

**В.М. КОНСТАНТИНОВ**, д-р техн. наук,  
**И.А. БУЛОЙЧИК**,  
**Д.Н. БАЧИЛО** (БНТУ)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ УДАРНОЙ ВЯЗКОСТИ СТАЛЬНЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ИНТЕРМЕТАЛЛИДНЫХ ЖЕЛЕЗО-ЦИНКОВЫХ ДИФФУЗИОННЫХ СЛОЕВ**

С точки зрения совокупности эксплуатационных характеристик среди всех видов цинковых покрытий наиболее перспективными являются диффузионные слои, полученные способом термодиффузионного цинкования в порошковых насыщающих средах (ТДЦ). Связано это, прежде всего, с высоким комплексом свойств, которыми обладают цинковые диффузионные слои. Особенностью диффузионных слоев на основе цинка являются высокие показатели микротвердости (порядка 3360–5250 МПа), а также повышенная прочность сцепления с основой за счет реализации диффузионного взаимодействия между насыщающим элементом (цинком) и металлической поверхностью обрабатываемого изделия [1]. Формирование диффузионного слоя также повышает стойкость к коррозионному разрушению за счет формирования на поверхности изделия плотных защитных пленок, предотвращающих подвод кислорода вглубь диффузионного слоя [2]. Преимущественной особенностью способа ТДЦ является возможность совмещения с рядом операций термической обработки деталей (замена отпуска), что ведет к снижению затрат на термическую и антикоррозионную обработку изделий [3, 4].

При использовании термодиффузионного цинкования для защиты стальных элементов с жесткими требованиями к механическим свойствам важным является вопрос сохранения требуемых прочностных характеристик изделий. С учетом этого актуальным является вопрос возможного изменения ударной вязкости при формировании на поверхности изделия цинкового диффузионного слоя.

Для проведения исследования выбрали сталь 65Г. Данная марка стали представляет наибольшую перспективу при использовании технологий ТДЦ в качестве завершающей стадии химико-

термической обработки за счет совпадения температурных режимов цинкования и конечной термической обработки (отпуска) ряда упругих элементов, изготавливаемых из данной марки стали. Испытания на ударную вязкость проводились по ГОСТ 9454-78. Испытания проводились с концентратором напряжений вида U, образец типа 1 в соответствии с требованиями ГОСТ 9454-78. Испытания проводились на копре МК-30 при температурах +20 °С и –40 °С. Охлаждающая среда для проведения испытаний при отрицательных температурах – смесь углекислоты со спиртом. Нагрев под закалку проводился в лабораторной печи SNOL до температуры 830 °С. Термодиффузионное цинкование осуществляли во вращающемся контейнере с использованием порошка цинка в качестве насыщающей смеси. Представленные на испытание образцы были обработаны по следующим режимам:

- 1) закалка 830 °С, масло + ТДЦ 420 °С, 1 ч;
- 2) закалка 830 °С, масло + отпуск 420 °С, 1 ч;
- 3) закалка 830 °С + отпуск 420 °С, 1 ч + электролитическое цинкование.

Результаты испытаний на ударную вязкость образцов, обработанных по различным технологическим режимам, представлены в таблицах 1–3.

Таблица 1 – Результаты испытаний образцов в соответствии с режимом термической обработки № 1

Температура проведения испытаний	Номер образца	$S, \text{ см}^2$	$K, \text{ Дж}$	$KCU, \text{ Дж/см}^2$	$\langle KCU \rangle, \text{ Дж/см}^2$
+20 °С	11	0,8	45	56,25	54,4
	12	0,8	36	45	
	13	0,8	45	56,25	
	14	0,8	56	70	
	15	0,8	48	60	
	16	0,8	31	38,75	
–40 °С	17	0,8	23	28,75	44,2
	18	0,8	40	50	
	19	0,8	43	53,75	

Таблица 2 – Результаты испытаний образцов в соответствии с режимом термической обработки № 2

Температура проведения испытаний	Номер образца	$S, \text{ см}^2$	$K, \text{ Дж}$	$KCU, \text{ Дж/см}^2$	$\langle KCU \rangle, \text{ Дж/см}^2$
+20 °С	21	0,8	15	18,75	52,8
	22	0,8	53	66,25	
	23	0,8	56	70	
	24	0,8	45	56,25	
-40 °С	25	0,8	29	36,25	47,5
	26	0,8	30	37,5	
	27	0,8	55	68,75	

Таблица 3 – Результаты испытаний образцов в соответствии с режимом термической обработки № 3

Температура проведения испытаний	Номер образца	$S, \text{ см}^2$	$K, \text{ Дж}$	$KCU, \text{ Дж/см}^2$	$\langle KCU \rangle, \text{ Дж/см}^2$
+20 °С	31	0,8	30	37,5	40,6
	32	0,8	45	56,25	
	33	0,8	43	53,75	
	34	0,8	12	15	
-40 °С	35	0,8	29	35,25	34,95
	36	0,8	11	13,75	
	37	0,8	41	51,25	
	38	0,8	34	42,5	
	39	0,8	28	35	

На рисунках 1–3 приведены фотографии фратографического излома образцов, обработанных в соответствии с технологическими режимами 1–3.

На основании анализа полученных результатов после проведения режимов термической обработки № 1 и № 2 значения ударной вязкости при комнатной температуре для образцов, обработанных по режиму № 1, на несколько единиц выше значений, характерных для образцов, обработанных в соответствии с режимом № 2. В свою очередь для данных, полученных при проведении испытаний при

отрицательных температурах, характерно превалирование значений ударной вязкости для образцов, обработанных по режиму № 2. Фактически можно утверждать, что замена отпуска термодиффузионным цинкованием, при одинаковой продолжительности выдержки, не влияет на показатели ударной вязкости в исследуемом интервале температур.

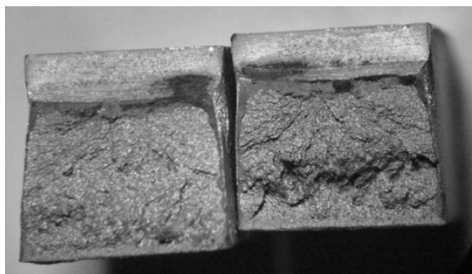


Рисунок 1 – Характер излома образца № 14,  $\times 10$

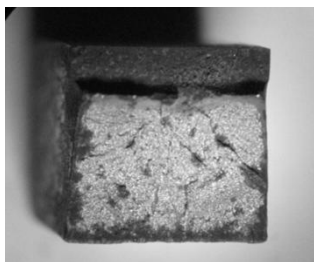


Рисунок 2 – Характер излома образца № 22,  $\times 20$

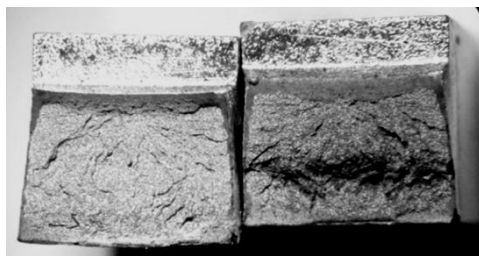


Рисунок 3 – Характер излома образца № 32,  $\times 10$

Для образцов, обработанных в соответствии с технологическим режимом № 3, характерно снижение ударной вязкости во всем исследуемом интервале температур на значение около 12 единиц. Падение значений ударной вязкости можно объяснить явлением «водородной хрупкости», вызванной несовершенством процесса электролитического цинкования. Обусловлено это тем, что при погружении в раствор электролита происходит наводороживание поверхности изделия, которое в свою очередь охрупчивает металл на глубину проникновения атомов водорода.

На основании фрактографического анализа изломов образцов, представленных на рисунках 1–3, доля вязкой составляющей в изломах всех образцов отличается на незначительную величину, не превышающую 5 %. Однако характер изломов образцов, которые были подвержены цинкованию (как термодиффузионному, так и гальваническому), отличается от образца, который был подвержен классическому отпуску. Исходя из этого, можно предположить, что наличие на образцах цинкового защитного слоя благоприятно сказывается на работе образования и развития трещины в теле образцов.

Таким образом, формирование цинковых интерметаллидных диффузионных слоев на образцах из стали 65Г не влияет на изменение ударной вязкости в температурном интервале испытаний от +20 до –40 °С. Значения ударной вязкости образцов, оцинкованных способом ТДЦ сопоставимы с данными ударной вязкости, характерными для образцов без защитного покрытия. Режим отпуска аналогичен режиму диффузионного цинкования (420 °С, 1 ч.). Для образцов, оцинкованных способом электролитического цинкования, наблюдали снижение значений ударной вязкости, что может быть обусловлено проявлением водородной хрупкости вследствие несовершенства процесса гальванического цинкования. Для ряда упругих элементов, изготавливаемых из стали 65Г, требующих антикоррозионной обработки, целесообразно произвести замену технологической операции «отпуск» процессом ТДЦ, позволяющим производить антикоррозионную обработку изделия и снятие закалочных напряжений в одну технологическую операцию.

## Список литературы

1. **Проскуркин, Е.В.** Защитные цинковые покрытия: сопоставительный анализ свойств, рациональные области применения / Е.В. Проскуркин // Оборудование. – 2005. – № 3. – С. 66–71.

2. **Understanding** corrosion via corrosion product characterization: I. Case study of the role of Mg alloying in Zn–Mg coating on steel /P. Volovitch [et al.] // Corrosion Science. – 2009. – Vol. 51. – P. 1251–1262.

3. **Some aspects** of sherardizing implementation during anticorrosive defence of heat-treated metal parts [Электронный ресурс] / V M Konstantinov, I A Buloichyk. 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.

4. **Константинов, В.М.** Разработка совмещенного процесса термической и антикоррозионной обработки стальных деталей автотехники / В.М. Константинов, П.С. Гурченко, И.А. Булойчик // Инновации в машиностроении-2014: материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Минск, 2014. – Том 3. – С. 384–387.

*УДК 621.791, 669.017*

**Б.М. НЕМЕНЁНОК**, д-р техн. наук,  
**И.В. РАФАЛЬСКИЙ**, канд. техн. наук,  
**П.Е. ЛУЩИК**, канд. техн. наук (БНТУ),  
**А.А. РАДЧЕНКО**, канд. техн. наук (НАН Беларуси)

## СОЕДИНЕНИЕ РАЗНОРОДНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИЯ И ТИТАНА: ОБЗОР СПОСОБОВ

**Введение.** Изделия и конструкции из разнородных материалов, прежде всего, легких сплавов, являются востребованной продукцией аврокосмической, автомобиле- и тракторостроительной, горнодобывающей, строительной, сельскохозяйственной, машиностроительной, химической, нефтедобывающей и других отраслей промышленности. Использование соединений разнородных легких сплавов, например, таких как алюминиевые, магниевые и титановые