

**Олександр ЖУРАВЛЬОВ, Олександр ШИЯН, Сергій СТРИГУНОВСЬКИЙ,  
Юрій ПЕЛИПЕЦЬ, Борис ШИРОКОВ**

## **БОРУВАННЯ ВНУТРІШНЬОЇ ПОВЕРХНІ ЗАВОРОТУ ТРУБОПРОВОДУ ПАРОГЕНЕРАТОРА МЕТОДОМ CVD**

*Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»  
вул. Академічна, 1, м. Харків, 61108, Україна. E-mail: girik081179@gmail.com*

**Oleksandr ZHURAVLOV, Oleksandr SHIJAN, Sergey STRIGUNOVSKIY,  
Yuri PELYPETS, Boris SHIROKOV**

## **BORING THE INNER SURFACE OF THE PIPELINE TURN CVD STEAM GENERATOR**

*National Science Center "Kharkov Institute of Physics and Technology"  
1, Akademicheskaya St., Kharkov, 61108, Ukraine. E-mail: girik081179@gmail.com*

### **ABSTRACT**

The paper studies the process of borating the inner surface of simulating samples of inversion of a steam generator pipeline by the gas-phase method of hydrogen reduction of boron trichloride. Based on the results of thermodynamic calculations of hydrogen reduction of boron trichloride, gas dynamics of the gas-vapor mixture  $BCl_3: H_2$ , studying the kinetics of the growth rate of coatings based on iron borides, the parameters of gas-phase deposition of coatings on austenitic steel are determined. As a result of phase analysis, 2 phases were detected in the samples: iron borides  $FeB (Fe_2B)$  and  $Fe_2B$ . The microhardness of samples coated with iron borides is 6 times higher than the substrate material (austenitic steel). Cavitation tests have shown that samples with iron boride coatings are more resistant to erosive wear than the substrate material.

**KEY WORDS:** *cavitation wear, cavitation-resistant coatings, iron boride, gas-phase deposition.*

### **ВСТУП**

Однією з проблем, яка призводить до зниження ефективності АЕС є кавітаційний знос заворотів трубопроводів парогенераторів. Збереження їх цілісності – обов'язкова умова функціонування всіх АЕС. З літературних даних здебільшого роботи присвячені моделюванню контролю ерозійного зносу заворотів трубопроводів парогенераторів АЕС. Так у роботі [1] застосовують WATNES комп'ютерний код до умов, що існують у комплексі системи трубопроводів. Розраховують товщину ерозійного зносу стінки трубопроводу в зоні його завороту. У роботі [2] розраховано траєкторію руху часток різних діаметрів при різних швидкостях зіткнення капель зі стінкою трубопроводу. Розрахунки показали, що найбільш небезпечною зоною, де виникає ерозійний знос, це заворот трубопроводу. Одним із перспективних напрямків вирішенням даної проблеми є CVD (газофазне осадження) захисних кавітаційностійких покриттів на основі бориду заліза на внутрішню поверхню заворотів трубопроводів. Борид заліза володіє високою твердістю, хімічною інертністю, та не розчиняється у воді, тому цей матеріал є перспективним для захисту трубопроводів від кавітаційних ударів.

### **МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ**

Борування здійснювали на установці з горизонтальною реакційною камерою проточного типу через яку пропускають парогазовий потік реагентів, які вступають в хімічну реакцію на поверхні розігрітої підкладки, що розміщена всередині камери. Твердофазні продукти реакції утворюють на поверхні підкладки наростаючий шар конденсату, а газоподібні – видаляються з реакційної камери та нейтралізуються. В якості реагентів було обрано трихлористий бор ( $BCl_3$ ).

Несучим газом і активатором був водень ( $H_2$ ). Осадження здійснювалося на підкладку з аустенітної сталі (X18H10T). Зразки нагрівали високочастотним генератором ВЧІ-63/0,44.

Попередньо виконано дослідження руйнування зразків при впливі кавітації на установці ультразвукової кавітації, рис. 1. Кавітаційна зона формувалася між торцем випромінювача, які з'єднані з ультразвуковим генератором типу УЗГ-3 0,4 і поверхня досліджуваного зразка, встановленого в воді, що має температуру 293 К. Випромінювач є концентратором ультразвукових коливань експоненціального профілю, діаметр його поверхні, що випромінює  $5 \cdot 10^{-3}$  м, частота коливань торця 21 kHz, амплітуда  $(30) \cdot 10^{-6}$  м. Відстань між торцем концентратора і поверхню досліджуваного зразка  $5,5 \cdot 10^{-4}$  м. Методика проведення випробувань визначається гравіметричним методом з наступною побудовою кінетичних кривих в координатах "втрата ваги – час кавітаційного впливу" [3].

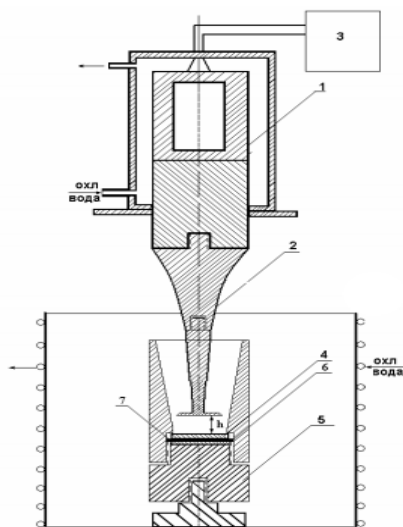


Рис. 1. Схема установки для проведення кавітаційних випробувань з використанням УЗ-диспергатора УЗДН-2Т: 1 - УЗ-перетворювач; 2 - концентратор, випромінювач; 3 - генератор УЗ-коливань; 4 - зразок; 5 - тримач зразка; 6 - гумове ущільнення; 7 - перехідна шайба; h - відстань зразок-випромінювач.

Fig. 1. Installation diagram for cavitation testing using a USZ-2T ultrasonic disperser: 1 - ultrasound converter; 2 - concentrator, emitter; 3 - oscillator oscillations; 4 - sample; 5 - sample holder; 6 - rubber seal; 7 - transition washer; h is the distance of the sample-emitter.

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Для хімічної реакції відновлення  $2BCl_3 + 3H_2 \rightarrow 2B + 6HCl$  розраховано енергію Гіббса, яка визначає ймовірне протікання процесу. З рис. 2 видно, що реакція відновлення починає протікати при температурі вище 900 К, тобто енергія Гіббса негативна.

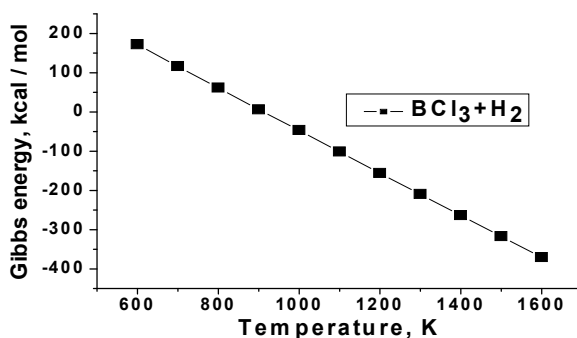


Рис. 2. Залежність енергії Гіббса від температури для хімічної реакції  $2BCl_3 + 3H_2 \rightarrow 2B + 6HCl$ .  
Fig. 2. The deposits of energy of Gibbs in temperature for chemical reactions  $2BCl_3 + 3H_2 \rightarrow 2B + 6HCl$ .

Дослідження борування виконано при співвідношенні  $H_2 : BCl_3 = (3 \dots 20):1$  і тиску  $10^1 - 10^3$  Па. Результати дослідження кінетики борування сталі газозфазним методом показали, що підвищення температури осадження від 1000 до 1200 К збільшує швидкість осадження конденсатів, досягаючи максимуму при температурах 1200 К. Визначено евтектичні та перетектичні перетворення, що уможливило вибір температурних режимів борування сталі (X18H10T). Найнижча температура при якій утворюється евтектичне перетворення бору з

нікелем складає 1300 К, це призводить до оплавлення сталі в процесі борування, тому борування здійснювали при температурі не вище 1200 К, рис. 3.

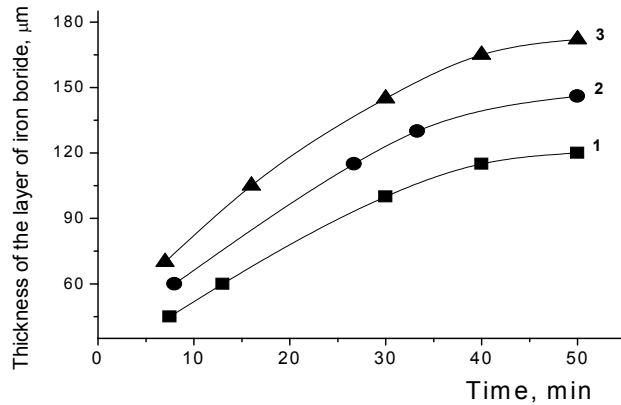


Рис. 3. Зміна швидкості борування при різних температурах  
1 - 1000 К; 2 - 1100 К; 3 - 1200 К в залежності від часу.  
Fig. 3. Changing the rate of boring at different temperatures  
1 - 1000 К; 2 - 1100 К; 3 - 1200 К depending on time.

У результаті фазового аналізу в зразках, одержаних при  $T = 1200$  К, виявлено змішані фази FeB ( $a = 4,097 \text{ \AA}$ ;  $b = 5,533 \text{ \AA}$ ;  $c = 2,953 \text{ \AA}$ ) з текстурою (020) і Fe<sub>2</sub>B ( $a = 5,113 \text{ \AA}$ ;  $c = 4,248 \text{ \AA}$ ) з текстурою (002), вміст боридів становив 60,8 wt.% FeB та 39,2 wt.% Fe<sub>2</sub>B, рис. 4 *a*. У зразках, одержаних при  $T = 1000$  К, виявлено фазу: борид заліза Fe<sub>2</sub>B ( $a = 5,117 \text{ \AA}$ ;  $c = 4,243 \text{ \AA}$ ) з текстурою (100), тобто зерна бориду заліза Fe<sub>2</sub>B переважно орієнтовані кристалографічними площинами {100} паралельно поверхні зразка. рис. 4 *b*.

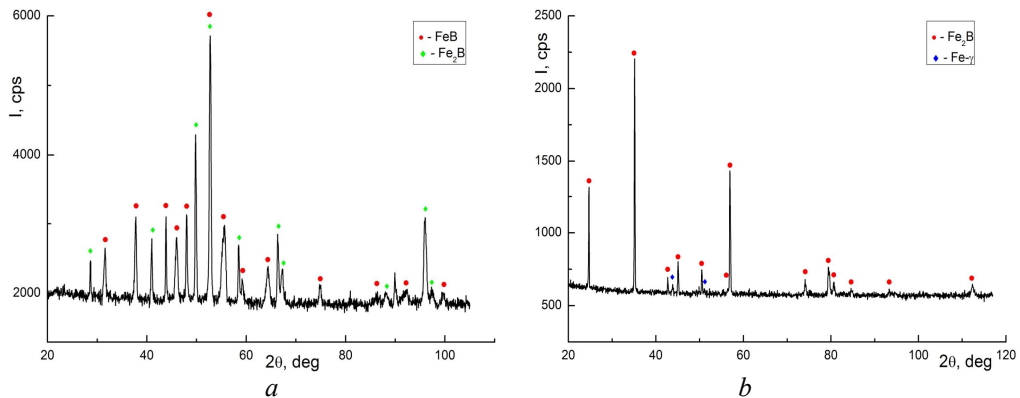


Рис. 4. Дифрактометричні дослідження зразків: *a* - змішана фаза FeB (Fe<sub>2</sub>B); *b* - фаза Fe<sub>2</sub>B.  
Fig. 4. Diffractometric studies of samples *a* - mixed phase FeB (Fe<sub>2</sub>B); *b* - Fe<sub>2</sub>B phase.

На рис. 5 приведена морфологія одержаного бориду заліза. Були зроблені металографічні шліфи зразків, виміряна їх мікротвердість на мікротвердомірі ПМТ-3 ( $H_{\mu} - \text{kg/mm}^2$  - навантаження 50 г, від центру зразка до краю з кроком 25  $\mu$ ), рис. 6. Мікротвердість зразків від центру підкладки у бік покриття зростає у 6 разів і становить  $1236 \text{ kg/mm}^2$ .

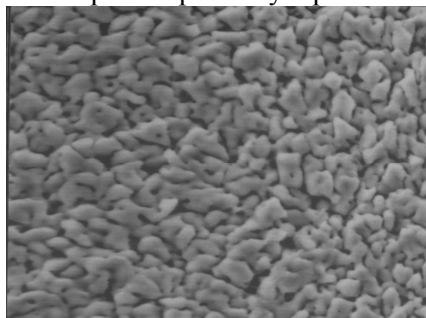


Рис. 5. Морфологія бориду заліза,  $\times 2400$ .  
Fig. 5. Morphology of iron boride,  $\times 2400$ .

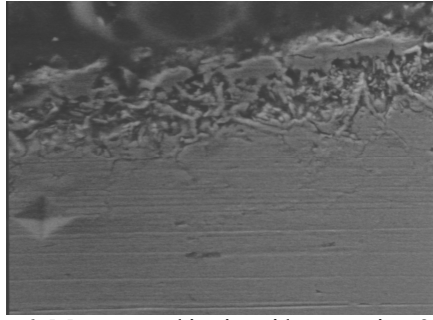


Рис. 6. Металографічні шліфи зразків,  $\times 2400$ .  
 Fig. 6. Metallographic sanding of specimens,  $\times 2400$ .

Експериментальні результати по визначенню величини ерозійного руйнування наведені на рис. 7. Для порівняння приведена кінетична крива руйнування еталона аустенітної сталі Х18Н10Т та зразків з покриттям на основі бориду заліза. Як видно з рис. 7 при тих же умовах випробувань характер кінетичних кривих різний. Зразки з покриттями на основі бориду заліза піддаються меншому кавітаційному зносу, ніж аустенітна сталь.

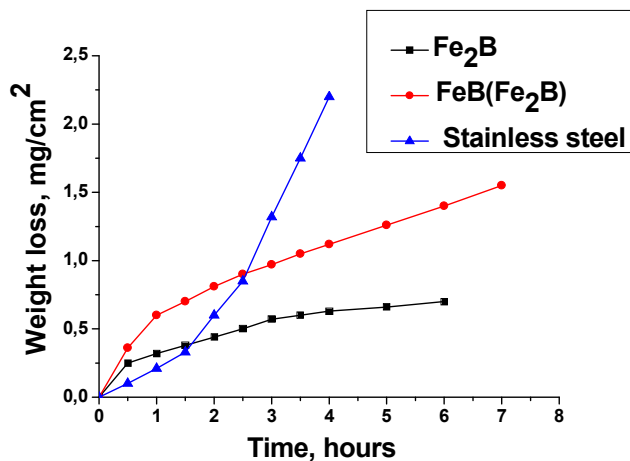


Рис. 7. Кінетика кавітаційного зносу зразків.  
 Fig. 7. Kinetic kinetics of sample wear.

## ВИСНОВКИ

За результатами проведених досліджень визначено параметри борування на імітуючих зразках внутрішньої поверхні заворотів трубопроводів. Кавітаційні випробування показали, що зразки з покриттями бориду заліза більш стійкі до ерозійного зносу, ніж матеріал підкладки. В подальшому одержані експериментальні дані сприятимуть нанесенню таких покриттів на внутрішню поверхню заворотів трубопроводів парогенераторів для захисту від кавітаційного зносу.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Kastner W., Erve M., Henzel N., Stellwag B. Erosion corrosion in power plant piping systems- calculation code for predicting wall thinning // International Atomic Energy Agency, Vienna (Austria). International Working Group on Reliability of Reactor Pressure Components. – 1990. – P. 49-59.
2. Чудаков М.В. Методы обеспечения надежности трубопроводов АЭС в условиях каплеударной эрозии. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург. 2005 г.
3. Маринін В.Г. Ерозія вакуумно-дугових покриттів при дії кавітації /: Препринт ХФТІ 2012-3. – Харків: ННЦ ХФТІ, 2012. – 59 с.