



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ПІВНІЧНО-СХІДНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР
ТРАНСПОРТНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ**

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

Випуск 176

Харків 2018

УДК 656.2(062)

У Збірнику наукових праць УкрДУЗТ відображені матеріали та наукові розробки вчених і спеціалістів залізничного транспорту, наукових установ і промисловості з вирішення сучасних задач та проблем організації перевезень та управління на транспорті, рухомого складу і тяги поїздів, транспортного будівництва та залізничної колії, автоматики, телемеханіки та зв'язку.

Збірник наукових праць УкрДУЗТ призначений для інженерно-технічних працівників, магістрантів, студентів і науковців залізничного транспорту та промисловості.

З електронною версією збірника можна ознайомитися на сайті: http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus (Польща).

З реєстрацією збірника можна ознайомитися на сайті <http://jml2012.indexcopernicus.com>.

Google Scholar профіль: <https://scholar.google.com.ua>

Веб-сторінка збірника: <http://znp.kart.edu.ua>

Реферативна база

"Наукова періодика України": <http://csw.kart.edu.ua>

ISSN (p) 1994-7852

ISSN (online) 2413-3795

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 3 від 27 березня 2018 р.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що включаються до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 21.12.2015 р. №1328 (додаток 8)).

Редакційна колегія

Головний редактор – Вовк Руслан Володимирович, доктор фізико-математичних наук, професор, УкрДУЗТ

Залізничний транспорт (273)

Пузир В. Г., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Фомін О. В., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Путято А. В., д.т.н., доцент (БДУТ, Білорусь)
Горобченко О. М., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)
Дацун Ю. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Мартинов І. Е., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Vureika G., dsc, professor (VGTU, Литва)
Михалків С. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Ловська А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Транспортні технології (275)

Панченко С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Бутько Т. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Прохорченко А. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Шраменко Н. Ю. д.т.н., професор (ХНТУСГ)
Мороз М. М. д.т.н., професор (КНУ, м. Кременчук)
Кириллова О. В., д.т.н., доцент (ОНМУ, м. Одеса)
Бабаєв М. М., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Даренський О. М., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Лаврухін О. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Ходаківський О. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Будівництво та цивільна інженерія (192)

Бліхарський З. Я., д.т.н., проф. (НУ Львівська політехніка)
Ватуля Г. Л., д.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Лобяк О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Орел Є. Ф., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Плугін А. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Плугін Д. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Пушкарьова Е. Г., д.т.н., професор (КНУБА)
Толмачов С. М., д.т.н., професор (ХНАДУ)
Трикоз Л. В., д.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Шабанова Г. Н., д.т.н., професор (НТУ ХП)
Шмуклер В. С., д.т.н., професор (ХНУМГ)
Fisher Hans-Bertram., dr. ind., professur (Bauhaus-Universität Weimar F.A., Німеччина)
Опанасенко О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

Механічна інженерія (131, 132, 133)

Астанін В. В., д.т.н., професор (НАУ м. Київ)
Воронін С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Геворкян Е. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Ковальова І. М., к.т.н., доцент (НАНБ, Білорусь)
Онопрейчук Д. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Стефанов В. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Тимофеев С. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Тимофеева Л. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Федориненко Д. Ю., д.т.н., професор (ЧНТУ, м. Чернігів)

Теплоенергетика (144)

Каграманян А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Мороз В. І., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Фалендиш А. П., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)
Грицук І. В., д.т.н., доцент (ХМДА, м. Херсон)
Сотник М. І., д.т.н., доцент (СДУ, м. Суми)
Дешко В. І., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)
Володарець М. В., к.т.н., старш. викл. (УкрДУЗТ)
Бабіченко Ю. А., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)
Pavlenko A., dsc. tech., profesor (KUT, Poland)
Bartoszewicz J., dsc. tech., profesor (PUT, Poland)
Tomaszewski F., phd, profesor (PUT, Poland)

ЗМІСТ

Будівництво та цивільна інженерія (192)

- Бондар В. О., Ахмеднабієв Р. М., Ахмеднабієв Р. Р.* Вплив золошлаків котлів із циркуляційним киплячим шаром на морозостійкість важких бетонів 6
- Расповов Е. А.* Анализ прочности клееных стержней, установленных в ЛВЛ брус с учетом прочности при скалывании 14

Залізничний транспорт (273)

- Тіщенко В. С., Громов В. І., Одегов М. М.* Розрахунково-експериментальне визначення ймовірностей появи різних за величиною зносів тягових зубчатих передач електропоїздів 23

Механічна інженерія (13, 132, 133)

- Охріменко О. А., Мініцький А. В., Сисосєв О. М., Мініцька Н. В.* Поверхневе зміцнення порошкових залізовуглецевих сплавів 30

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)

УДК 666.946

ВПЛИВ ЗОЛОШЛАКІВ КОТЛІВ ІЗ ЦИРКУЛЯЦІЙНИМ КИПЛЯЧИМ ШАРОМ НА МОРОЗОСТІЙКІСТЬ ВАЖКИХ БЕТОНІВ

Д-р техн. наук В. О. Бондар, канд. техн. наук Р. М. Ахмеднабієв, асп. Р. Р. Ахмеднабієв

ВЛИЯНИЕ ЗОЛОШЛАКОВ КОТЛОВ С ЦИРКУЛЯЦИОННЫМ КИПЯЩИМ СЛОЕМ НА МОРОЗОСТОЙКОСТЬ ТЯЖЕЛЫХ БЕТОНОВ

Д-р техн. наук В. А. Бондарь, канд. техн. наук Р. М. Ахмеднабиев, асп. Р. Р. Ахмеднабиев

INFLUENCE OF SLAGS OF BOILERS WITH CIRCULATING FLUIDIZED BED ON FROST RESISTANCE OF CONCRETE

Dr. sc. sciences V. O. Bondar, phd. tehn. R. M. Akhmednabiev, sciences, pg. R. R. Akhmednabiev

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.176.2018.131167>

Наведено результати дослідження впливу золошлаків котлів із циркуляційним киплячим шаром на морозостійкість важких бетонів. У дослідженнях використано портландцемент ПЦ І-500Н; пісок з модулем крупності $M_{кр}=1,05$; щебінь гранітний фракції 5–10 мм; золошлаки котлів із циркуляційним киплячим шаром; гіперпластифікатор «Fluid Premia-196». Дослідження проведено з використанням математичного планування експерименту. Доведено, що із заміщенням піску золошлаками морозостійкість децю знижується, але гіперпластифікатор сприяє компенсації зниження морозостійкості за рахунок зниження В/Ц відношення, як наслідок — утворення супердрібної порової структури бетону. Відомо, що тонкі пори у структурі бетону компенсують напруження від процесу утворення льоду при низьких температурах навколишнього середовища. Встановлено оптимальну витрату цементу з точки зору морозостійкості як при повній, так і при частковій заміні піску золошлаками. Визначено також, що оптимальними слід уважати витрати гіперпластифікатора кількістю 1,2–1,4 % від маси цементу.

Ключові слова: золошлаки, киплячий шар, морозостійкість, математичне планування.

Приведены результаты исследования влияния золошлаков котлов с циркуляционным кипящим слоем на морозостойкость тяжелых бетонов. В исследованиях использованы портландцемент ПЦ I-500Н; песок с модулем крупности $M_{кр} = 1,05$; щебень гранитный фракции 5–10 мм; золошлаки котлов с циркуляционным кипящим слоем; гиперпластификатор «Fluid Premia-196». Исследование проведено с использованием математического планирования эксперимента. Доказано, что с замещением песка золошлаками морозостойкость несколько снижается, но гиперпластификатор способствует компенсации снижения морозостойкости за счет снижения В/Ц отношения, как следствие — образование супермелкой поровой структуры бетона. Известно, что тонкие поры в структуре бетона компенсируют напряжения от процесса образования льда при низких температурах окружающей среды. Установлено оптимальный расход цемента с

точки зрення морозостойкости как при полной, так и при частичной замене песка золошлаками. Определено также, что оптимальным следует считать расход гиперпластификатора в количестве 1,2—1,4 % от массы цемента.

Ключевые слова: золошлаки, кипящий слой, морозостойкость, математическое планирование.

The results of the study of the influence of slags of boilers with a circulating fluidized bed on the frost resistance of heavy concrete are presented. In the studies was used following materials: Portland cement PC I-500N, sand with a grain size unit $M_{kr}=1,05$, crushed granite fraction 5-10 mm, ashes of boilers with circulating fluidized bed, hyperplasticizer "Fluid Premia-196". The research is conducted using mathematical planning of the experiment.

It is proved that with the replacement of sand with ashes, frost resistance is somewhat reduced, but the hyperplasticizer contributes to the reduction of frost resistance by reducing the W/C ratio, resulting in the formation of super-fine pore structure of concrete. Fine pores in the structure of concrete compensate for stress from the process of ice formation at low ambient temperatures.

The optimal flow of cement has been established in terms of frost resistance, both by full and partial replacement of sand with ash. It was also determined that the optimum should be considered the consumption of a hyperplasticizer in the amount of 1.2-1.4% of the mass of cement.

The introduction of ashes in a concrete mixture leads to a decrease in the frost resistance of concrete. This phenomenon is explained by the fact that the slags have water consumption in three times higher than the amount of sand they replace, therefore they contribute to an increase in the W/C ratio. With the increase in W/C increases both the total volume of open pores, and their average size. At the same time, permeability and water absorption increase and in such concrete less reserve pores are formed. In order to increase the frost resistance of concrete, it is customary to restrict W/C depending on the conditions of concrete service. Reducing W/C is possible, as at the expense of reducing water consumption due to the application of plasticizers additives, and by increasing the cost of cement.

Keywords: ash and slag, fluidized bed, frost resistance, mathematical planning.

Вступ. Руйнування бетону в насиченому водою стані при циклічній дії позитивних і негативних температур, а також змінних негативних температур обумовлено комплексом фізичних корозійних процесів, що викликають деформації і механічні пошкодження виробів та конструкцій.

Відомо, що морозостійкість бетону залежить від його будови, особливо від характеру пористості, оскільки останній буде визначати об'єм та розповсюдження льоду, що утвориться у тілі бетону при низьких температурах.

Уведення золошлаків у склад бетонів сприяє збільшенню пористості розчинної частини бетону, що у свою чергу може призвести до зниження морозостійкості.

Але на територіях ТЕС накопичено понад 42 млн т зол та золошлаків, які негативно впливають на навколишнє середовище. Тому актуальність їх використання у бетонах не викликає сумнівів. Деякі ТЕС в Україні використовують нові сучасні котли з циркуляційним киплячим шаром, у яких вугілля спалюється довше, тому золи та золошлаки таких котлів відрізняються від звичайних за структурою частинок та хімічним складом. Вплив таких золошлаків на властивості бетонів досліджено недостатньо.

Раніше нами було досліджено вплив золошлаків котлів із циркуляційним киплячим шаром на міцність важких бетонів [9]. У цій статті наведено результати впливу золошлаків на морозостійкість важких бетонів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У мікропорах бетону розмірами 10^{-5} см зазвичай міститься зв'язана вода, що не переходить у лід навіть при занадто низьких температурах (до -70 °С), тому мікропори не мають значного впливу на морозостійкість бетону [1]. Остання залежить від макропор у бетоні й від їх будови.

Ряд лабораторних досліджень показав, що бетон, який містить золу-винесення та золошлаки, може бути менш морозостійким при заморожуванні і відтаванні [2–4], а більш низьку морозостійкість мають бетони з низьким вмістом цементу або бетони з високим вмістом цементу, але частину цементу у ньому замінено золою-винесення або золошлаками [5, 6].

Бетони із золою-винесення можуть забезпечити задовільну морозостійкість за умови, що використовується водонепроникний цемент і В / Ц не перевищує 0,45, а вміст золи-винесення не перевищує 20–30 %. При цьому, звичайно, передбачається, що бетон має адекватну порову структуру [7].

Ступінь впливу зол та золошлаків на властивості бетону залежить не тільки від їх кількості в суміші, але й від інших параметрів, включаючи склад і пропорції інших інгредієнтів у бетонній суміші, тип і розмір конкретного компонента, умови ущільнення під час укладання та умови твердіння [8, 9].

Визначення мети та завдання дослідження. Дослідження впливу золошлаків котлів із циркуляційним киплячим шаром на морозостійкість важких бетонів.

Матеріали та методика досліджень.

У роботі використані такі матеріали: портландцемент ПЦ І-500Н виробництва «Haldeberg zement Україна»; пісок із модулем крупності $M_{кр} = 1,05$ місцевого родовища; золошлаки котлів із циркуляційним киплячим шаром [9]; гіперпластифікатор на основі модифікованих полікарбоксилатів «Fluid Premia-196»; щебінь гранітний фракції 5–10 мм Кременчуцького родовища. Для більш досконалого виявлення впливу золошлаків та гіперпластифікатора на морозостійкість бетонів було реалізовано трирівневу матрицю планування експерименту.

Основна частина дослідження.

Морозостійкість визначали прискореним методом. У ДСТУ Б В. 2.7-47-96 встановлено декілька методів визначення морозостійкості бетонів, у тому числі й два прискорених методи. Використано дилатометричний метод визначення морозостійкості шляхом заморожування бетону у середовищі гасу. За цією методикою морозостійкість визначається за максимальною різницею об'ємних деформацій бетонного та стандартного зразків. Стандартний зразок – алюмінієвий кубик зі стороною 100 мм. Вимірювання об'ємних деформацій провадили за допомогою дилатометра «Бетон-Фрост» (рис. 1).

При плануванні експерименту за вхідними параметрами було прийнято: X_1 – витрати цементу; X_2 – витрати гіперпластифікатора; X_3 – ступінь заміщення піску золошлаками. Умови планування експерименту наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Умови планування експерименту

Змінні фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
Натуральний вигляд	Кодований вигляд	-1	0	+1	
Витрата цементу, кг	X_1	400	500	600	100
Вміст добавки, %	X_2	0,8	1,4	2,0	0,6
Заміщення піску П – ЗШ	X_3	1	0	-1	0,5



Рис. 1. Зовнішній вигляд дилатометра з електронним блоком вимірювання

Зразки бетонів було виготовлено згідно з матрицею математичного планування експерименту. Для кожної серії було виготовлено по три зразки кубика з розміром ребра 100 мм. У марочному віці зразки піддавалися насиченню водою за такою методикою: першу добу занурені у воду на 1/3 висоти, другу добу – на 2/3 висоти, третю добу повністю занурені у воду, і товща води над зразком була 5 см. За три доби насичення водою для кожного зразка визначали точний об’єм методом зважування у воді. Всі три зразки кожної серії випробовувалися на морозостійкість. Зразки укладалися у вимірювальну камеру пристрою, камера заповнювалася гасом і герметично закривалася, після чого пристрій укладався у камеру клімату «Feutron». До пристрою підключали електронний блок через кабелі. Заморожування пристрою із зразками продовжувалося 4,5 години. За цей час

електронний блок записував змінення деформації зразка. Для всіх зразків було визначено максимально відносно збільшення різниці об’ємних деформацій θ за формулою

$$\theta = \frac{\Delta V_i}{V_o},$$

де ΔV_i – максимальна різниця значень деформацій бетонного та стандартного зразків при заморожуванні;

V_o – початковий об’єм зразка, см^3 .

За цією різницею, використовуючи таблицю ДСТУ Б В. 2.7-47-96, було визначено морозостійкість бетону.

Результати досліджень бетонів, що виготовлені за матрицею планування експерименту, наведено у табл. 2.

За результатами обробки експериментальних даних було отримано рівняння регресії

$$Y = 448.35 + 111.5X_1 + 42.8X_2 - 84.88X_3 - 6.68X_1^2 - 8.18X_2^2 - 43.2X_3^2 + 6.63X_1X_2 - 33.38X_2X_3.$$

Члени рівняння регресії свідчать про те, що вміст золошлаків має негативний вплив на морозостійкість бетонів, а витрати цементу та пластифікатора – позитивний.

Розв’язання рівняння регресії дає можливість для побудови поверхні впливу вхідних параметрів планування експерименту на морозостійкість бетонів, які наведені на рис. 2–4.

Результати випробування бетонів на морозостійкість

№	Змінні параметри			Морозостійкість		
	x_1	x_2	x_3	$\theta = \frac{\Delta V_i}{V_0}$	Кількість циклів	Відповідна марка, F
	2	3	4	5	6	7
1	600	2	зола	0,304	480	400
2	400	2	зола	0,783	238	200
3	600	0,8	зола	0,548	332	300
4	400	0,8	зола	1,77	105	100
5	600	2	пісок	0,147	633	600
6	400	2	пісок	0,586	380	300
7	600	0,8	пісок	0,184	580	500
8	400	0,8	пісок	0,538	365	300
9	600	1,4	0,5+0,5	0,154	538	500
10	400	1,4	0,5+0,5	0,522	360	300
11	500	2	0,5+0,5	0,313	487	400
12	500	0,8	0,5+0,5	0,319	408	400
13	500	1,4	зола	0,362	390	300
14	500	1,4	пісок	0,298	435	400
15	500	1,4	0,5+0,5	0,299	424	400
16	500	1,4	0,5+0,5	0,309	416	400
17	500	1,4	0,5+0,5	0,247	464	400

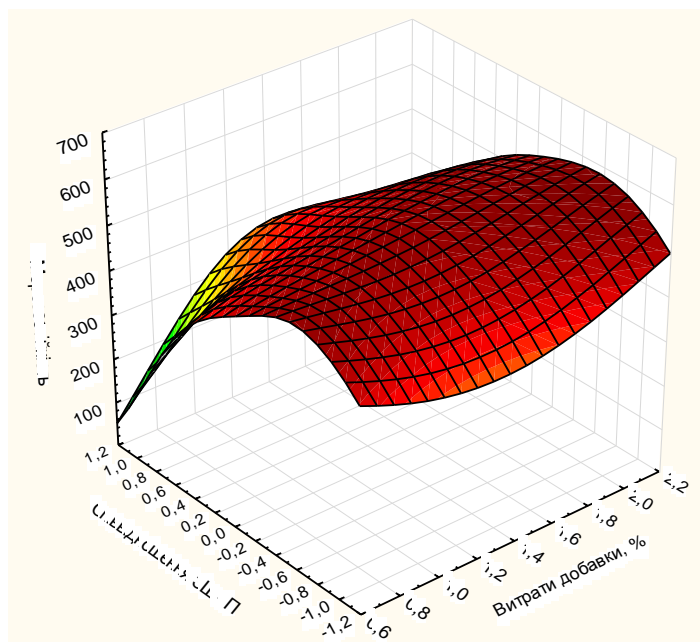


Рис. 2. Поверхня впливу витрат гіперпластифікатора та ступінь заміщення піску золошлаками на морозостійкість бетону

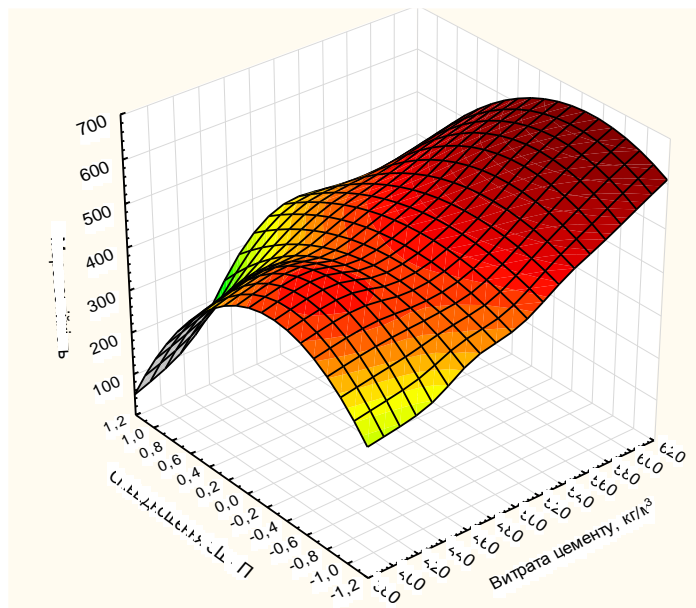


Рис. 3. Поверхня впливу на морозостійкість бетону витрат цементу та співвідношення П-ЗШ

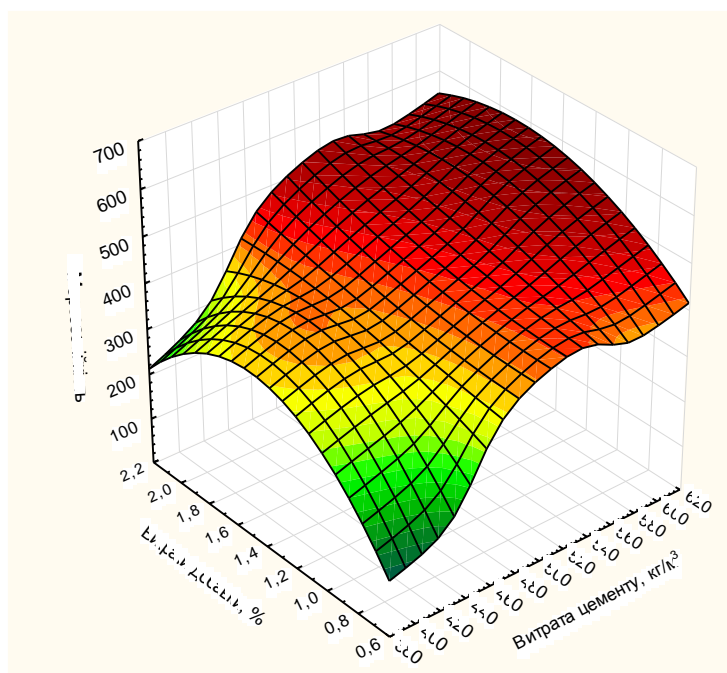


Рис. 4. Поверхня впливу на морозостійкість витрат цементу та добавки

Аналіз сумісного впливу ступеня заміщення піску золошлаками та витрат гіперпластифікатора на морозостійкість бетону показує, що з підвищенням кількості золошлаків у бетоні спочатку морозостійкість бетонів зростає незначно,

але при подальшому збільшенні морозостійкість починає поступово знижуватись. Максимум підвищення морозостійкості спостерігається при заміщенні половини піску золошлаками, тобто П-ЗШ = 0,5. При максимальному заміщенні піску

золошлаками морозостійкість знижується від F400 до F100 циклів.

Аналіз поверхні впливу на морозостійкість витрат цементу та ступінь заміщення піску золошлаками показує, що збільшення морозостійкості бетонів зі збільшенням витрат цементу практично пропорційно. Цей факт не викликає сумнівів, але відомо, що основним компонентом бетону, що сприяє підвищенню морозостійкості, є цемент.

Із збільшенням золошлаків у складі бетону морозостійкість має тенденцію до зниження. Але на поверхні впливу спостерігається максимум при значенні ЗШ-П = 0,5, тобто золошлаки заміщують пісок тільки наполовину. При зниженні заміщення піску ЗШ у бетонній суміші спостерігався процес седиментації за рахунок збільшення рухливості бетонної суміші. А при збільшенні заміщення морозостійкість також має тенденцію до зниження, тому що ЗШ сприяють збільшенню пористості бетону, а, як відомо, морозостійкість бетону залежить від пористості та характеру пор. Очевидно, що пори у бетоні, які утворюються за рахунок уведення пористих золошлаків, більші, ніж гелеві пори цементного каменю. Як було роз'яснено вище, гелеві пори цементного каменю сприяють збільшенню морозостійкості бетонів, виконуючи роль компенсаторів при переході води у лід.

На графіках спостерігаємо, що зі збільшенням вмісту цементу у бетоні, як і слід було очікувати, морозостійкість збільшується, але не пропорційно. Максимальне значення морозостійкості спостерігається при витратах цементу 460–500 кг/м³, при витратах пластифікатора 1,2–1,4 % від маси цементу. Таким чином, оптимальними слід уважати витрати цементу 460–500 кг/м³, а пластифікатора – 1,0–1,4 % від маси цементу.

Висновки. Аналізуючи дані, одержані в результаті проведених досліджень, можемо зробити такий висновок:

1. Дослідження підтверджують, що найбільший вплив на морозостійкість бетону має витрата цементу (за рахунок зниження В/Ц). При максимальній витраті цементу та мінімальному заміщенні піску золошлаками марка бетону за морозостійкістю становить F600, при повному заміщенні піску золошлаками морозостійкість знижується до F400. При мінімальній витраті цементу марка за морозостійкістю знижується від F300 до F200.

2. Уведення золошлаків у бетонну суміш призводить до зниження морозостійкості бетонів. Так, при максимальному заміщенні піску золошлаками морозостійкість знижується на одну та дві марки при різних значеннях витрат цементу.

3. При заміщенні піску золошлаками на 50 % морозостійкість бетонів знижується на одну марку при різних витратах цементу.

Список використаних джерел

1. Баженов, Ю. М. Технология бетона [Текст] : учеб. пособие для вузов / Ю. М. Баженов. – М. : ВШ, 1987. – 414 с.
2. Timms, A. G. Use of fly ash in concrete [Text] / A. G. Timms, W. E. Grieb // Proceedings of ASTM. – Vol. 56, 1956. – P. 1139–1160.
3. Gebler, S. H. Effect of Fly Ash on the Durability of Air-Entrained Concrete [Text] / S. H. Gebler and P. Klieger // Proceedings of the 2nd International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, ACI SP. Vol. 1. American Concrete Institute. – Farmington Hills; MI, 1986. – P. 483–519.

4. Johnston, C. D. Effects of Microsilica and Class C Fly Ash on Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing and Scaling in the Presence of Deicing Agents [Text] / C. D. Johnston // Concrete Durability, ACI SP-100, Vol. 2, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1987. – P. 1183–1204.

5. Johnston, C. D. W/CM Code Requirements Inappropriate for Resistance to Deicer Salt Scaling [Text] / C. D. Johnston // Proceedings of the 3rd International Conference on the Durability of Concrete, ACI SP-145, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1994. – P. 85–105.

6. Whiting, D. Strength and Durability of Residential Concretes Controlling Fly Ash [Text] / D. Whiting // RD099, Portland Cement Association. – Skokie: IL, 1989. – 48 p.

7. Afrani, I. The Effects of Different Cementing Materials and Curing on Concrete Scaling [Text] / I. Afrani, C. Rogers // Cement, Concrete, and Aggregates, Vol. 16 (2), 1994. – P. 132–139.

8. Malhotra, V. M. High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete [Text] / V. M. Malhotra, P. K. Mehta // Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., Ottawa, Canada, 2005. – 124 p.

9. Bondar, V. A. Influence of fly ash and slags of boiler with circulating fluidized bed on properties of concrete [Text] / V. A. Bondar, R. R. Akhmednabiev, R. M. Akhmednabiev // 36. наук. праць. Сер. Галузеве машинобудування, будівництво. – Полтава: ПолтНТУ, 2016. – Вип. 2 (47). – С. 148–154

Бондар Віктор Олександрович, д-р техн. наук, професор кафедри технології будівельних конструкцій, виробів і матеріалів Полтавського технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел. (066) 2576802.

Ахмеднабієв Расул Магомедович, канд. техн. наук, доцент кафедри технології будівельних конструкцій, виробів і матеріалів Полтавського технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел. (067)532-36-40. E-mail: akhmednabiev4@gmail.com.

Ахмеднабієв Расул Расулович, аспірант кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів Полтавського технічного університету імені Юрія Кондратюка. Тел. (050) 999-59-67. E-mail: bimconstructio@gmail.com.

Бондарь Виктор Александрович, д-р техн. наук, профессор кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов Полтавского технического университета имени Юрия Кондратюка. Тел. (066) 2576802.

Ахмеднабиев Расул Магомедович, канд. техн. наук, доцент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов Полтавского технического университета имени Юрия Кондратюка. Тел. (067) 532-36-40. E-mail: akhmednabiev4@gmail.com.

Ахмеднабиев Расул Расулович, аспирант кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов Полтавского технического университета имени Юрия Кондратюка. Тел. (050) 999-59-67. E-mail: bimconstructio@gmail.com.

Bondar Viktor, Dr. sc. Sciences Professor, Department of building constructions, Products and Materials of Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. Tel. (066) 2576802.

Akhmednabiyev Rasul, PhD. Sc. Associate Professor, Department of building constructions, Products and Materials of Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. Tel. (067)532-36-40. E-mail: akhmednabiev4@gmail.com.

Akhmednabiyev Rasul, post-graduate student, Department of building constructions, Products and Materials of Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. Tel. (050) 999-59-67. E-mail: bimconstructio@gmail.com.

Статтю прийнято 17.03.2018 р.

УДК 694.14

АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ ВКЛЕЕННЫХ СТЕРЖНЕЙ, УСТАНОВЛЕННЫХ В ЛВЛ БРУС С УЧЕТОМ ПРОЧНОСТИ ПРИ СКАЛЫВАНИИ

Асп. Е. А. Распопов

АНАЛІЗ МІЦНОСТІ ВКЛЕЄНИХ СТЕРЖНІВ, УСТАНОВЛЕНИХ У ЛВЛ БРУС З УРАХУВАННЯМ МІЦНОСТІ ПРИ СКОЛЮВАННІ

Асп. Є. А. Распопов

ANALYSE OF STRENGTH GLUED-IN STEEL RODS INSTALLED IN LVL BY TAKING INTO ACCOUNT STRENGTH BY SHERE

PhD-student I. A. Raspopov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.176.2018.131193>

Вклеенные стержни как эффективный метод выполнения жестких стыков деревянных конструкций используются в соединениях элементов из новых древесных материалов, в том числе на основе шпона. Шпоновый брус ЛВЛ имеет высокие показатели прочности и требует особого подхода при оценке методов расчета и проектирования известных методов выполнения узловых соединений, в том числе соединений на клееных стержнях. Выполненный в данной статье анализ прочности клееных стержней рассматривается с учетом прочности ЛВЛ бруса при скалывании, как основного критерия разрушения данного типа соединений. Также при определении прочности ЛВЛ при скалывании вдоль волокон рассматривались различные типы и размеры образцов с целью выявления образца, наиболее точно показывающего прочность ЛВЛ для данного вида соединения.

Сравнение результатов испытаний данного вида соединений в ЛВЛ брус представляется важным и необходимым при оценке не только прочности соединения, но и для выполнения проектных винтовых усилений для достижения вязкого разрушения. Слоистая шпоновая структура ЛВЛ бруса с однонаправленным расположением шпона отражается на характере разрушения образцов, отличающегося от результатов разрушения клееных стержней в клееной древесине. Характерным для ЛВЛ бруса стало разрушение по древесине с овализацией вокруг стержня.

Проведенный сравнительный анализ экспериментальных величин скалывания полученных при испытании образцов и соединений является приближенным. При разрушении образцов ЛВЛ бруса рассматривается плоское напряженное состояние, которому соответствует разрушение практически по ровной линии вдоль волокон исследуемого образца. Однако при разрушении клееных стержней напряженное состояние древесины локализуется вокруг стержня и имеет замкнутую криволинейную траекторию разрушения, как правило, конической формы по длине стержня.

Ключевые слова: клееный шпоновый брус (ЛВЛ), клееные стержни, осевое выдергивание, Ultralam – R, усиление винтами.

Вклеєні стержні як ефективний засіб для виконання жорстких стиків дерев'яних конструкцій використовуються у з'єднаннях елементів з нових матеріалів на основі деревини, в тому числі на основі шпону. Шпоновий брус ЛВЛ має високі показники міцності і

потребує особливого підходу при оцінці сучасних методів розрахунку і проектування відомих методів виконання вузлових з'єднань, у тому числі з'єднань на клеєних стержнях. Виконаний у даній статті аналіз міцності клеєних стержнів розглядається з урахуванням міцності ЛВЛ бруса при сколюванні вздовж волокон, як основного критерію руйнування цього типу з'єднань. Також при визначенні міцності ЛВЛ на сколювання вздовж волокон розглядалися різні типи та розміри зразків з метою виявлення зразка, що найбільш точно показує міцність ЛВЛ для даного виду з'єднання.

Порівняння результатів випробувань даного виду з'єднань у ЛВЛ брусі є важливим і необхідним при оцінці не тільки міцності з'єднання, але і для виконання проектних гвинтових підсилень для досягнення в'язкого руйнування. Шарувата шпонова структура ЛВЛ бруса з односпрямованим розташуванням шпону відображається на характері руйнування зразків і відрізняється від результатів руйнування клеєних стержнів у клеєній деревині. Характерним для ЛВЛ бруса стало руйнування по деревині з овалізацією навколо стержня.

Проведений порівняльний аналіз експериментальних величин сколювання вздовж волокон отриманих при випробуванні зразків і з'єднань є наближеним. При руйнуванні зразків ЛВЛ бруса розглядається плоский напружений стан, якому відповідає руйнування практично по рівній лінії уздовж волокон досліджуваного зразка. Однак при руйнуванні клеєних стержнів напружений стан деревини локалізується навколо стержня і має замкнуту криволінійну траєкторію руйнування, як правило, конічної форми по довжині стержня.

Ключові слова: клеєний шпоновий брус (ЛВЛ), клеєні стержні, осьове висмикування, Ultralam – R, підсилення гвинтами.

The glued-in steel rods as an effective method for performing rigid joints of timber structures are used in joints of elements from new wood based materials, including veneer based. The LVL elements has high strength characteristics and requires a special approach when evaluating methods for calculating and designing known methods for making nodal connections, including joints on glued rods. The analysis of the strength of pasted rods performed in this article is considered taking into account the strength of the beam of lamellar timber during shearing as the main criterion for the destruction of this type of joint. Also, in determining strength of LVL for shearing along the fibers, various types and sizes of the samples were considered with aim of identify the sample most accurately showing the strength of LVL for this type of joint.

Comparison of the test results of this type of joints in the LVL beam is important and necessary in assessing not only the strength of the joint, but also for the implementation of design screw reinforcements to achieve ductile failure mode. The laminated veneer structure of LVL with a unidirectional arrangement of veneers reflects the nature of the destruction of the specimens, which differs from the results of the destruction of glued-in steel rods in the glued laminated timber. Characteristic for LVL timber was the destruction of the wood with ovalization around the rod.

The comparative analysis of the experimental values of the specimens and joints obtained during testing is approximate. When the LVL specimens are destroyed, a plane stress state is considered, which corresponds to fracture along an even line along the grains of the test sample. However, when the pasted strings are broken, the stress state of the wood is localized around the rod and has a closed curvilinear trajectory of fracture, usually conical in shape along the length of the rod.

Keywords: Laminated veneer lumber (LVL), glued-in steel rods, pull-pull tests, Ultralam type R, screws reinforcement.

Введение. Шпоновый брус LVL (Laminated Veneer Lumber, далее – ЛВЛ) производится как с однонаправленным, так и со взаимно перпендикулярным расположением шпона в смежных слоях. Чередувание поперечных слоев шпона может выполняться через один или несколько продольных слоев шпона. Наиболее известна на европейском рынке продукция производителя ЛВЛ торговой марки Kerto, которая довольно широко исследована и имеет несколько другие прочностные и упругие характеристики, чем ЛВЛ марки Ultralam (Россия, г. Торжок), поскольку использована древесина северных регионов России. Около 7 лет назад был разработан новый вид ЛВЛ бруса на основе шпона бука, который имеет показатели прочности и жесткости, намного превышающие показатели ЛВЛ из шпона древесины хвойных пород.

Анализ последних исследований и публикаций. Применение клеенных стержней в соединениях деревянных конструкций в странах Европы, таких как Германия, Австрия и Швейцария, имеет положительный опыт, и указания относительно их расчета и установки содержатся в национальных нормативных документах по проектированию деревянных конструкций. В Еврокоде-5 (EN 1995-1-1) отсутствует данный вид соединения, поскольку сложно выполнить проверку качества клейки стержней. Однако проект второй части Еврокода-5 (EN 1995-2) по проектированию деревянных мостов [1] в приложении С содержит ряд положений по выполнению соединений на клеенных стальных стержнях. Также выполнение данного типа соединения конструкций требует больших трудозатрат и имеет более высокую стоимость, чем установка винтов различных типов. Также сложность контроля качества клейки стержней затрудняет их частое применение зарубежными коллегами. Автором данного типа соединений среди коллег из

Европейских стран принято считать Н. Riberholt [2], поскольку первая работа проф. С. Б. Турковского [3] на английском языке была опубликована на год позже. В отечественных публикациях соединения на клеенных стержнях предложены в середине 80-х годов. Уже в 1986 году подобные решения были осуществлены на электрофизическом комплексе ГИИТ-12-30, эксплуатируемые на открытом воздухе. За последние 10 лет были предприняты существенные попытки систематизации и анализа различных методов установки и расчета клеенных стержней различными странами (см. технический отчет Mislav Stepinac [4], выполненный в рамках комитета COST Action FP1004 “Enhancement mechanical properties of timber, engineered wood products and timber structures” и работы Broughton J. G. [5, 6]). Также в протоколах комитета COST Action FP1402 проводится работа в направлении систематизации и регулирования технологических параметров установки клеенных стержней. В проекте новой редакции Еврокода-5, которая выйдет в 2022 году, планируется интегрирование основных положений по расчету клеенных стержней для различных материалов на основе древесины, включая ЛВЛ брус различных типов.

Определение цели и задачи исследования. Целью работы является анализ экспериментальных данных, полученных при испытании клеенных стержней с характерным разрушением скалывания древесины вокруг клееного стержня вдоль волокон с результатами испытаний образцов на скалывание.

Задачей исследования является определение несущей способности клеенных стержней вдоль волокон в ЛВЛ и анализ характера разрушения для корректировки существующей методики расчета данного вида соединений, применяемого в соединениях элементов из клееной древесины.

Основная часть исследований.

Статические испытания на выдергивание клеенных стержней выполнялись из образцов ЛВЛ с однонаправленным шпоном марки Ultralam типа R. Поперечное сечение стержней ЛВЛ элементов составляла 75*75 мм, а длина – 500 мм. Глубина клейки стержней была принята 180 мм с величиной отверстия 18 мм. Диаметр одиночных клеенных стержней был принят 14 мм, а диаметр стержней, установленных по 2 в каждом торце, был принят 16 мм. Выдергивание стержней выполнялось путем нагружения элемента с двусторонними клеенными стержнями на равную глубину клейки (рис. 1). Класс прочности стали стальных шпилек – 5.8. Зарубежные коллеги используют класс

прочности стали клеенных шпилек, как правило, 8.8 или 10.9. Для клейки стержней использовался двухкомпонентный эпоксидный клей на базе смолы ЭД-20. Испытания клеенных стержней были выполнены в 2015–2016 годах, как части комплексных исследований ЛВЛ типа R на статические нагружения для определения прочностных и упругих характеристик при сжатии под различными углами. Кроме этого, выполнены испытания балок с соединением на клеенных стержнях, а также образцов на выдергивание клеенных стержней и образцов на скалывание, изложенные в данной статье для проведения анализа прочности стержней, большинство которых разрушалось по скалыванию.

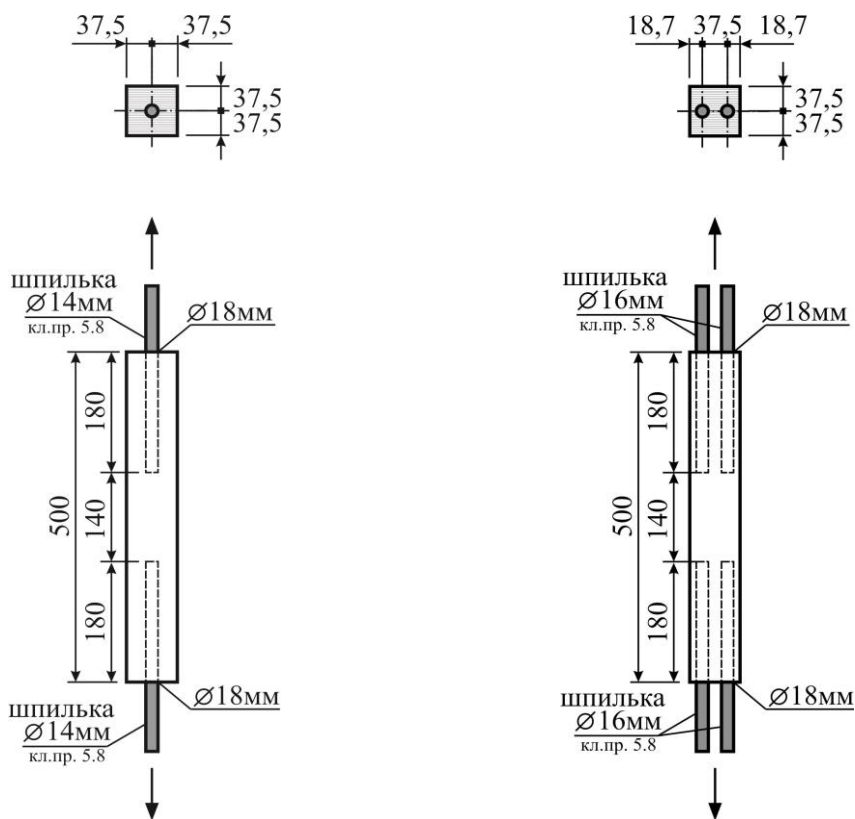


Рис. 1. Схема проведения испытания и геометрические параметры образцов

Для стержней, нагруженных вдоль оси, принятые расстояния между стержнями и от центра стержня к боковым граням элемента в поперечном сечении

меньше величин, рекомендуемых для вклеивания стержней в цельную или клееную древесину, согласно технических заключений и нормативных документов различных

стран, которые содержат соответствующие указания (табл. 1): СП 64.13330.2017 (Россия), DIN 1052:2008-12 (Германия),

В 1995-1-1 (Австрия), (Швейцария).

SIA 265:2012

Таблица 1

Минимальные расстояния между осями вклеенных стержней и от осей к граням поперечного сечения элементов деревянных конструкций, согласно различных стандартов

Нормативы, технические заключения и публикации	Расстояние между осями стержней	Расстояние от оси стержня к грани
DIN EN 1995-1-1 [7]	5d	2,5d
В 1995-1-1 [8]	5d	2,5d
Z-9.1-791 [9]	3,5d	1,75d
Z-9.1-791 [10]	3,75d	1,875d
СП 64.13330.2017 [11]	3d	2d
New Zealand	2d	1,5d (не для скалывания) 2,5d
Riberholt	1,5d	2d
Steiger et al.	4d	2,3d

Также, в рамках испытаний по определению прочности соединений ЛВЛ на вклеенных стержнях, проводились испытания на скалывание образцов трех типов (рис. 2) толщиной 75 мм торговой

марки Ultralam тип R с однонаправленным расположением шпона древесины хвойных пород. Основные статистические параметры результатов испытаний трех серий образцов показаны в табл. 2.

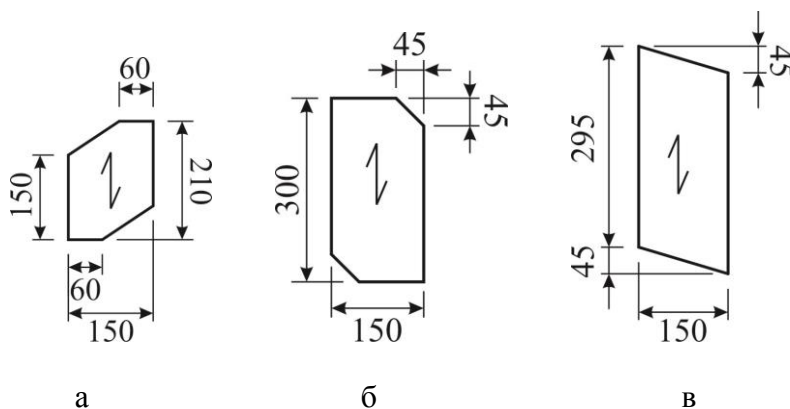


Рис. 2. Виды и размеры образцов, использованных при испытаниях: а – тип А; б – тип Б; в – тип В; г – образцы после разрушения

Нагружение образцов выполнялось согласно требованиям стандарта EN 408:2010, и период нагружения состав-

лял интервал времени 300 ± 120 секунд до разрушения образца.

Обсуждение результатов. Схема разрушения образцов имеет типичный хрупкий характер, сопровождающийся выдергиванием стержня с частью

древесины (рис. 3) и раскалыванием торцов элементов древесины, в которые вклеены стальные стержни.

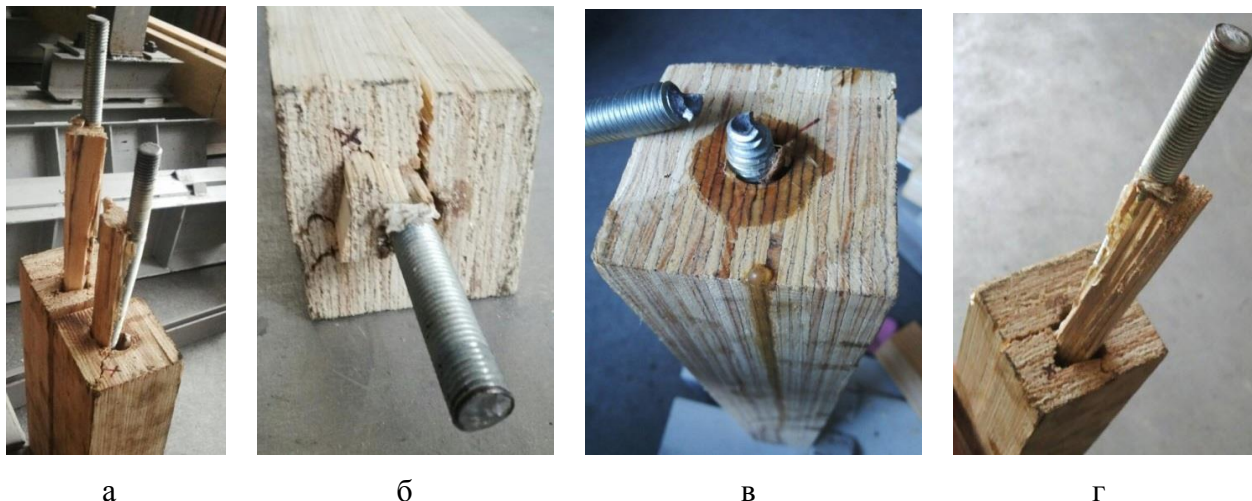


Рис. 3. Схема разрушения образцов

Результат разрушения соединения с разрывом стального стержня (рис. 3, в) еще раз доказывает эффективность вклеенных стержней как метода выполнения жестких стыков элементов не только из клееной древесины, но и элементов из ЛВЛ.

Прочность древесины и древесных материалов при скалывании или сдвиге является важной прочностной характеристикой как для изгибаемых элементов при оценке прочности в опорных зонах балок, так и при анализе прочности различных видов соединений. Методы испытания по грани плитных древесных материалов, к которым относится шпоновый брус ЛВЛ, выполняются, как и для цельной древесины, согласно EN 408 [12] (рис. 4, а), а по пласти – согласно EN 789 [13] (см. рис. 4, б). Данное разделение методов испытаний указано в стандарте EN 14374 [14], который устанавливает методы определения прочностных и упругих характеристик ЛВЛ при различных видах напряженных состояний.

Схема испытаний на скалывание согласно EN 789, очевидно, является более

рациональной для древесных плитных материалов с толщиной не более 40 мм, к которым относятся ориентированные стружечные плиты (ОСП или OSB), древесно-волоконистые плиты (ДВП, MDF), фанера, древесно-слоистые пластики, а также древесно-стружечные плиты (ДСП). Толщина шпонового бруса или ЛВЛ при производстве, как правило, не превышает 106 мм, хотя может сращиваться по пласти в заводских условиях для достижения больших толщин.

При испытаниях по схеме, показанной на рис. 4, б, образцы из ЛВЛ можно не укреплять вдоль вертикальных кромок, как это предлагается при испытании на скалывание образцов из поперечной клееной древесины (ПКД или CLT), согласно EN 16351:2015 [15]. При определении прочности на скалывание клееной древесины иногда используется балочный метод, где фиксируется удлинение диагоналей квадратов в опорных частях балки, согласно EN 408. Наблюдаемые при испытаниях образцов на скалывание схемы разрушения образцов имели типичный для

данного вида напруженого состояния хрупкий характер разрушений. Разрушение образцов происходило по линии, практически параллельной направлению волокон, без значительных отклонений, поскольку образцы данного типа ЛВЛ

бруса имели однонаправленное расположение шпона. Характеристическое значение прочности для каждой серии образцов (табл. 2) определялось в соответствии с требованиями новой редакции стандарта EN 14358:2016.

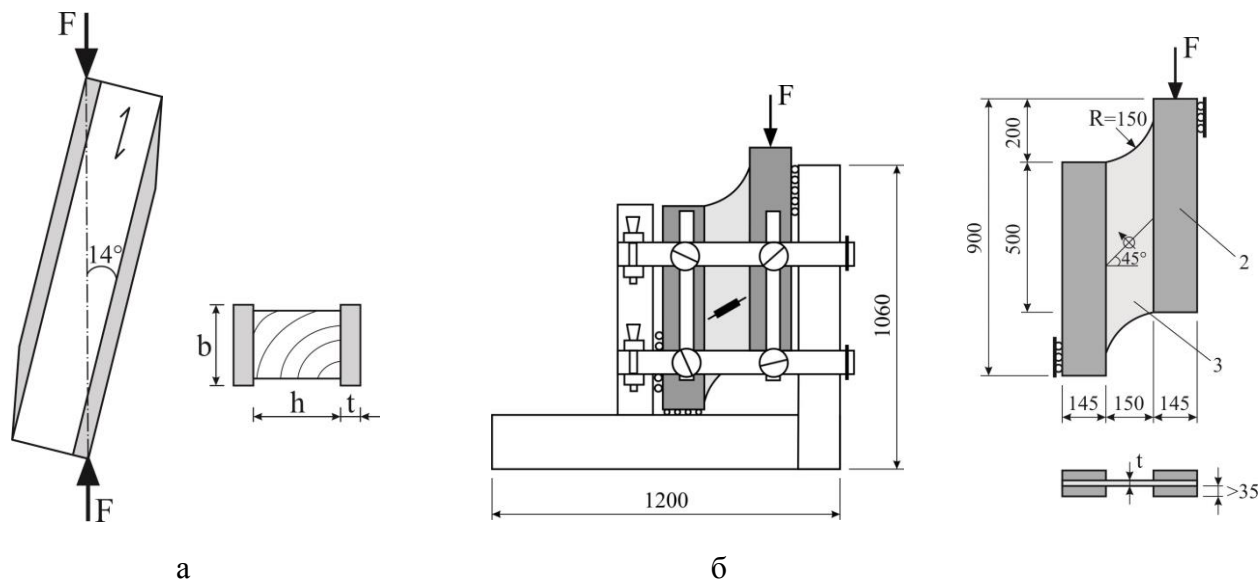


Рис. 4. Схема испытания плитных древесных материалов при скалывании грани и по пласти: а – испытание по грани EN 408; б – испытание по пласти EN 789

Таблица 2

Результаты испытаний серий образцов на скалывание

Серии образцов	Количество образцов	Минимальное значение (N/mm ²)	Среднее значение (N/mm ²)	Максимальное значение (N/mm ²)	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации	Характеристическое значение прочности (N/mm ²)
тип А	11	3,73	5,15	7,11	1,05	0,2	1,13
тип Б	8	6,81	9,64	11,5	1,77	0,18	6,07
тип В	14	3,62	7,32	13,8	3,09	0,42	3,03

Согласно СП64.13330.2017 несущая способность стержня, вклеенного вдоль волокон, определяется по формуле:

$$T = R_{ск} \cdot \pi \cdot d \cdot l \cdot K_c \quad (1)$$

Исходя из (1) определяем условную прочность на скалывание:

$$R_{ск} = T / (\pi \cdot d \cdot l \cdot K_c) \quad (2)$$

Результаты сравнительной оценки полученных данных скалывания древесины в образцах с результатами испытаний вклеенных стержней, разрушение которых происходило путем скалывания древесины вокруг вклеенного стержня, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Условное временное сопротивление при скалывании для образцов с одним вклеенным стержнем

Номер образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Условное временное сопротивление срезу (N/mm ²)	5.03	4.60	5.38	5.12	5.20	4.77	4.86	5.20	5.90	5.38

Выводы. Результаты анализа испытаний вклеенных стержней, установленных в элементы из шпонового бруса (ЛВЛ) Ultralam типа R при осевом растяжении, позволяют считать возможным использовать такие решения в несущих конструкциях различного типа. Характер разрушений образцов подтверждает необходимость выполнения усилений торцов элементов с вклеенными стержнями для увеличения прочности соединения и достижения вязкого разрушения. Разрушения армирующего стального стержня класса прочности 5.8 подтверждают рекомендации ученых Западной Европы использовать для вклеенных стержней класс прочности минимум 8.8.

Также, при анализе условного временного сопротивления при скалывании из условия прочности вклеенного стержня

на выдергивание, можно считать, что образец на скалывание по типу А наиболее точно показывает прочность материала при скалывании для данного соединения.

Хрупкое разрушение при скалывании как экспериментальных образцов, так и элементов конструкций является не желательным, а иногда не допустимым видом разрушения. Решение данного вопроса выполняется путем установки винтов, препятствующих развитию трещин вдоль волокон, в том числе и в соединениях с разрушением при скалывании. Усиление винтами вклеенных стержней представляется необходимым и эффективным методом усиления, который не только увеличивает прочность соединения, но также делает его разрушение вязким, что необходимо для узловых соединений деревянных конструкций.

Список использованных источников

1. European Committee for Standardization CEN (2003) prEN 1995-2 Eurocode 5—design of timber structures, Part 2: Bridges. Final Project Team draft (Stage 34). Document CEN/TC 250/SC 5: N 198. CEN, Brussels.
2. Riberholt, H. (1988) Glued bolts in glulam—proposals for CIB code. Paper 1-7-2. In: Proceedings of the 21st conference of CIB-W18, Parksville, Canada.
3. Turkovsky, S. B (1989) Designing of wood glued structures joint on glued-in bars. Paper 22-7-13. In: Proceedings of the 22nd conference of CIB-W18, Berlin, German Democratic Republic.
4. Stepinac, M. Joints in beech-LVL timber frames. Report of a short term scientific mission COST Action FP1004 “Enhance mechanical properties of timber, engineered wood products and timber structures” (2014). [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://costfp1004.holz.wzw.tum.de/fileadmin/tu/wz/costfp1004/2012_05_STSM_report_Stepinac_Mislav.pdf – Назв. с экрана. – (Дата обращения 01.12.2016).
5. Broughton J. G., Hutchinson AR (2001a) Pull-out behaviour of steel rods bonded into timber. Mater Struct J 34(2): 100–109.
6. Broughton J. G., Hutchinson AR (2001b) Adhesive systems for structural connections in timber. Int J Adhes Adhes 21(3):177–186.

7. Serrano E, Steiger R, Lavisci P (2008) Glued-in rods. In: Bonding of timber—core document of the COST Action E34. Lignovisionen Issue 18, pp 31–39.
8. COST Action E13 Wood Adhesion and Glued Products, Working Group 2: Glued Wood Products (2002) State of the Art : Report [Электронный ресурс] / [Editors: Carl Johan Johansson, Tony Pizzi, Marc Van Leemput]. – Режим доступа: <http://users.teilar.gr/~mantanis/E13-Glued-Products.pdf> – Назв. с экрана. – (Дата обращения 01.12.2016).
9. Meyer, N., Zugbeanspruchte Verbindungen in Buchenurnierschichtholz. Karlsruher Tage 2016 - Holzbau: Forschung für die Praxis, s.1-18, KIT Scientific Publishing, Karlsruhe, 2016.
10. Larsen HJ (2011) The sad story of glued-in bolts in Eurocode 5. Essay 4.3, CIB-W18, A review of meeting 1-43.
11. GIROD- Glued in Rods for Timber Structures, SP Rapport 2002:26, Building Technology, Borås 2002.
12. EN 408:2010 Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. European Committee for Standardization CEN, Bruxelles, Belgium.
13. EN 789:2004 Timber Structures – Test Methods – Determination of Mechanical Properties of Wood Based Panels, European Committee for Standardization, Bruxelles, Belgium.
14. EN 14374:2004 Timber structures - Structural laminated veneer lumber – Requirements. European Committee for Standardization CEN, Bruxelles, Belgium.
15. EN 16351:2015 Timber structures - Cross laminated timber – Requirements. European Committee for Standardization CEN, Bruxelles, Belgium.
16. Tlustochowicz G, Serrano E, Steiger R (2011) State-of-the-art review on timber connections with glued-in steel rods. Material and Structures 44:997-1020.
17. Stepinac Mislav. Comparison of design rules for glued-in rods and design rule proposal for implementation in European standards [Электронный ресурс] / [Stepinac, Mislav; Hunger, Frank; Tomasi, Roberto; Serrano, Erik; Rajčić, Vlatka; van de Kuilen, Jan-Willem] // CIB-W18 (2013). – Режим доступа: http://costfp1004.holz.wzw.tum.de/fileadmin/tu/wz/costfp1004/CIB_Paper_Stepinac_et_al_-_46-07-10_copu.pdf – Назв. с экрана. – (Дата обращения 01.12.2016).
18. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-9.1-791 vom 17. Januar 2012: Verbindungen mit faserparallel in Brettschichtholz eingeklebten Stahlstäben. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin.
19. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung Nr. Z-9.1-778 vom 31. Oktober 2012: 2K-EPKlebstoff GSA-Harz und GSA-Härter für das Einkleben von Stahlstäben in Holzbaustoffe. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin.
20. СП 64.13330.2017 Свод правил. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция [Текст] : СНиП II-25-80, Минрегион РФ. – М., 2017. – 97 с.
21. Harris, S. Fire Resistance of Epoxy-grouted Steel Rod Connections in Laminated Veneer Lumber (LVL), Fire Engineering Research Report 04/7, 2004.
22. ÖN B 1995-1-1:2015, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines - Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau, Austria, 2015.
23. DIN EN 1995-1-1: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1 mit NA (2013): Allgemeines – Allgemeine Regeln für den Hochbau. DIN-Deutsches Institut für Normung e.V., 2010.

Распопов Євген Анатолійович, аспірант кафедри будівельних конструкцій Харківського національного університету міського господарства ім. А. М. Бекетова. Тел. : (050) 107-25-92. E-mail: raspopovkm@gmail.com.

Распопов Евгений Анатольевич, аспирант кафедры строительных конструкций Харьковского национального университета городского хозяйства им. А. М. Бекетова. Тел.: (050) 107-25-92. E-mail: raspopovkm@gmail.com.

Raspopov Ievgenii, PhD-student of building constructions O.M.Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel.: (050) 107-25-92. E-mail: raspopovkm@gmail.com.

Статтю прийнято 27.03.2018 р.

ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

УДК 621.81

РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ЙМОВІРНОСТЕЙ ПОЯВИ РІЗНИХ ЗА ВЕЛИЧИНОЮ ЗНОСІВ ТЯГОВИХ ЗУБЧАТИХ ПЕРЕДАЧ ЕЛЕКТРОПОЇЗДІВ

Канд. техн. наук В. С. Тищенко, асп. В. І. Громов, старш. викл. М. М. Одегов

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕРОЯТНОСТЕЙ ПОЯВЛЕНИЯ РАЗНЫХ ПО ВЕЛИЧИНЕ ИЗНОСОВ ТЯГОВЫХ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ

Канд. техн. наук В. С. Тищенко, асп. В. И. Громов, старш. преп. Н. Н. Одегов

CALCULATION-EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE PROBABILITIES OF APPEARANCE OF DIFFERENT IN MAGNITUDE WEAR OF TRACTION GEARS.

Phd. tehn. V. Tishchenko, sciences, pg. V. Gromov, senior lecturer M. Odegov

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.176.2018.131254>

Розглянуто особливості проведення статистичного аналізу результатів обміру зубів тягових зубчатих передач електропоїздів. Сформовані відповідні матриці, елементами яких є ймовірності появи зносів, відповідні до них математичні сподівання, а також загальна дисперсія. Побудовано гістограми і відповідні закони розподілу ймовірностей виникнення того чи іншого зносу. Розглянуто перспективи використання отриманих результатів при прогнозуванні залишкового ресурсу.

Ключові слова: зубчата передача, знос, розподілення ймовірностей.

Рассмотрены особенности проведения статистического анализа результатов обмера зубьев тяговых зубчатых передач электропоездов. Сформированы соответствующие матрицы, элементами которых являются вероятности появления износов, соответствующие им математические ожидания, а также общая дисперсия. Построены гистограммы и соответствующие законы распределения вероятностей возникновения того или иного износа. Рассмотрены перспективы использования полученных результатов при прогнозировании остаточного ресурса.

Ключевые слова: зубчатая передача, износ, распределение вероятностей.

The importance of studies aimed at assessing the residual resource of the components and components of the mechanical system of the rolling stock operated on the Ukrainian railways is substantiated. As the basic unit of the rolling stock involved in the suburban transportation of passengers, electric trains are allocated. The importance for the mechanical system of motor-car rolling stock traction gears was noted. The necessity of determining the laws of distribution of the main characteristics of the traction gear operation is substantiated. The expediency of considering the value of tooth wear along the dividing circle as one of the main characteristics of the gear drive operation was noted. Features of the statistical analysis of the results of measuring the gear teeth and the wheels of traction gears of ER2, ER2P and ER2T electric trains operating on the southern

railway during a three-year period of operation (2015-2017) are considered. The tooth thickness values for dividing chords are presented in the summary table in the form of arrays for gears and gears with the corresponding value and series of rolling stock, the date of measurement. Based on the results of statistical processing of these arrays, corresponding matrices are formed, the elements of which are the probabilities of occurrence of different wear, the corresponding mathematical expectations and the general variance. Using the obtained matrices for the traction gears of the series of electric trains studied, histograms and corresponding laws were constructed to distribute the probabilities of occurrence of a particular wear. It is noted that during the analysis of the obtained diagrams, laws were obtained which correspond to the steady-state regime on the wear curve and do not exceed the allowable or reject dimensions. Prospects for using the results obtained in predicting the residual service life of traction gears of tractive rolling stock are considered.

Keywords: gearing, wear, probability distribution.

Вступ. Мережею залізниць України задовольняється значна частка вантажних та пасажирських перевезень. Велика частина їх припадає на приміські пасажирські перевезення, що здійснюються за допомогою моторвагонного рухомого складу (МВРС). Поряд з цим, якість перевезень значною мірою залежить від технічного стану парку МВРС, що експлуатується. Зважаючи на низькі темпи оновлення і те, що переважну більшість рухомого складу, задіяного в приміських перевезеннях, складають електропоїзди, які експлуатуються в понаднормовий термін, актуальним є питання підтримки наявного рухомого складу в працездатному стані та оцінки залишкового ресурсу окремих вузлів та систем існуючого МВРС [1].

Переважний обсяг приміських пасажирських перевезень на мережі залізниць України постійного струму здійснюється електропоїздами серій ЕР-2, ЕР-2Р та ЕР-2Т, у механічній системі яких одним із найвідповідальніших можна виділити вузол тягового привода. Тяговий привод, у свою чергу, зручно розглядати у вигляді ряду послідовно з'єднаних модулів [2, 3], одним з яких є тягова зубчата передача (ТЗП), що працює в режимах, пов'язаних з великими навантаженнями та зносами. Це обґрунтовує доцільність досліджень, спрямованих на оцінку залишкового ресурсу ТЗП існуючого парку МВРС.

Аналіз останніх результатів досліджень. Аналіз сучасних методів і підходів до проведення науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт показав, що прогнозування ресурсу масових об'єктів, до яких належить тягова зубчата передача, виконується з використанням методів, які базуються на використанні щільності розподілення ймовірності показників роботи об'єкта контролю. Поряд із цим, питання щодо оцінки існуючого стану ТЗП з точки зору прогнозування їх ресурсу та необхідний для цього математичний опис недостатньо висвітлені в сучасній літературі [4].

Визначення мети та завдання дослідження. Метою статті є висвітлення результатів розрахунково-експериментального визначення ймовірностей появи різних за величиною зносів тягових зубчатих передач електропоїздів ЕР-2, ЕР-2Р та ЕР-2Т.

Завданнями дослідження є:

- обробка і аналіз зібраних статистичних даних обмірів зубів шестерень і коліс досліджуваних ТЗП;
- визначення статистичних показників оброблених масивів, а також визначення характеру закону розподілення зносів зубів тягової зубчатої передачі.

Основна частина дослідження. Відповідно до нормативної документації [5] величина зносу визначалась як різниця товщин зубів за ділильними хордами нових шестерень та коліс і тих, що контролюються в експлуатації.

На першому етапі експериментальних досліджень були зібрані результати понад 1,5 тисячі обмірів товщин зубів шестерень та коліс за ділильною хордою упродовж чотирьох років (2014–2017 рр.) для електропоїздів, що експлуатуються на Південній залізниці. Їх аналіз і впорядкування дали змогу сформулювати відповідні масиви, що зведені до таблиці.

Особливістю дослідження є аналіз ступенів зносу зубів, які відповідають ділянці сталого зносу відповідно до кривої Лоуренса [3]. Як приклад у табл. 1 наведено фрагмент зведеної таблиці масивів товщин зубів за ділильною хордою з вказаними датою вимірювання, номером шестірні й колеса та серією рухомого складу.

Таблиця 1

Фрагмент масиву результатів вимірювання

Дата вимірювання	Номер шестірні	Результат вимірювання шестірні	Номер колеса	Результат вимірювання колеса	Рухомий склад
-	-	-	-	-	-
15.11.2017	61	17,6	74258	14,5	ЕР-2Т
16.11.2017	434	17,2	741373	14	ЕР-2Р
17.11.2017	018	17,3	74785	14,2	ЕР-2Т
-	-	-	-	-	-

За результатами аналізу масивів вимірювань були отримані закони розподілення ймовірності виникнення випадкової величини товщини зубів за

ділильною хордою. Так, на рис. 1–4 наведено отримані закони розподілення ймовірності виникнення в процесі роботи ТЗП того чи іншого зносу.

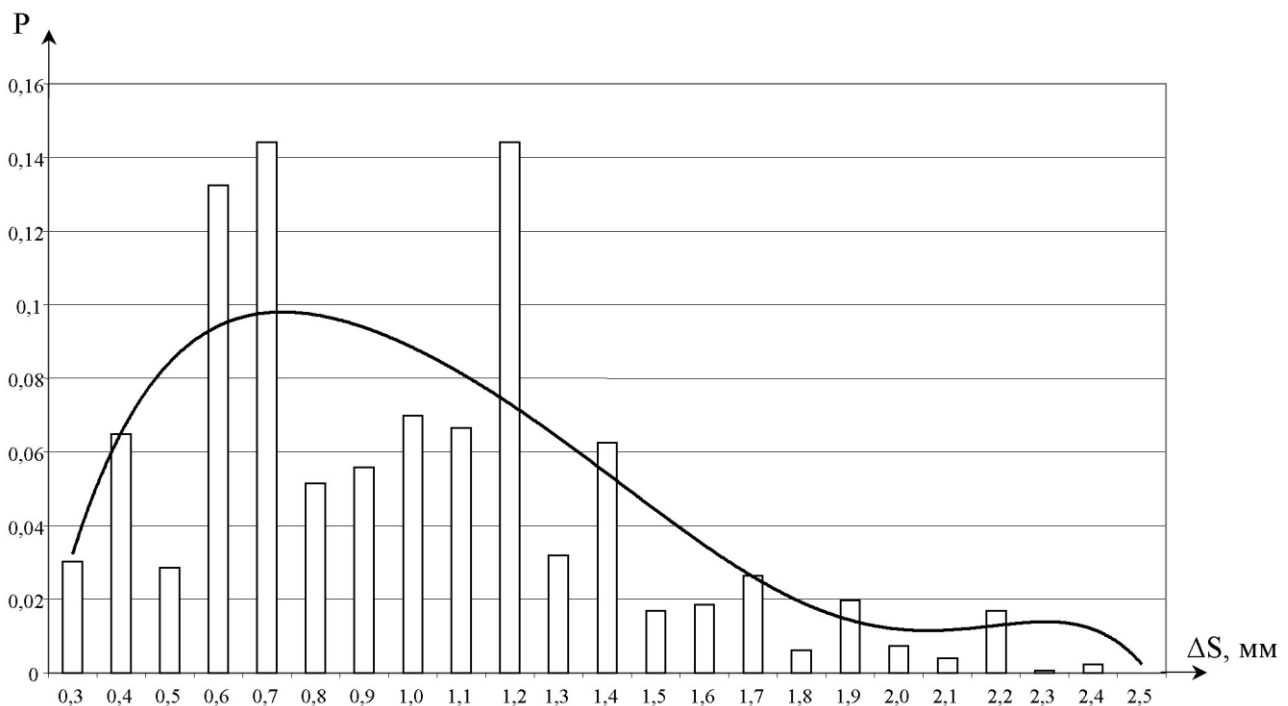


Рис. 1. Закон розподілення ймовірності виникнення зносів зубів шестірні електропоїзда ЕР-2

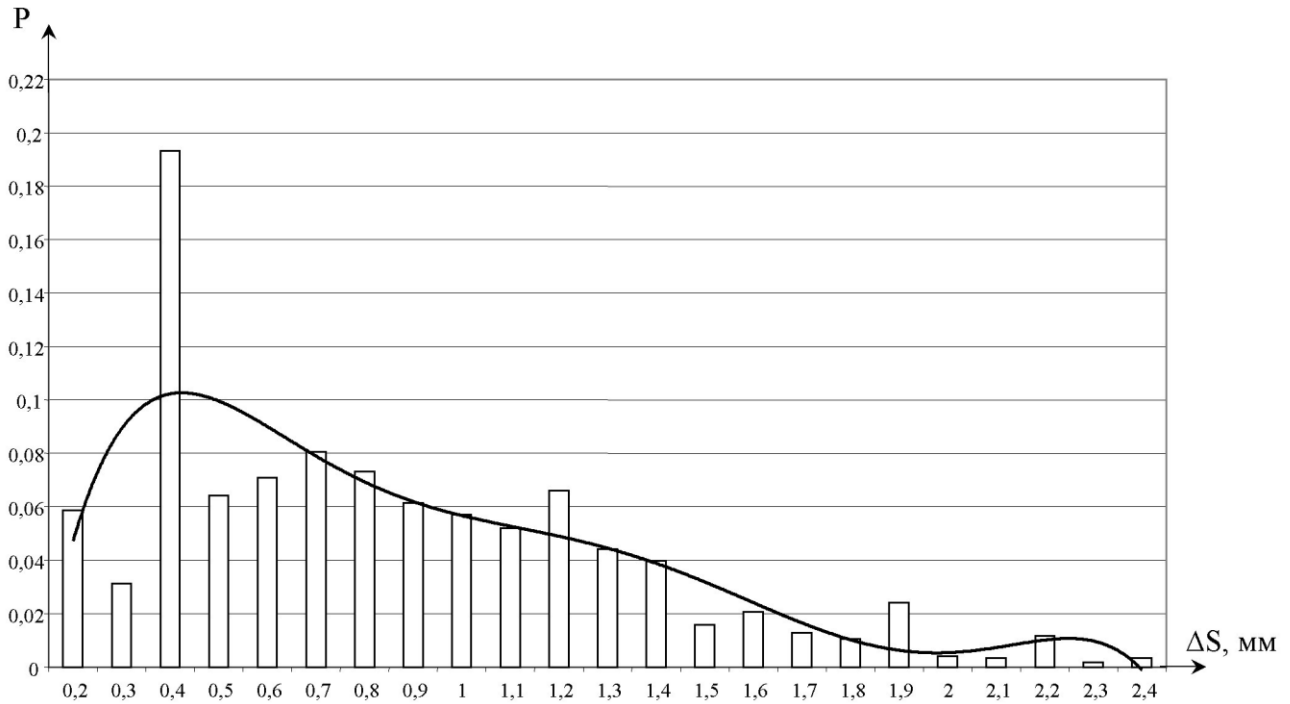


Рис. 2. Закон розподілення ймовірності виникнення зносів зубів зубчатого колеса електропоїзда EP-2

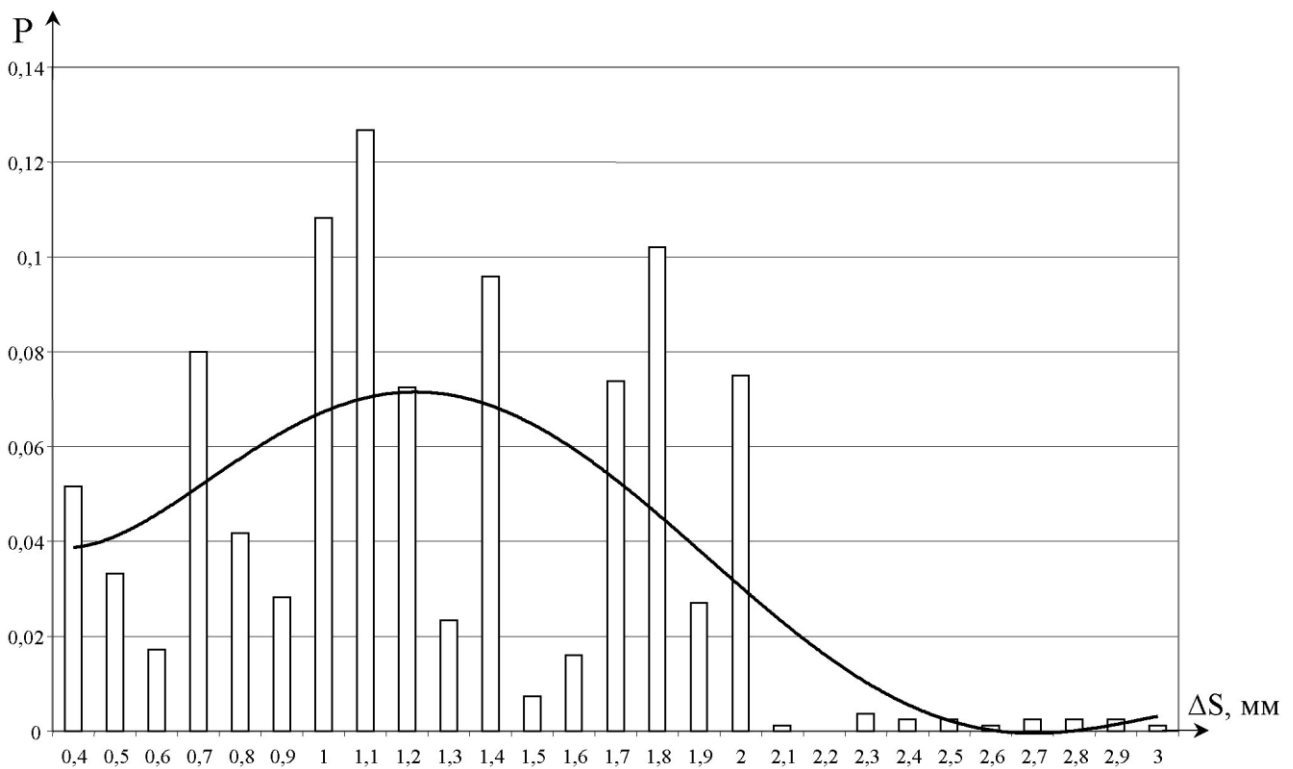


Рис. 3. Закон розподілення ймовірності виникнення зносів зубів шестірні електропоїздів EP-2P та EP-2T

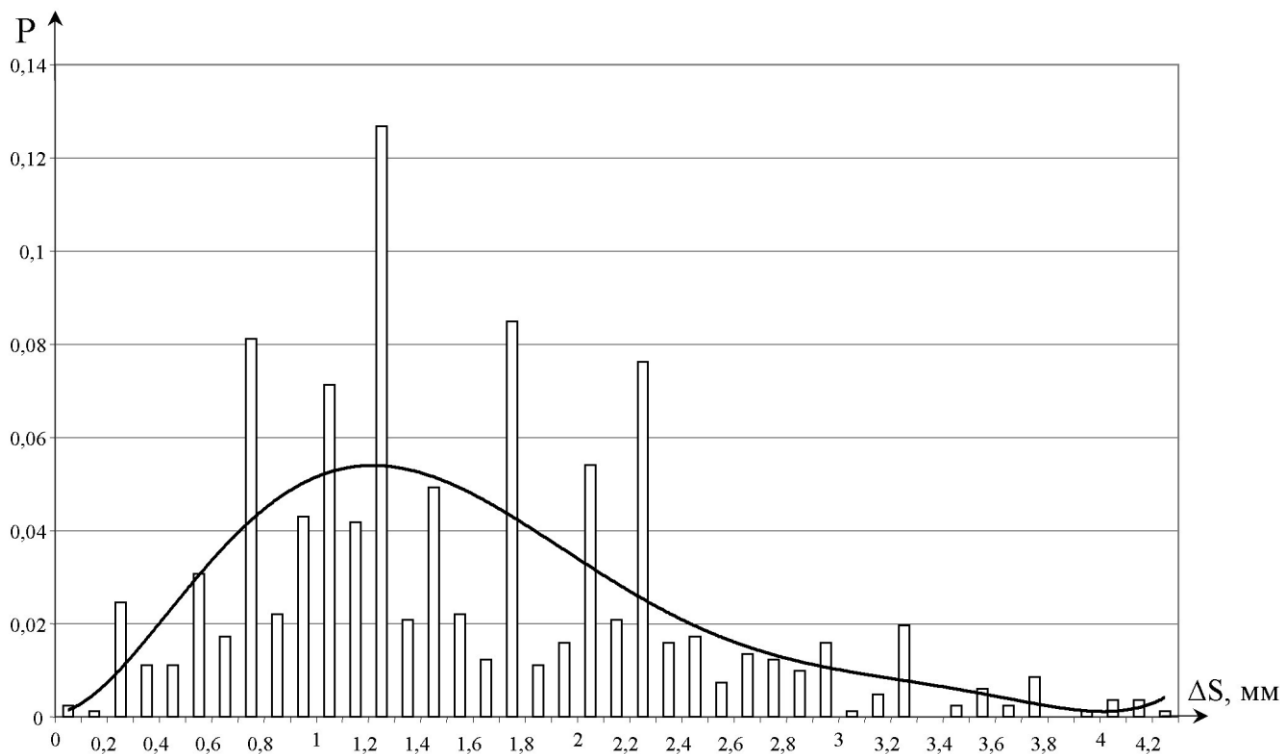


Рис. 4. Закон розподілення ймовірності виникнення зносів зубів зубчатого колеса електропоїздів EP-2P та EP-2T

Оскільки тягові зубчаті передачі електропоїздів EP-2 мають конструктивні особливості в порівнянні із зубчатыми передачами EP-2P та EP-2T, на наступному етапі було виявлено кількість розмірів, що збігаються для зубів шестерень та зубчатих коліс окремо для зазначеного тягового

рухомого складу. Знаючи число однакових вимірювань, обчислено ймовірність їх виникнення, математичне сподівання та загальна дисперсія розсіювання. Наприклад, результати розрахунків для тягової зубчатої передачі електропоїзда EP-2 наведено у табл. 2.

Таблиця 2

Результати аналізу масивів вимірювань ТЗП EP-2

Шестірня				Колесо			
Розмір	Число вимірювань	Ймовірність	Математичне сподівання	Розмір	Число вимірювань	Ймовірність	Математичне сподівання
1	2	3	4	5	6	7	8
18,9	54	0,030168	0,570168	16	105	0,058659	0,938547
18,8	116	0,064804	1,218324	15,9	56	0,031285	0,49743
18,7	51	0,028492	0,532793	15,8	346	0,193296	3,054078
18,6	237	0,132402	2,462682	15,7	115	0,064246	1,008659
18,5	258	0,144134	2,66648	15,6	127	0,07095	1,106816
18,4	92	0,051397	0,945698	15,5	144	0,080447	1,246927
18,3	100	0,055866	1,022346	15,4	131	0,073184	1,127039

Продовження табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8
18,2	125	0,069832	1,27095	15,3	110	0,061453	0,940223
18,1	119	0,06648	1,203296	15,2	102	0,056983	0,866145
18	258	0,144134	2,594413	15,1	93	0,051955	0,784525
17,9	57	0,031844	0,57	15	118	0,065922	0,988827
17,8	112	0,06257	1,113743	14,9	79	0,044134	0,657598
17,7	30	0,01676	0,296648	14,8	71	0,039665	0,587039
17,6	33	0,018436	0,324469	14,7	28	0,015642	0,229944
17,5	47	0,026257	0,459497	14,6	37	0,02067	0,301788
17,4	11	0,006145	0,106927	14,5	23	0,012849	0,186313
17,3	35	0,019553	0,338268	14,4	19	0,010615	0,152849
17,2	13	0,007263	0,124916	14,3	43	0,024022	0,34352
17,1	7	0,003911	0,066872	14,2	7	0,003911	0,055531
17	30	0,01676	0,284916	14,1	6	0,003352	0,047263
16,9	1	0,000559	0,009441	14	21	0,011732	0,164246
16,8	4	0,002235	0,037542	13,9	3	0,001676	0,023296
16,7	0	0	0	13,8	6	0,003352	0,046257
Дисперсія D=0,185917				Дисперсія D=0,228436			

Видно, що розподіл розглянутих зносів відповідає ділянці сталих зносів, тобто не перевищує граничних значень, які складають для шестірні 3,4 мм, для колеса – 5,3 мм, а найбільш вірогідні зноси відповідають 20–40 % від максимально допустимих. Наприклад, величина зносу (зменшення ділильної хорди) шестірні електропоїзда EP2 на рівні 0,7 мм виникне з ймовірністю 0,144, математичне сподівання товщини зубця з таким зносом 2,67.

Висновки. Висвітлені в статті результати розрахунково-експериментального визначення ймовірностей появи різних за величиною зносів тягових зубчатих передач електропоїздів доцільно використовувати при прогнозуванні залишкового ресурсу шестерень та коліс тягових зубчатих передач електропоїздів, що експлуатуються [6].

Список використаних джерел

1. Державна цільова програма реформування залізничного транспорту на 2010–2019 роки. Міністерство інфраструктури [Текст]: затв. постановою Кабінету міністрів України № 1390 від 16 груд. 2009 р.
2. Мороз, В. І. Новий підхід до класифікації тягових приводів рухомого складу залізниць [Текст] / В. І. Мороз, О. В. Братченко, С. В. Бобрицький // Зб. наук. праць Донецького інституту залізничного транспорту. – Донецьк: ДонІЗТ, 2012. – Вип. 29. – С. 162–166.
3. Бабанін, О. Б. Прогнозування збільшення ресурсу тягових зубчатих передач електропоїздів за рахунок удосконалення технології ремонту [Текст] / О. Б. Бабанін, В. І. Громов // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. тансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – Вип. 147. – С. 104–109.

4. Cheng Wang, Shou-ren Wang, Gao-qi Wang. A method for calculating gear meshing efficiency by measured data from gear test machine [Text] // Measurement. – 2018. – Vol. 119. – P. 97–101.

5. Правила технічного обслуговування та поточного ремонту електропоїздів і електросекцій [Текст] : ЦТ-0046. – К., 2005. – 320 с.

6. Болотин, В. В. Прогнозирование ресурса машин и конструкций [Текст] / В. В. Болотин. – М. : Машиностроение, 1984. – 312 с.

Тищенко Вадим Сергійович, канд. техн. наук, доцент кафедри механіки і проектування машин Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.(057) 730-10-53. E-mail: mpmkafedra@gmail.com.

Громов Володимир Ігоревич, аспірант кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.(057) 730-10-53. E-mail: eltech@kart.edu.ua.

Одегов Микола Миколайович, старший викладач кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.(057) 730-19-96. E-mail: odegov@kart.edu.ua.

Тищенко Вадим Сергеевич, канд. техн. наук, доцент кафедры механики и проектирования машин Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.(057) 730-10-53.

E-mail: mpmkafedra@gmail.com.

Громов Владимир Игоревич, аспирант кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.(057) 730-10-53. E-mail: eltech@kart.edu.ua.

Одегов Николай Николаевич, старший преподаватель кафедры электроэнергетики, электротехники и электромеханики Украинского государственного университета железнодорожного транспорта. Тел.(057) 730-19-96. E-mail: odegov@kart.edu.ua.

Tishchenko Vadim, PhD. Sc. Associate Professor, department mechanical engineers and designing the machines Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.(057) 730-10-53. E-mail: mpmkafedra@gmail.com.

Gromov Vladimir, graduate student of department electric power engineering, electrical engineering and electromechanics State University of Railway Transport. Tel.(057) 730-10-53. E-mail: eltech@kart.edu.ua.

Odegov Nikolay, Senior Lecturer of department electric power engineering, electrical engineering and electromechanics State University of Railway Transport. Tel.(057) 730-10-53. E-mail: odegov@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 23.03.2018 р.

МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ (13, 132, 133)

УДК 621.762

ПОВЕРХНЕВЕ ЗМІЦНЕННЯ ПОРОШКОВИХ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ

Д-р техн. наук О. А. Охріменко, кандидати техн. наук А. В. Мініцький, М. О. Сисоєв, Н. В. Мініцька (НТУ України «КПІ імені Ігоря Сікорського», м. Київ)

ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ ПОРОШКОВЫХ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ

Д-р техн. наук А. А. Охрименко, кандидаты техн. наук А. В. Миницкий, М. А. Сысоев, Н. В. Миницкая (НТУ Украины «КПИ имени Игоря Сикорского», г. Киев)

SURFACE HARDENING OF POWDERED IRON-CARBON ALLOYS

Dr. Sc. Sciences O. A. Ohrimenko, PhD A.V. Minitzky, O. Sysoev, N. V. Minitska (NTU of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv)

DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.176.2018.131255>

Досліджено процес поверхневого термічного оброблення порошкових шаруватих залізовуглецевих сплавів. Встановлено, що легування поверхневого шару карбідом хрому дає змогу збільшити поверхневу міцність матеріалів після обробки електронним променем у два рази. Проведено дослідження розподілення структурних складових залізовуглецевого сплаву в отриманих зразках при поверхневому термічному обробленні залежно від товщини поверхневого шару.

Ключові слова: *поверхневе термічне оброблення, зміцнення поверхні, мікротвердість, залізовуглецевий сплав, електронний промінь.*

Исследован процесс поверхностной термической обработки порошковых слоистых железуглеродистых сплавов. Исследованиями установлено, что легирование поверхностного слоя карбидом хрома позволяет увеличить поверхностную прочность материалов после обработки электронным лучом в два раза. Также проведены исследования по распределению структурных составляющих железуглеродистых сплавов при поверхностной термической обработке в зависимости от толщины поверхностного слоя.

Ключевые слова: *поверхностная термическая обработка, упрочнение поверхности, микротвердость, железуглеродистый сплав, электронный луч.*

There are many ways to improve the quality of iron-carbon alloys used as structural materials, one of which is surface heat treatment with highly concentrated energy streams. The effect of electron-beam heating on the structure and properties of powder-metal ceramic materials was studied in this work. In order to solve this problem, the following tasks were solved: the study of the influence of the technological parameters of electron-beam processing on the structure and phase composition of the sintered materials on the basis of iron powder with graphite additions, determination of the influence of the thickness of the surface layer on the temperature gradient under the electron beam treatment of the material surface and formation structure, investigation of

the influence of the chemical composition and the thickness of the surface layer on the hardness and microhardness of materials after electron beam processing. The advantages of electron-beam processing are shown in comparison with other methods of hardening the surface of parts. The influence of electron-beam processing regimes on the structure and phase composition of layered iron-based powder materials is studied. In the work the process of surface heat treatment of powdered laminated iron-carbon alloys is investigated. It was established that doping of a surface layer with carbide chromium allows to increase the surface strength of materials after treatment with an electron beam twice. Distribution of structural components of iron-carbon alloy under surface heat treatment depending on the thickness of the surface layer is investigated. Research results can be used to create economically alloyed structural iron-carbon alloys, which must have high surface hardness and high bulk strength. It is shown that in the middle of the samples the microhardness is practically the same for all materials and is about 3-4 GPa. On the surface, with a thickness of the upper layer of 0.5-1.0 mm, the average values of microhardness are about 5.0-5.5 GPa. With an increase in the thickness of the layer to 1.5-2.0 mm, the average microhardness reaches about 7.5-9.0 GPa. Surface hardness of materials also increases to 68 HRC with hardness in the middle of about 35-40 HRC. Research results can be used to create economically alloyed structural iron-carbon alloys, which must have high surface hardness and high bulk strength.

Keywords: surface heat treatment, surface strengthening, microhardness, iron-carbon alloy, electronic beam.

Вступ. Термін роботи деталей і вузлів обладнання, пов'язаного з переробкою і транспортуванням абразивних матеріалів на гірничозбагачувальних підприємствах, промисловості будівельних матеріалів і ряду інших галузей, визначається, в першу чергу, зносостійкістю їхніх робочих поверхонь. Практично все обладнання промислових підприємств піддається різним видам зношування і потребує ремонту та заміни, що в ряді випадків є економічно не вигідним [1]. У зв'язку з цим пошуки зносостійких матеріалів і технологій, що забезпечують збільшення терміну служби деталей машин, що швидко зношуються, стає першорядним технічним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомо багато способів підвищення якості залізвуглецевих сплавів, які використовуються як конструкційні матеріали, одним з яких є поверхнєве термічне оброблення висококонцентрованими потоками енергії [2, 3]. Це дає можливість вирішувати задачу локального термічного оброблення деталі, що дає змогу інтенсивно передавати енергію у вибрані ділянки матеріалу, в яких

потрібно місцево підвищити твердість і зносостійкість [4]. До таких методів належать нагрів за допомогою лазера, електричної дуги, плазми, нагріву з використанням ксенонових ламп та електронного променя [5–7]. Перевагою електронно-променевого нагріву є можливість плавно і в широких межах змінювати потужність тепла, що закладається, а також конфігурацію зони нагріву. Проте, незважаючи на переваги електронно-променевого оброблення, основні напрацювання в галузі поверхневого термічного зміцнення деталей стосуються переважно литих сплавів. Вплив електронно-променевого нагріву на структуру та властивості порошкових металокерамічних матеріалів практично не досліджувався.

Визначення мети та завдання дослідження. Метою даної роботи є дослідження процесу електронно-променевого оброблення двошарового спеченого залізвуглецевого сплаву та вивчення впливу товщини верхнього шару на структуроутворення і твердість сплавів після поверхневого термічного оброблення.

Для досягнення мети дослідження було поставлено такі завдання:

1. Дослідити вплив технологічних параметрів електронно-променевого оброблення на структуру та фазовий склад спечених матеріалів на основі залізного порошку з добавками графіту.

2. Визначити вплив товщини поверхневого шару на температурний градієнт при електронно-променевому обробленні поверхні матеріалів та формування структури.

3. Дослідити вплив хімічного складу і товщини поверхневого шару на твердість та мікротвердість матеріалів після електронно-променевого оброблення.

Основна частина дослідження.

Однією із переваг виробів, отриманих методом порошкової металургії, є можливість точного корегування хімічного складу та створення градієнтних шарів по структурі матеріалу. Це дає змогу отримати економно леговані сплави, що містять легуючі елементи тільки на робочій поверхні виробу. Так, основна частина зразків виготовлялась із суміші залізного порошку із вмістом графіту 1,4 %, а верхній шар із суміші, що містить 91 % заліза, 4 % графіту і 5 % карбіду хрому (Cr_3C_2). Карбід хрому вводився як легуюча складова, що забезпечує високу твердість та зносостійкість матеріалу в результаті поверхневого термічного оброблення зразків. При цьому товщина поверхневого шару складала 0,5, 1,0, 1,5 та 2,0 мм.

Зразки виготовляли методом статичного пресування на гідравлічному пресі під тиском 800 МПа з подальшим спіканням у захисній атмосфері при температурі 1100 °С протягом 1 години. Поверхнєве термічне оброблення спечених зразків електронним променем проводили в електронно-променевій установці «ЭЛА-6» при режимі, що забезпечував оплавлення поверхні зразків, тобто при температурі вище за 1147 °С (температура утворення легкоплавкої евтектики ледебуриту). В попередніх дослідженнях було показано ефективність поверхневого оброблення залізовуглецевих сплавів при мінімальному

часі витримки 1–10 с [8], що забезпечує швидке охолодження і утворення мартенситних зерен внаслідок температурного градієнта між поверхнею і основою.

Поверхнєве оброблення електронним променем двошарових зразків показало, що мікроструктура матеріалів відрізняється залежно від товщини поверхневого шару (рис. 1).

Така відмінність структури пов'язана з тим, що при мінімальній товщині відбувається перерозподіл верхнього шару з основою при оплавленні електронним променем, через що структура поверхні відповідає структурі доевтектичного чавуну (рис. 1, а, б). При більшій товщині поверхневого шару спостерігається структура білого заевтектичного чавуну, що складається зі світлих пластин цементиту і ледебуриту, шар основи відповідає заевтектоїдній сталі, в якій зерна перліту оточені сіткою цементиту (рис. 1, в, г).

Мікротвердість двошарових зразків відрізняється залежно від товщини поверхневого шару (рис. 2). В середині зразків мікротвердість практично однакова для всіх матеріалів та складає близько 3–4 ГПа. На поверхні, при товщині верхнього шару 0,5–1,0 мм, середні значення мікротвердості складають близько 5,0–5,5 ГПа. При збільшенні товщини шару до 1,5–2,0 мм середні значення мікротвердості сягають близько 7,5–9,0 ГПа.

Таким чином, легування поверхневого шару карбідом хрому і застосування поверхневої термічної обробки приводить до збільшення мікротвердості поверхневого шару порошкового матеріалу у два рази, що відбувається завдяки утворенню структури, яка відповідає білому заевтектичному легованому чавуну, в якому утворюються карбідні фази Cr_7C_3 , що підтверджують результати рентгенофазового аналізу. Поверхнєва твердість матеріалів також збільшується до 68 HRC при твердості в середині близько 35–40 HRC.

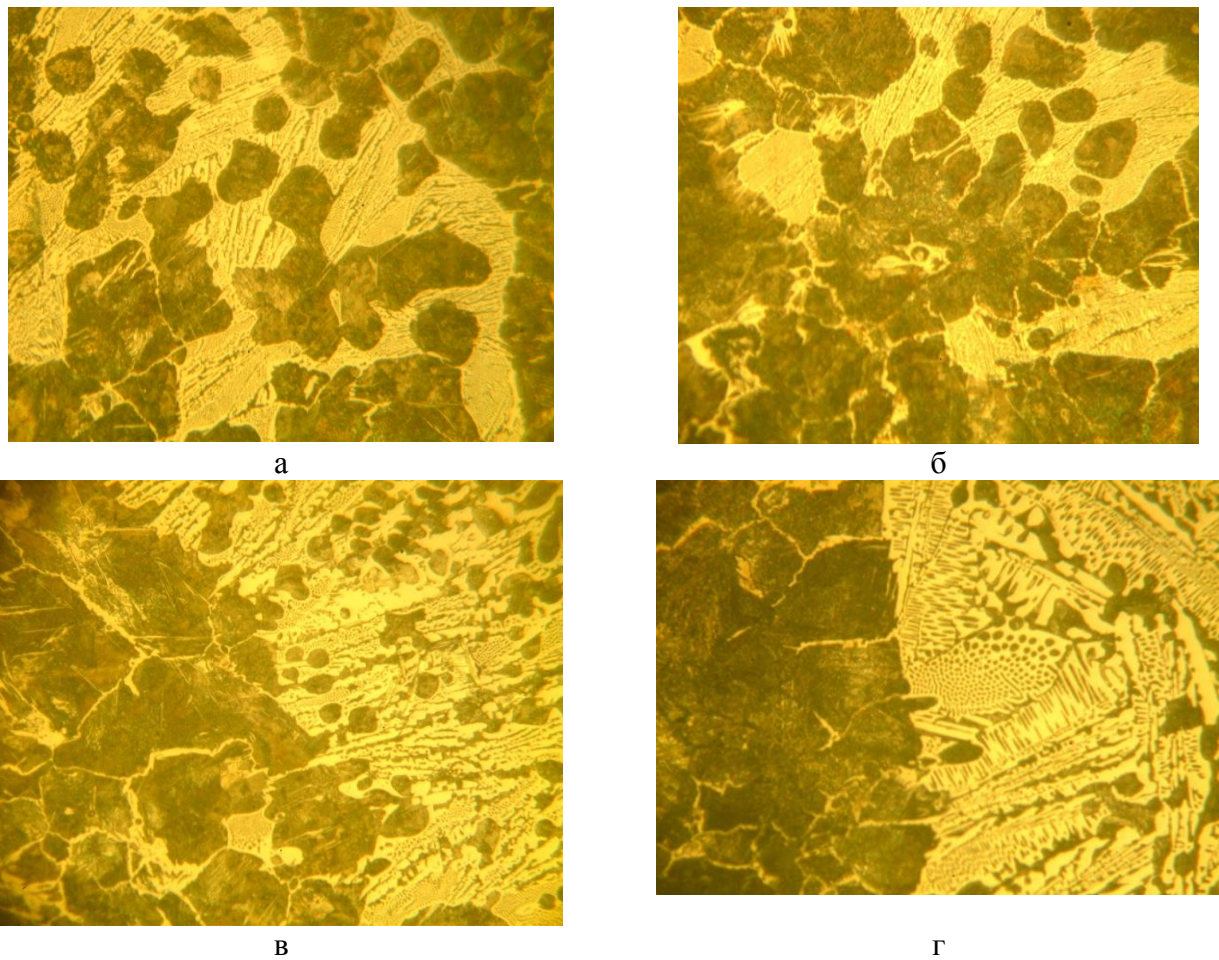


Рис. 1. Мікроструктура спечених зразків після оброблення електронним променем з різною товщиною верхнього шару (x 500): а – 0,5 мм; б – 1,0 мм; в – 1,5 мм; г – 2,0 мм



Рис. 2. Залежність мікротвердості двошарових матеріалів від товщини поверхневого шару

Висновки. Встановлено, що застосування градієнтних порошкових матеріалів із залізвуглецевого сплаву при локальному поверхневому термічному обробленні дає змогу отримати структуру поверхні, що відповідає заевтектичному чавуну з твердістю 7,5–9,0 ГПа, при цьому

структура основи матеріалу відповідає заевтектідній сталі із твердістю 2,5–3,5 ГПа. Результати досліджень можуть бути використані при створенні економно легованих конструкційних залізвуглецевих сплавів з високою поверхневою твердістю та високою об'ємною міцністю.

Список використаних джерел

1. Неижко, И. Г. Термическая обработка чугуна [Текст] / И. Г. Неижко. – К. : Наук. думка, 1992. – 208 с.
2. Зуев, И. В. Обработка материалов концентрированными потоками энергии [Текст] : учеб. пособие для спец. «Машины и технологии высокоэффективных процессов обработки» / И. В. Зуев. – М. : МЭИ, 1998. – 162 с.
3. Исследование влияния режимов лазерной закалки на изменение свойств сталей [Текст] / Алаа Фадим І. Ідан, О. В. Акимов, Л. Ф. Головки [и др.] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2016. – № 2/5 (80). – С. 69–73.
4. Костюк Г. И. Лазерное упрочнение легированных сталей [Текст] / Г. И. Костюк, Н. В. Руденко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2012. – №2 (89). – С. 23–27.
5. Джемелінський, В. В. Визначення оптимальних параметрів лазерно-ультразвукового зміцнення та оздоблювання поверхонь виробів [Текст] / В. В. Джемелінський, Д. А. Лесик // Вісник НТУУ «КПІ». Сер. Машинобудування. – 2013. – №2 (68). – С. 15–18.
6. Maji, K., Pratihari, D. K., & Nath, A. K. (2014). Laser forming of a dome shaped surface: Experimental investigations, statistical analysis and neural network modelling [Text] // Optics and Lasers in Engineering, 53, 31–42.
7. Sachin S. Gautam, Sunil K. Singh and Uday S. Dixit. Laser Forming of Mild Steel Sheets Using Different Surface Coatings Springer India 2015, Lasers Based Manufacturing, Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering.
8. Мініцький, А. В. Вплив часу поверхневого термічного оброблення на структуру порошкових залізвуглецевих сплавів [Текст] / А. В. Мініцький, М. О. Сисоєв, Н. В. Мініцька // Металознавство та обробка металів. – 2016. – № 1. – С. 3–6.

Охріменко Олександр Анатолійович, д-р техн. наук, доцент, кафедра інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна. Тел.: 067 26 76 943. E-mail: alexhobs77@gmail.com.

Мініцький Анатолій В'ячеславович, канд. техн. наук, доцент, кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна. Тел.: 067 75 43 158. E-mail: minitsky@i.ua.

Сисоєв Максим Олександрович, канд. техн. наук, доцент, кафедра високотемпературних матеріалів та порошкової металургії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна. Тел.: 067 93 22 621. E-mail: msysoyev@ukr.net.

Мініцька Наталія Валентинівна, канд. техн. наук, доцент, кафедра інтегрованих технологій машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна. Тел.: 067 77 55 941. E-mail: ulyasha30@bigmir.net.

Охрименко Александр Анатольевич, д-р техн. наук, доцент, кафедра интегрированных технологий машиностроения Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, Украина. Тел.: 067 26 76 943. E-mail: alexhobs77@gmail.com.

Миницкий Анатолий Вячеславович, канд. техн. наук, доцент, кафедра высокотемпературных материалов и порошковой металлургии Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, Украина. Тел.: 067 75 43 158. E-mail: minitsky@i.ua.

Сысоев Максим Александрович, канд. техн. наук, доцент, кафедра высокотемпературных материалов и порошковой металлургии Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, Украина. Тел.: 067 93 22 621. E-mail: msysoyev@ukr.net.

Миницкая Наталия Валентиновна, канд. техн. наук, доцент, кафедра интегрированных технологий машиностроения Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, Украина. Тел. 067 77 55 941. E-mail: ulyasha30@bigmir.net.

Okhrimenko Oleksandr, Ph.D., Associate Professor, Department of Integrated Technologies of Mechanical Engineering, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine. Tel. 067 26 76 943. E-mail: alexhobs77@gmail.com.

Minitsky Anatoliy, Ph.D., Associate Professor, Department of High-Temperature Materials and Powder Metallurgy, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine. Tel. 067 75 43 158. E-mail: minitsky@i.ua.

Sysoyev Maksim, Ph.D., Associate Professor, Department of High-Temperature Materials and Powder Metallurgy, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine. Tel. 067 93 22 621. E-mail: msysoyev@ukr.net.

Minitska Nanaliya, Ph.D., Associate Professor, Department of Integrated Technologies of Mechanical Engineering, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine. Tel. 067 77 55 941. E-mail: ulyasha30@bigmir.net.

Статтю прийнято 23.03.2018 р.

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ УКРАЇНСЬКОГО
ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО
ТРАНСПОРТУ**

**COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS OF THE
UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF RAILWAY
TRANSPORT**

Випуск 176

«Збірник наукових праць УкрДУЗТ» включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що включаються до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 21.12.2015 р. № 1328 (додаток 8)).

Статті друкуються в авторській редакції мовою оригіналу.
Всі статті пройшли подвійне сліпе наукове рецензування.

Відповідальний за випуск Ляник Л. В.

Редактори Еткало О. О., Решетилова В. В.

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 27.03.2018 р.
Формат паперу А4. Папір писальний.
Умовн.друк. арк. 9,25. Тираж 105. Замовлення № .

Видавець Український державний університет залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха,7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018р.