

УДК 620.193.16

**М. Стечишин, докт. техн. наук; О. Білецький, канд. техн. наук;  
А. Береговий; А. Мартинюк**

*Хмельницький національний університет*

## **КАВІТАЦІЙНО-ЕРОЗІЙНА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ЗМІЦНЕНИХ ПОВЕРХОНЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ В СЕРЕДОВИЩАХ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ**

*Резюме.* Розглянуто вплив термоциклічної обробки (ТЦО), іонного азотування і полімерних покриттів на кавітаційно-ерозійну зносостійкість конструкційних сталей. Отримані результати пояснюються фізико-механічними, електрохімічними характеристиками досліджених матеріалів з покриттями.

*Ключові слова:* зносостійкість, азотування, покриття, кавітація, ерозія.

**M. Stechishin, O. Bileckiy, A. Beregovoy, A. Martinyk**

## **CAVITATION-EROSION WEAR-RESISTANCE OF STRENGTHENED SURFACES OF STRUCTURAL STEELS IN THE FOOD-PROCESSING PRODUCTION MEDIUM**

*The summary.* To improve cavitation and erosion wear-resistance of metals methods of surface strengthening must be used. For this reason the paper studies the influence of thermo-cyclic treatment (TCT), ion nitriding and polymer coatings on cavitation and erosion wear-resistance of C 45, 15Cr3 and 41 Cr 4 steels.

Thermo-cyclic treatment of C 45, 15Cr3 and 41 Cr 4 steels was conducted using pendulum and medium-temperature approaches. Ion nitriding of normalized and thermo-cycled samples of C 45 and 41 Cr 4 steels was conducted taking advantage of hydrogen-free nitriding machine and in a nitrogen-argon mixture at 500 and 560°C. Coatings made of polypropylene PPR2 and fluorine plastic PTFE4 were sprayed on C 45 steel by the electrostatic method and colliquated in the furnace at the temperature 200...280 °C. The thickness of polymer coating was within 200...250 mkm.

Research on cavitation and erosion wear-resistance has been done taking advantage of the magnetic strictional pulsator (MSP) in neutral, acidic and alkaline environment (3% NaCl, serum and milk).

The results of the study have shown that TCT of structural steels improves the mechanical properties of plasticity, small-and multicyclic durability, corrosion resistance and, approximately by 35%, cavitation and erosion wear-resistance under the primary influence of corrosion damage factor.

The developed technology of low temperature nitriding of structural carbon steels increases their cavitation and erosion wear-resistance in 1.15, 1.63, 1.65 and 1.84 times in the 3% aqua of sodium chloride, serum, milk and lactic acid respectively, that is by 10...32% higher compared with the conventional methods of nitriding.

Polymer coating based on polypropylene and PTFE allow to increase in 2 times the cavitation and erosion wear-resistance of C 45 steel in a neutral (3% NaCl) and more than in 40 times - in acidic solutions.

Especially effective is the application of polymeric coverages in a sour environment, where the increase of cavitation firmness presents more than in 40 times. Thus application of fluoroplastic for making of cavitation firmness details increases their wearproofness more than in 50, and from a polypropylene – 60 times.

*Key words:* wear-resistance, nitriding, coverage, cavitation, erosion.

**Постановка проблеми.** Одним із перших і найважливіших методів підвищення кавітаційно-ерозійної стійкості деталей є раціональний вибір матеріалів та їх термообробка. Проведені дослідження показали [1, 2], що такий підхід забезпечує суттєве підвищення кавітаційної зносостійкості, особливо при врахуванні корозійної стійкості металу в заданому середовищі. Використання високолегованих нержавіючих сталей, титану та його сплавів дозволяє у понад 3 рази підвищити кавітаційну зносостійкість деталей обладнання в нейтральних, кислих і лужних середовищах харчових виробництв [1, 3].

Унаслідок того, що процеси руйнування при кавітаційному зношуванні розвиваються в тонких поверхневих шарах, доцільно забезпечити високу корозійну і кавітаційну зносостійкість саме цих шарів. Проведені дослідження показали [4], що кращими захисними властивостями в умовах кавітаційного руйнування поверхонь володіють карбідні покриття. Доцільним також є застосування іонного азотування конструкційних сталей і чавунів, зокрема, для підвищення кавітаційної зносостійкості в середовищах хлориду натрію [5]. Проведені дослідження [6] також вказують на перспективність застосування термоциклічної обробки (ТЦО) вуглецевих сталей для підвищення їх корозійної стійкості, кавітаційної зносостійкості з переважним впливом корозійного фактора руйнування і, частково, при багатоцикловому поверхневому корозійно-втомному руйнуванні при суттєвому впливі корозії на сумарний механо-хімічний знос.

З іншого боку, корозійна стійкість, а в багатьох випадках і повна хімічна інертність відносно агресивних середовищ зумовила інтерес дослідників і практиків до застосування полімерів для виготовлення деталей, що працюють в умовах тертя й кавітації. Попри ряд суттєвих переваг полімерів, їх застосування обмежується нижчими, порівняно з металами, фізико-механічними характеристиками та їх низькою температурною стійкістю. Поєднання переваг металевих сплавів і полімерів можна досягти шляхом нанесення на металеві поверхні полімерних покриттів [7].

Таким чином, у даній роботі розглядається питання впливу ТЦО, іонного азотування і полімерних покриттів на кавітаційно-ерозійну зносостійкість поверхонь конструкційних сталей.

**Методика проведення досліджень.** Для проведення кавітаційно-ерозійних випробувань використана установка з магнітострикційним вібратором (МСВ), у якій в ємності для робочих середовищ змонтовано два охолоджувальних контури з різнонаправленими витками спіралей [8]. При цьому температура поверхні зразків залишається постійною протягом усього часу проведення випробувань, а її відхилення знаходиться в межах  $\pm 2$  °С.

Термоциклічну обробку сталей 45, 15X і 40X проводили маятниковим і середньотемпературними способами. При маятниковій ТЦО зразки зі сталі 45 нагрівали до температури на 30...50 К, а для сталей 15X і 40X на 50...70 К вище точки  $A_{c1}$  і охолоджували на повітрі на 50...70 К нижче точки  $A_{r1}$  (точка  $A_{c1}$  відповідає перетворенню аустеніту в перліт при нагріванні, а точка  $A_{r1}$  зворотному перетворенню при охолодженні). Швидкість нагрівання становила 5,8...6,7 К/с, а охолодження – 2...6 К/с. Кількість циклів термообробки для сталі 45 становила  $n=4...6$ , а для сталей, легованих хромом, –  $n=7...9$  циклів.

Зразки зі сталей 15X і 40X при середньотемпературній ТЦО нагрівали до температур на 50...70 К вище точки  $A_{c1}$  і охолоджували до температур на 30...50 К нижче точки  $A_{r1}$  на повітрі, а остаточне охолодження проводили у воді.

Іонне азотування нормалізованих і термоцикльованих зразків сталей 45 і 40X проводили на установці безводневого азотування в азото-аргонному середовищі (75%  $N_2$  і 25% Ar) за режимами I і II. Для режиму I температура  $T=773$  К, робочий тиск у камері  $P=200$  Па; для режиму II  $T=833$  К,  $P=90$  Па. Час іонного азотування в обох випадках становив 6 год.

Полімерні покриття наносили на зразки зі сталі 45 нормалізованої. На шліфовану і знежирену поверхню електростатичним методом наносили шар полімеру при  $E=1,0$  кВ/см для поліпропілену і при  $E=2,0$  кВ/см для фторопласту Ф4 (тефлон). Час нанесення покриття становив  $\tau=5...10$  хв. У роботі [5] встановлено, що оптимальна товщина покриття на металах з точки зору антикорозійних властивостей складає 200...250 мкм. Тому товщина досліджуваних покриттів становила для поліпропілену близько 200 мкм, а для фторопласту – 250 мкм [9]. Вибір покриттів з поліпропілену ПП2 та фторопласту Ф4 ґрунтувався на результатах раніше проведених досліджень [8].

Дослідження кавітаційно-ерозійної зносостійкості проводили на установці з магнітострикційним вібратором (МСВ), яка комплектується ультразвуковим генератором УЗДН-А [6]. Температура робочого середовища підтримувалася в межах  $20\pm 2^\circ\text{C}$ , амплітуда коливань вібратора  $a=0,053$  мм, частота  $f=22$  кГц при потужності ультразвукового випромінювання генератора  $P=150$  Вт. Випробування проводили в нейтральному (3% розчин NaCl у дистильованій воді), кислому ( $Na_2HPO_4$ -10г/л +  $C_6H_8O_7$ -5г/л) та лужному ( $CaO$ -250г/л+15% цукрози від маси CaO) середовищах.

**Результати досліджень та їх обґрунтування.** Твердість сталей після маятникової ТЦО залишається практично незмінною порівняно з їх твердістю після нормалізації. Після середньотемпературної ТЦО твердість сталі 45 дещо збільшується. Твердість за Брінелем (НВ) зростає з 175 до 188 одиниць після середньотемпературної ТЦО, тобто приблизно на 7%. Аналогічне, незначне підвищення твердості у випадку середньотемпературної ТЦО отримали і для сталі 40X, яка становила близько 230 НВ після ТЦО і 215 НВ після нормалізації.

Аналіз механічних характеристик конструкційних сталей після ТЦО свідчить, що для сталей 45 і 40X границя міцності на розрив зменшується, але одночасно підвищуються характеристики пластичності: границя текучості  $\sigma_T$ , відносне видовження  $\delta$  і відносне звуження перерізу  $\psi$ . Відбувається також зближення характеристик міцності  $\sigma_B$  і  $\sigma_T$ , що є позитивним чинником для підвищення міцності металів. Найбільш структурно чутливою характеристикою виявилася ударна в'язкість руйнування  $a_H$ , яка суттєво підвищується в результаті маятникової (від 1,9 до 3,14) і середньотемпературної (від 2,4 до 3,87 раза) ТЦО. Аналіз отриманих даних вказує на те, що оптимальне число циклів для маятникової обробки сталі 45  $n_{opt}=5...6$  і  $n_{opt}=7...9$  для сталей 15X і 40X при маятниковій і середньотемпературній ТЦО. Саме за стабілізованим значенням ударної в'язкості знаходили для кожної сталі оптимальне число циклів термообробки  $n_{opt}$ , а далі інші механічні характеристики, що наведені в табл. 1. Власне аналогічний підхід рекомендовано в роботах [6, 10].

Дослідження малоциклової втоми показали (рис. 1), що найбільше значення границі витривалості маємо в лужному середовищі як для нормалізованих, так і для

термоцикльованих зразків, а найнижче значення – в кислому середовищі (яблучний сік). При цьому значення витривалості в лужному середовищі перевищують значення показників витривалості на повітрі. Підвищення малоциклової довговічності в лужному середовищі порівняно з довговічністю в нейтральному і кислому середовищах та на повітрі пояснюється утворенням гідроксидного шару на поверхні, який перешкоджає доступу кисню в зону деформації і нівелює розклинюючу дію оксидів.

Електрохімічні дослідження, зокрема аналіз поляризаційних кривих показав, що поряд зі зменшенням встановленого потенціалу в позитивну область для зразків після ТЦО, порівняно з нормалізованими, відбувається розширення пасивної зони. Пасивна зона для термоцикльованих зразків сталі 45 становить від -1,0 до +0,2 В у розчині хлориду натрію, не поступаючись корозійній стійкості нормалізованої сталі 45 у жорсткій воді. Крім того, в анодній і катодній областях поляризаційних кривих кут їх нахилу до осі абсцис для зразків після ТЦО менший, ніж для нормалізованих. Останнє свідчить про зменшення швидкості протікання корозійних процесів. Крім того, струми корозії для зразків сталі 45 після ТЦО порівняно з нормалізованими в 1,23 та 1,52 рази менші при випробуваннях у жорсткій воді й розчинах хлориду натрію [10].

Таблиця 1. Механічні характеристики сталей після ТЦО

Сталь	Маятникова ТЦО					Середньотемпературна ТЦО				
	$\sigma_B$	$\sigma_T$	$\delta$	$\psi$	$a_H \times 10^4$	$\sigma_B$	$\sigma_T$	$\delta$	$\psi$	$a_H \times 10^4$
	МПа		%		Дж/м <sup>2</sup>	МПа		%		Дж/м <sup>2</sup>
45	<u>592</u>	<u>357</u>	<u>20,4</u>	<u>45,6</u>	<u>68</u>	<u>592</u>	<u>537</u>	<u>20,4</u>	<u>45,6</u>	<u>68</u>
	524	364	25,6	58	132	586	377	24,0	57,8	163
15X	<u>550</u>	<u>375</u>	<u>27</u>	<u>57</u>	<u>73</u>	<u>550</u>	<u>375</u>	<u>27</u>	<u>57</u>	<u>73</u>
	573	402	31	62	147	580	408	34	64	212
40X	<u>865</u>	<u>515</u>	<u>10,6</u>	<u>44</u>	<u>81</u>	<u>865</u>	<u>515</u>	<u>10,6</u>	<u>44</u>	<u>81</u>
	802	520	13,7	69	254	816	529	12,5	78	314

Чисельник – нормалізація; знаменник – термоциклічна обробка.

Інтенсивні електрохімічні процеси розчинення сталей у кислому середовищі приводять до утворення великої кількості концентраторів напружень, які знижують втомну міцність як нормалізованих, так і термоцикльованих зразків (прямі 4 і 8 на рис. 1). У розчинах хлориду натрію з меншою, порівняно з кислим середовищем, корозійною активністю малоциклова довговічність сталі підвищується. Однак зі збільшенням амплітуди циклічної деформації вплив агресивності середовища на довговічність послаблюється і при  $\epsilon \geq 3,5\%$  для термоцикльованих і  $\epsilon \geq 3,0\%$  для нормалізованих зразків проходить зрівнювання їх довговічності на повітрі і в корозійному середовищі (рис. 1) [11].

Враховуючи втомну природу зношування, досліджували багатоциклову втомну довговічність термоцикльованих зразків у корозійно-активних середовищах. Як показали проведені дослідження (рис. 2), багатоциклова втомна витривалість сталі 40X

після середньотемпературної ТЦО порівняно з нормалізацією зростає на повітрі з  $\sigma_{-1}=160$  МПа до  $\sigma_{-1}=187$  МПа, тобто на 17%, а в розчинах хлориду натрію з  $\sigma_{-1}=124$  МПа до  $\sigma_{-1}=156$  МПа, або на 26%. Отримані результати можна пояснити тим, що при ТЦО зростає корозійна стійкість і це зростання тим вище, чим вища корозійна активність середовища. В результаті зменшується кількість “корозійних” центрів концентраторів напружень. Великий вплив на втомну витривалість, можливо основний, має підвищення характеристик пластичності сталей після ТЦО, а особливо ударної в’язкості (табл. 1).

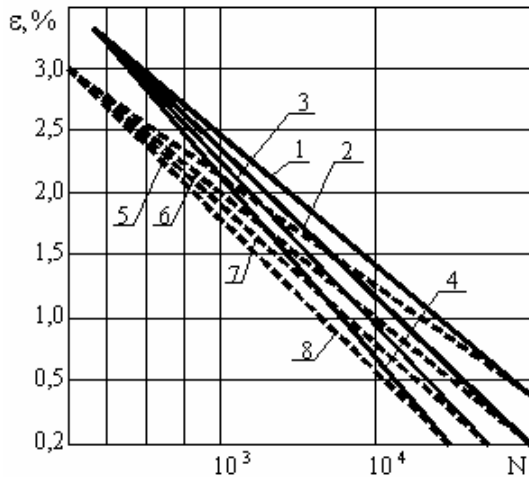


Рисунок 1. Малоциклова довговічність сталі 40X після маятникової ТЦО (1...4) і після нормалізації (5...8) в середовищах: 1,5 – лужне з рН 12; 2,6 – на повітрі; 3,7 – нейтральне (3%-вий розчин NaCl з рН7); 4,8 – кисле (яблучний сік з рН 4,5)

Figure 1. Short cyclic durability of steel 41 Cr 4 after circular TCT (1...4) and after normalization (5...8) in the environments: 1.5 – alkaline pH of 12, 2.6 – in the air; 3.7 – neutral (3% solution of NaCl solution with pH7); 4.8 – acid (apple juice with pH 4.5)

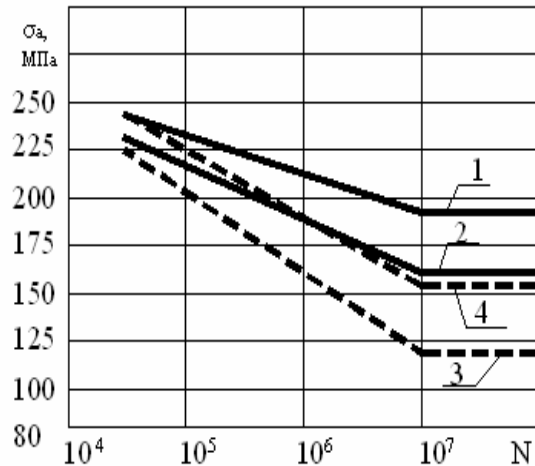


Рисунок 2. Багатоциклова витривалість сталі 40X на повітрі: після середньотемпературної ТЦО – 1, після нормалізації – 2 і в 3%-вому розчині NaCl: 3 – після нормалізації, 4 – після середньотемпературної ТЦО

Figure 2. Multicyclic wear resistance of 41 Cr 4 steel in the air: after medium-TCT – 1, after normalization – 2 and a 3% solution tural NaCl: 3 – after normalization, 4 – after medium temperature-TCT

При тривалому навантаженні (багатоциклова витривалість  $\sigma_a < \sigma_T$ ) і при малоциклової витривалості, особливо при  $\sigma_a > \sigma_T$ , вже з перших циклів навантаження дислокації утворюють скупчення. При дії зовнішнього напруження  $\sigma_a$  і сил взаємодії з іншими дислокаціями на ділянках скупчення дислокацій виникають напруження, що перевищують міцність на зсув – проходить порушення суцільності, виникнення мікротріщин. Мікротріщини утворюються в об’ємах металу, де густина дислокацій досягає критичного значення [11].

Таким чином, циклічна міцність металів пропорційна енергоємності їх поверхневих шарів, яка визначається енергією, що витрачається на деформацію і тріщиноутворення металу до моменту утворення магістральних тріщин руйнування. Для сталей після ТЦО енергія ударної в’язкості  $a_H$  значно більша (табл. 1) і відповідно тривалість циклу зміцнення поверхневих шарів значно довша, а сам цикл зміцнення – розміщення також триваліший у часі. Саме тому маємо вищі характеристики

витривалості зразків після ТЦО при їх випробуваннях на повітрі й у середовищі хлориду натрію. При цьому багатоциклова витривалість зразків на повітрі перевищує її значення в корозійно-активному середовищі як при нормалізації, так і при їх ТЦО. Відомо, що деформування і руйнування матеріалів при одночасній дії середовища, особливо корозійно-активного, проходить при значно менших механічних напруженнях [12–15].

Аналіз отриманих даних показує, що термоцикльовані зразки мають вищу корозійну стійкість у статичних умовах (без кавітації) порівняно з нормалізованими в жорсткій воді і в 3%-му розчині хлориду натрію. Струм корозії після ТЦО в жорсткій воді в 1,23, а в розчині хлориду натрію в 1,52 раза менший порівняно з нормалізованими зразками. Отже, ТЦО може бути ефективним методом для підвищення корозійної стійкості вуглецевих конструкційних сталей.

Також отримані дані вказують на те, що при амплітуді коливань вібратора 0,040 мм термоцикльовані й нормалізовані зразки в 3%-му розчині NaCl показали практично однакову кавітаційну стійкість. При зменшенні амплітуди коливань (зменшення жорсткості мікроударного навантаження) з 0,040 до 0,028 мм стійкість термоцикльованих зразків збільшилася в 1,35 раза порівняно з нормалізованими (3% NaCl). При дослідженнях у жорсткій воді термоцикльовані й нормалізовані зразки при амплітудах коливань вібратора 0,040 і 0,028 мм показали практично однакову стійкість.

Дослідженнями встановлено, що при азотуванні незалежно від складу газової суміші в поверхневих шарах сталі 40X утворюються  $\epsilon$ ,  $\gamma'$  і  $\alpha$ -фази. При цьому фазовий склад і співвідношення між фазовими структурами можна регулювати шляхом зміни параметрів азотування: температури азотування  $T, K$ ; тиску газової суміші  $p, Pa$ ; вмісту азоту в азото-аргонній суміші. Аналіз отриманих даних показує, що найсуттєвіше впливає на кількість утворення тієї чи іншої фази температура іонного азотування. З її зменшенням підвищується кількість  $\epsilon$ -фази і одночасно зменшується кількість  $\gamma'$  та  $\alpha$ -фаз.

Товщина нітридної зони в міру збільшення температури обробки, збільшення вмісту азоту в газовій суміші, а також з підвищенням вмісту вуглецю основи зростає. При іонному азотуванні за режимом I товщина нітридної зони на сталі 20 складає близько 0,007 мм, а на сталі 45 – 0,012 мм. У той же час зі збільшенням вмісту вуглецю основи, зменшується глибина дифузійного шару відповідно з 0,007 до 0,006 мм.

Зі збільшенням температури і часу азотування зростає глибина карбонітридної зони і загальна товщина дифузійної зони. Карбонітридна зона при збільшенні температури азотування на 30 K протягом 4 год збільшилася з 0,018 мм до 0,021 мм. При азотуванні протягом 4 год глибина дифузійної зони становила 0,21 мм, а протягом 6 год – 0,26 мм.

Аналіз поляризаційних кривих вказує на значне сповільнення корозійних процесів азотованих зразків порівняно з нормалізованими. На статичних кривих і при кавітації є ділянки пасивного стану, а поляризаційні криві неазотованих зразків мають більші кути нахилу до осі потенціалів, що є свідченням вищих швидкостей протікання анодних і катодних реакцій. Крім того, і в статиці, і в динаміці (кавітації) проходить зміщення рівноважного потенціалу в область більш додатних значень: від – 570 мВ для сталі 45 в статиці до – 390 мВ для цієї ж сталі після іонного азотування в 3%-му

розчині хлориду натрію. Останнє пояснюється утворенням на поверхні високоазотистої  $\epsilon$ -фази, яка має високу корозійну стійкість.

З іншого боку,  $\epsilon$ -фаза внаслідок високих внутрішніх напружень при її формуванні характеризується великою кількістю мікротріщин, мікропор та густиною дислокацій, що є центрами зародження втомних тріщин при циклічному кавітаційному мікроударному навантаженні в корозійно-активному середовищі. При зниженні температури азотування формування  $\epsilon$ -фази йде з меншою швидкістю, що призводить до зменшення кількості мікропор і мікротріщин. Тому низькотемпературне азотування зразків після попередньої термічної обробки проводили при температурах 773 К і 833 К (нижче точки  $A_{r1}$ ). Мікротвердість нітридної зони азотованих зразків сталі 40X за режимом I зросла з 210 до 234 HV, а за за режимом II – з 210 до 440 HV.

Застосування розробленого методу низькотемпературного іонного азотування сталі 40X (рис.3) дозволило підвищити кавітаційно-ерозійну зносостійкість порівняно з традиційним азотуванням в 1,15; 1,53; 1,65 і 1,84 раза в 3%-му розчині хлориду натрію, сироватці, молоці й молочній кислоті відповідно. Застосування розробленого способу низькотемпературного іонно-плазмового азотування дозволяє, залежно від режиму азотування і виду середовища, підвищити кавітаційну стійкість від 10 до 32% у порівнянні з відомими режимами азотування.

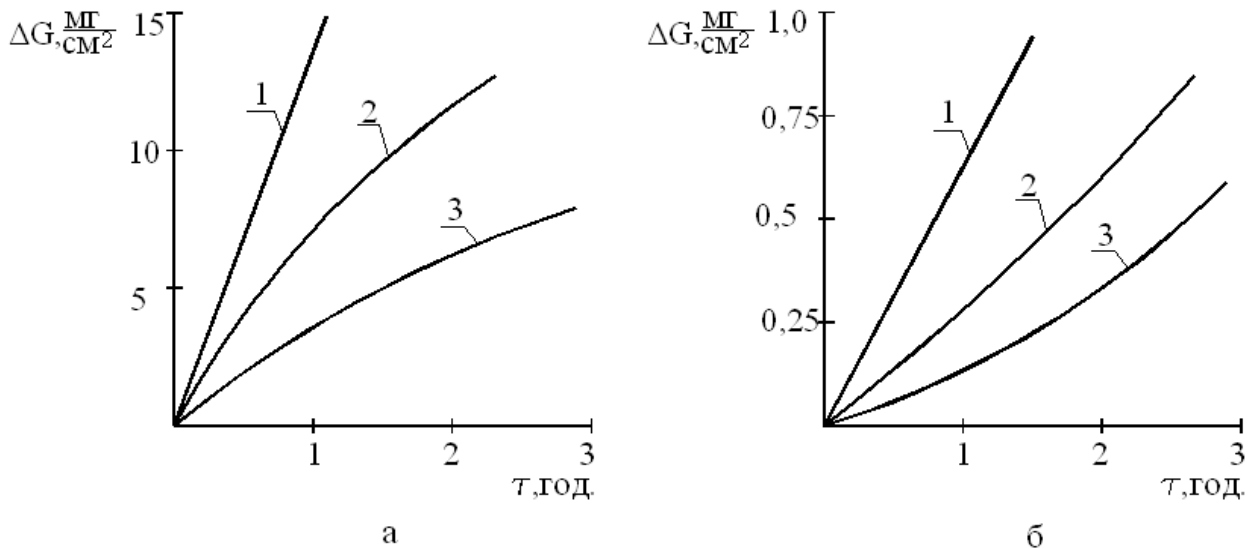


Рисунок 3. Втрати маси сталі 40X при кавітації : а – сироватка; б – молоко:  
1 – нормалізація; 2 – азотування; 3 – низькотемпературне азотування

Figure 3. Mass loss of steel 41 Cr 4 at cavitation: a – serum; b – milk:  
1 – normalization; 2 – nitriding; 3 – low temperature nitriding

Дослідження на кавітаційно-ерозійну зносостійкість поліпропілену та покриття на його основі показали (рис. 4а), що покриття на основі полімеру ПП2 мають дещо нижчу зносостійкість порівняно з поліпропіленом в усіх досліджених середовищах. За 2 год випробувань різниця зносостійкості становила 1,35; 1,38 та 1,45 раза відповідно у нейтральному, кислому та лужному середовищах. З продовженням часу кавітаційних випробувань різниця зносостійкості збільшується і за 3 год мікроударного навантаження становить 1,7; 1,68 та 1,51 раза. Очевидно, що причиною цього є різниця швидкостей проходження звукових хвиль у поліпропілені й сталій матриці, що

викликає появу відбитих хвиль, які інтенсифікують процес руйнування покриття. Крім того, швидкість руйнування поліпропілену зменшується, а покриття на його основі навпаки збільшується при продовженні часу мікроударного навантаження. Останнє пояснюється як зменшенням товщини покриття, так і структурними його змінами, що зумовлюють зменшення його пружних властивостей, а відтак призводять до збільшення енергії відбитих звукових хвиль (рис. 4а; криві 1<sup>1</sup>,2<sup>1</sup>,3<sup>1</sup>).

Для покриттів на основі фторопласту різниця в зносостійкості незначна порівняно зі зразками чистого фторопласту (рис. 4б) і становить за 3 год кавітації від 6 до 11% в усіх досліджених середовищах. Фторопласт є абсолютно нейтральним відносно досліджених середовищ і різниця в зносостійкості пояснюється лише фізичними параметрами середовищ, які зумовлюють енергетичні параметри ударних і відбитих хвиль при ультразвуковій кавітації і, отже, інтенсивність руйнування поверхонь.

Залежно від виду середовища досліджені покриття на сталі 45, нормалізованій по кавітаційно-ерозійній стійкості (за зростанням втрат маси), розміщуються в ряд: кисле, нейтральне і лужне середовище.

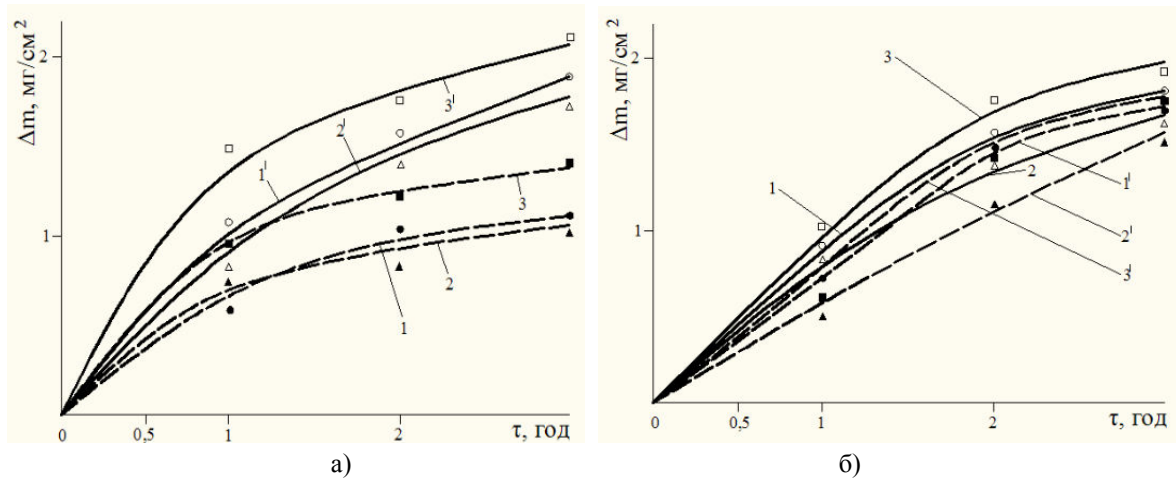


Рисунок 4. Кавітаційно-ерозійна стійкість: а – поліпропілену ПП2 1,2,3 та покриття на основі поліпропілену ПП2 на сталі 45 1<sup>1</sup>,2<sup>1</sup>,3<sup>1</sup>; б – фторопласту Ф4 1,2,3 та покриття на його основі 1<sup>1</sup>,2<sup>1</sup>,3<sup>1</sup> відповідно в нейтральному (1,1<sup>1</sup>), кислому (2,2<sup>1</sup>) та лужному середовищах (3,3<sup>1</sup>)

Figure 4. Cavity and erosion wear resistance: a – polypropylene PPR2 1,2,3 and coating based on polypropylene PPR2 on steel C 45 1<sup>1</sup>,2<sup>1</sup>,3<sup>1</sup>; b – 1,2,3 and F4 PTFE surface on the basis of 1<sup>1</sup>,2<sup>1</sup>,3<sup>1</sup> respectively, in neutral (1.1<sup>1</sup>), acidic (2.2<sup>1</sup>) and alkaline conditions (3.3<sup>1</sup>)

Аналіз даних (табл. 2) показує, що застосування полімерних покриттів для підвищення кавітаційно-ерозійної стійкості металевих сплавів є досить ефективним способом. У нейтральному середовищі покриття на основі поліпропілену ПП2 та фторопласту Ф4 дозволяють приблизно в 2 рази збільшити кавітаційну зносостійкість сталі 45 нормалізованої.

Таблиця 2. Втрати маси (мг/см<sup>2</sup>) при кавітаційно-ерозійному зношуванні за 3 год кавітації

Вид середовища	Матеріал				
	Сталь 45 нормалізована	Сталь 45 + ПП2	Поліпропілен ПП2	Сталь 45 + Ф4	Фторопласт Ф4
Нейтральне	3,62	1,89	1,11	1,82	1,72



Кисле	59,25*	1,78/1,23*	1,06/0,89*	1,67/1,34*	1,57/1,1*
Лужне	1,71	2,08	1,38	1,98	1,78

\* Втрати маси за 2 год кавітації.

Особливо ефективним є застосування полімерних покриттів у кислому середовищі, де збільшення кавітаційної стійкості становить більше ніж у 40 разів. При цьому застосування фторопласту для виготовлення кавітаційностійких деталей збільшує їх зносостійкість більш як у 50, а з поліпропілену – 60 разів.

**Висновки.** Підвищення ударної в'язкості, мало- і багатоциклової втоми, електрохімічних характеристик конструкційних сталей після ТЦО призводять до підвищення їх кавітаційно-ерозійної зносостійкості на 35% при амплітуді коливань вібратора  $a \leq 28$  мкм (ближче до зони багатоциклового поверхневого корозійно-втомного руйнування при суттєвому впливові корозії на сумарне механо-хімічне зношування).

Розроблена технологія низькотемпературного азотування конструкційних вуглецевих сталей і низьковуглецевих сталей збільшує їх кавітаційно-ерозійну зносостійкість в 1,15; 1,63; 1,65 і 1,84 раза в 3%-му розчині хлориду натрію, сироватці, молоці й молочній кислоті відповідно, що на 10...32% вище у порівнянні з традиційними способами азотування.

Полімерні покриття на основі поліпропілену та фторопласту дозволяють в 2 рази збільшити кавітаційно-ерозійну зносостійкість конструкційних сталей в нейтральному (3% NaCl) і більше як у 40 разів – у кислому розчинах.

**Conclusions.** The results of the study have shown that TCT of structural steel increases the wear resistance properties of plasticity, small-and multicyclic endurance, corrosion resistance approximately by 35% within the waveform of oscillator of  $\alpha \leq 28$  closer to the multicyclic area corrosion-exhaustion fracture with significant impact on the overall corrosion of mechanical and chemical wear resistance).

The developed technology of low temperature nitriding of structural carbon steels increases their cavity and erosion wear resistance by 1.15, 1.63, 1.65 and 1.84 times in the 3% aqua of sodium chloride, serum, milk and lactic acid respectively, that is 10 ... 32% higher compared to the traditional methods of nitriding.

Polymer coatings based on polypropylene and PTFE allow to increase the cavity and erosion wear-resistance of structural steels in the neutral solutions (3% NaCl) in 2 times and more than in 40 times in the acidic solutions.

### Список використаної літератури

1. Прейс, Г.А. Повышение износостойкости оборудования пищевой промышленности [Текст] / Г.А. Прейс, Н.А. Сологуб, А.И. Некоз. – М.: Машиностроение, 1979. – 208 с.
2. Фомин, В.В. Гидроэрозия металлов [Текст] / В.В. Фомин. – М.: Машиностроение, 1977. – 287 с.
3. Стечи шин, М.С. Кавітаційно-ерозійна зносостійкість титану та його сплавів у розчинах хлориду натрію [Текст] / М.С. Стечишин, М.В. Марченко // Вісник ТУП. – Хмельницький. – 2003. – №6. – Т1. – С.145–148.
4. Дубинин, Г.Н. О перспективах развития химико-термической обработки металлов [Текст] / Г.Н. Дубинин // Металловедение и термическая обработка металлов. – М., 2004. – № 7. – С.5–6.
5. Стечи шин, М.С. Довговічність деталей обладнання харчової промисловості при корозійно-механічному зношуванні: автореф. дис. ... докт. техн. наук. 05.02.04 / М.С. Стечишин; Технологічний університет Поділля. – Хмельницький, 1998. – 32с.

6. Федюкин, В.К. Термоциклическая обработка сталей и чугунов [Текст] / В.К. Федюкин. – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1977. – 144 с.
7. Белый, В.А. Полимерные покрытия [Текст] / В.А. Белый, В.А. Довгяло, О.Р. Юркевич. – Минск : Наука и техника, 1976. – 414с.
8. Стечи шин, М.С. Зносостійкість полімерних матеріалів при їх мікроударному навантаженні [Текст] / М.С. Стечишин, А.В. Мартинюк // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2008. – Вип. 49. – С. 104–113.
9. Стечи шин, М.С. Кавітаційно-ерозійна зносостійкість полімерних покриттів на металічних поверхнях в корозійно-активних середовищах [Текст] / М.С. Стечишин, О.О. Білецький, А.В. Мартинюк // Проблеми тертя та зношування: наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2010. – Вип. 52. – С.123–130.
10. Стечи шин, М.С. Вплив термоциклічної обробки на структуру і фізико-хімічні властивості конструкційних сталей [Текст] / М.С. Стечишин, А.І. Береговий // Вісник ХНУ. Технічні науки. – Хмельницький, 2007. – №1. – С.28–34.
11. Прокопенко, А.В. Методика испытаний компрессорных лопаток ГТД на усталость в коррозионной среде [Текст] / А.В. Прокопенко, В.Н. Торгов // Проблемы прочности. – 1980. – №4. – С.107–109.
12. Фридель, Ж. Дислокации: пер. с англ. [Текст] / Ж. Фридель. – М.: Мир, 1965. – 664с.
13. Гутман, Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии [Текст] / Э.М. Гутман. – М.: Металлургия, 1981. – 270с.
14. Карпенко, Г.В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов [Текст] / Г.В. Карпенко. – К.: Наукова думка, 1976. – 125 с.
15. Механізми руйнування вуглецевих сталей при мікроударному навантаженні в корозійно-активних середовищах [Текст] / М.С. Стечишин, М.В. Лук'янюк, В.П. Терещенко, А.І. Береговий // Вісник ХНУ. – 2007. – №1. – С.34–44.

*Отримано 10.01.2012*