющейся наиболее твердой (4000–4500 МПа) и самой хрупкой среди всех возможных фаз цинковых диффузионных слоев на стали, и  $\alpha$ -фазой, представляющей собой твердый раствор цинка в железе. 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 более высоким уровнем твердости и структурных напряжений в образцах из стали 65Г в сравнении с образцами из стали 45, а также фазовой неоднородностью в приповерхностной зоне оцинкованного образца, что послужило более активному зарождению усталостных трещин.



Рис. 3. Характер изломов образцов из стали 45 после усталостных испытаний:  
 а — образец с цинковым диффузионным слоем; б — образец без защитного покрытия

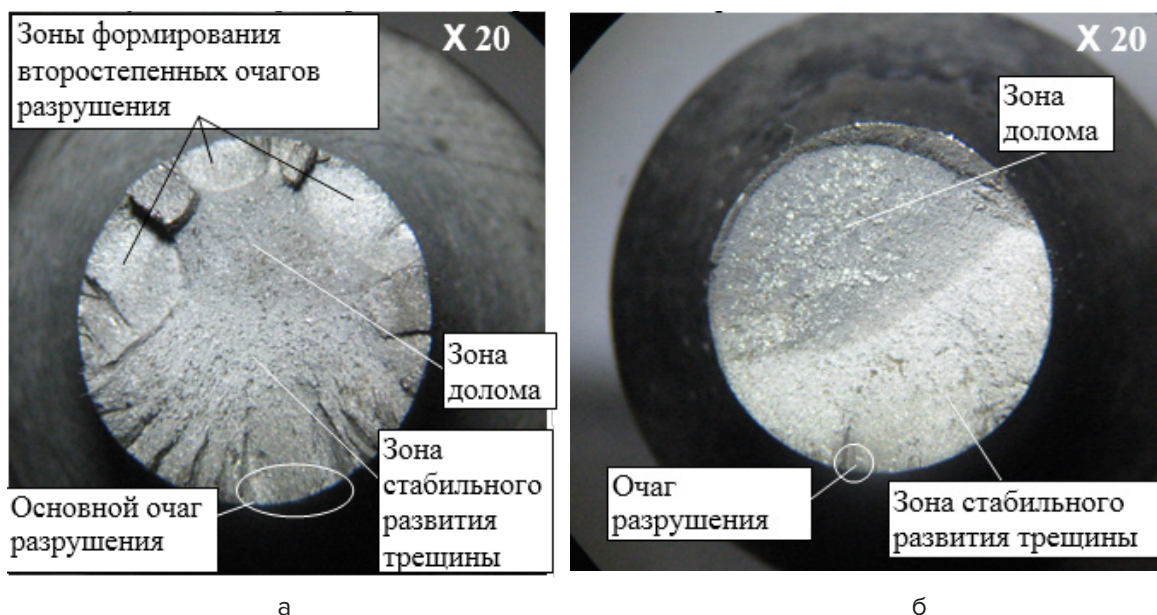


Рис. 4. Характер изломов образцов из стали 65Г после усталостных испытаний:  
а— образец с цинковым диффузионным слоем; б — образец без защитного покрытия

Факт возможного снижения усталостной прочности после термодиффузионного цинкования следует рассматривать в контексте активного коррозионного воздействия окружающей среды (атмосферная коррозия). Коррозионные повреждения, как известно, являются активными концентраторами напряжений. Поэтому следующим этапом исследований стало изучение усталостной прочности после коррозионных испытаний. Установлено, 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. 4).

Табл. 4

**Результаты испытаний образцов на механическую усталость для стали 65Г (после коррозионных испытаний)**

№ образца	Предельное напряжение при изгибе $\sigma_{\kappa}$ , 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

Данный факт можно объяснить созданием дополнительных концентраторов напряжения на поверхности стальных образцов без защитного диффузионного слоя, формирующихся под воздействием коррозионной среды (5 % NaCl) (рис. 5).

Поверхность стальных образцов без цинкового слоя в условиях ускоренных коррозионных испытаний в камере соляного тумана имела большое количество коррозионных повреждений (рис. 5 а), что существенно снизило их усталостную прочность. Поверхность оцинкованных образцов после коррозионных испытаний имела равномерный слой продуктов коррозии цинка, поэтому снижение усталостной прочности не произошло.

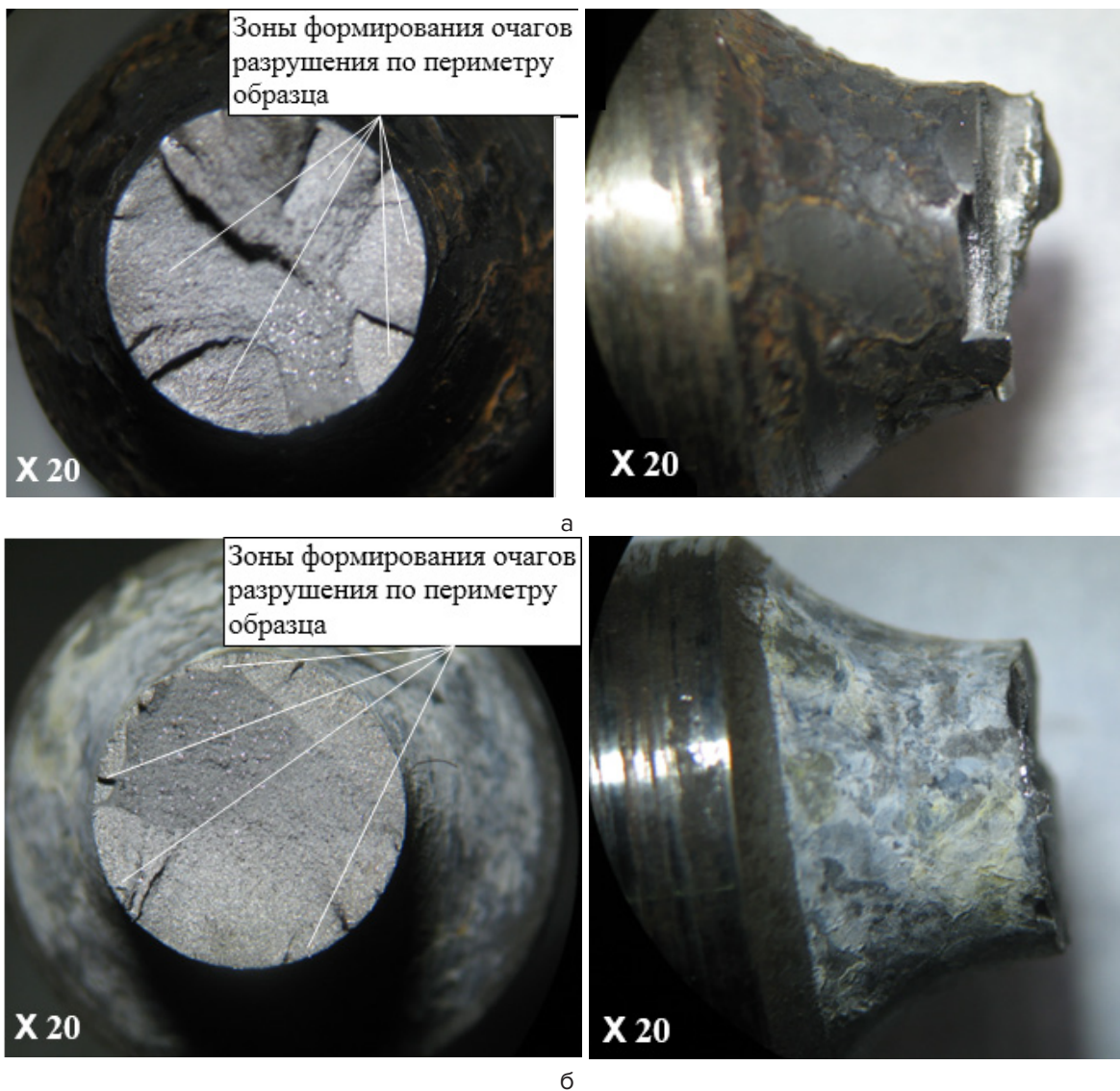
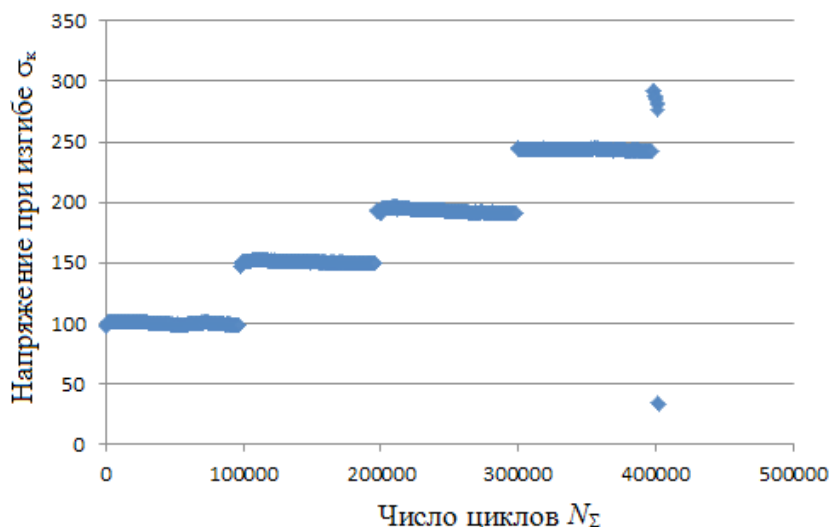
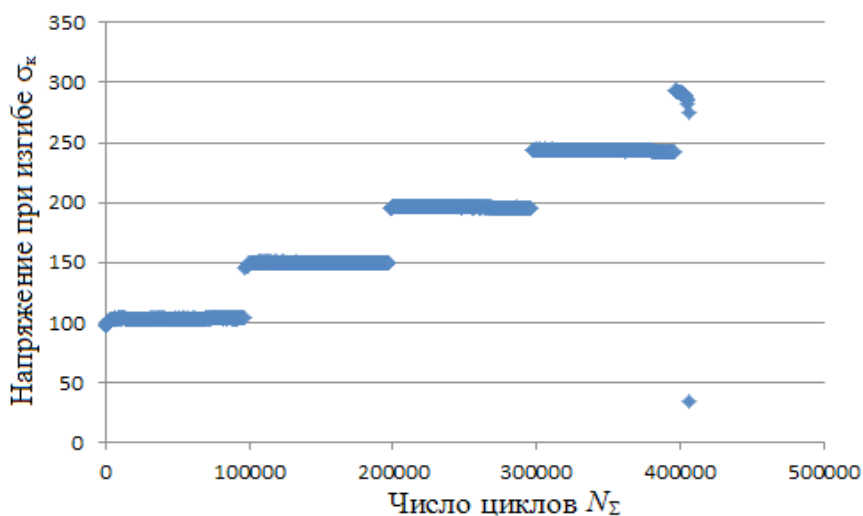


Рис. 5. Характер изломов образцов после коррозионно-усталостных испытаний для стали 65Г без защитного диффузионного слоя (а) и с защитным диффузионным слоем (б)

Разрушение образцов с цинковым интерметаллидным диффузионным слоем произошло при тех же значениях предельного напряжения при изгибе и суммарном количестве циклов до разрушения, что и для образцов без антикоррозионной обработки (рис. 6). Обнаруженное снижение усталостной прочности по сравнению с нецинкованными стальными изделиями без коррозионного воздействия является ожидаемым и обусловлено хрупкостью интерметаллидных соединений цинка. Однако интенсивное коррозионное разрушение неоцинкованной стальной поверхности выравнивает усталостную прочность стальных образцов с термодиффузионным цинковым слоем и без него.



а



б

Рис. 6. Зависимости напряжений при изгибе от числа циклов испытаний для образцов с защитным диффузионным слоем (а) и без защитного слоя (б)

### Заключение

Установлено, что в условиях атмосферной коррозии значения малоциклового усталостной прочности стали с цинковым диффузионным слоем сопоставимы с ее значениями для образцов без защитного слоя.

Показано, что в условиях атмосферного коррозионного воздействия целесообразно применять термодиффузионное цинкование в качестве заключительной операции термической обработки изделий, эксплуатирующихся в условиях малоциклового усталостного нагружения (до  $10^2$ ).

### ЛИТЕРАТУРА

1. Проскуркин, Е. В. Диффузионные цинковые покрытия / Е. В. Проскуркин, Н. С. Горбунов. — Москва: Металлургия, 1972. — 248 с.
2. Константинов, В. М. Разработка совмещенного процесса термической и антикоррозионной обработки стальных деталей автотехники/ Константинов В. М., Гурченко П. С.,



- Булойчик И. А. — Международная научно-техническая конференция «Инновации в машиностроении-2014, Минск 2014 том 3. — С. 384–387.
3. Konstantinov V. M., Bulojchik I. A. Some aspects of sherardizing implementation during anticorrosive defence of heat-treated metal parts. IOP Conference Series. Materials Science and Engineering 71/ 012063, 2015.
4. Применение процессов диффузионного цинкования для термически упрочненных изделий из металла / В. М. Константинов [и др.] // Литейные процессы. 2014, № 13. — С. 136–145.
5. Гурченко, П. С. Реализация процесса диффузионного цинкования в цикле термической обработки крепежных изделий / П. С. Гурченко, И. А. Булойчик // Межведомственный сборник научных трудов «Металлургия». — 2015, № 36. — С. 206–212.
6. Лахтин, Ю. М. Материаловедение: Учебник для высших технических учебных заведений / Ю. М. Лахтин. — Изд.-во: Машиностроение, 1990 г.
7. Гуляев, А. П. Металловедение. Учебник для вузов. 6-е издание / А. П. Гуляев. — М.: Metallurgy, 1986. — 544 с.
8. Мозберг, Р.К. Материаловедение / Р.К. Мозберг. — Таллин: Валгус, 1976, 553 с.
9. СТБ 1233-2000 Трибофатика. Методы износоусталостных испытаний. Ускоренные испытания на контактно-механическую усталость

#### REFERENCES

1. Proskurkin E. V., Gorbunov N. S. Diffuzionnye cinkovye pokrytiya [Diffusion zinc coatings]. Moscow, Metallurgiya, 1972, 248 p. (in Russian)
2. Konstantinov V. M., Gurchenko P. S., Bulojchik I. A. Razrabotka sovmeshchennogo processa termicheskoy i antikorrozionnoj obrabotki stal'nyh detalej avtotekhniki [Development of the combined process of thermal and anticorrosion treatment of steel parts of vehicles]. Conference, Innovacii v mashinostroenii-2014, Minsk 2014, vol. 3, pp. 384–387. (in Russian)
3. Konstantinov V. M., Bulojchik I. A. Some aspects of sherardizing implementation during anticorrosive defence of heat-treated metal parts. IOP Conference Series. Materials Science and Engineering 71/ 012063, 2015.
4. Konstantinov V. M. Primenenie processov diffuzionnogo cinkovaniya dlya termicheski uprochnennyh izdelij iz metalla / Litejnye process, 2014, no. 13, pp. 136–145. (in Russian)
5. Gurchenko P. S., Bulojchik I. A. Realizaciya processa diffuzionnogo cinkovaniya v cikle termicheskoy obrabotki krepzhnyh izdelij [Implementation of the diffusion galvanizing process in the cycle of heat treatment of fasteners]. collection of scientific papers, «Metallurgiya», 2015, no. 36, pp. 206–212. (in Russian)
6. Lahtin Yu. M. Materialovedenie [Materials Science]. tutorial, Mashinostroenie, 1990. (in Russian)
7. Gulyaev A. P. Metallovedenie [Metallurgy]. tutorial, 6 iss., Moscow, Metallurgiya, 1986, 544 p. (in Russian)
8. Mozberg R. K. Materialovedenie [Materials Science]. Valgus, Tallin, 1976, 553 p. (in Russian)
9. STB 1233-2000 Tribofatika. Metody iznosoustalostnyh ispytaniy. Uskorennyye ispytaniya na kontaktno-mekhanicheskuyu ustalost' [Tribo-fatigue. Methods of wear-and-fatigue testing. Accelerated tests for contact-mechanical fatigue]. (in Russian)

Статья поступила в редакцию 28.04.17