

**Стечишин М.С.,  
Форкун В.В.,  
Береговий А.І.,  
Білик Ю.М.**

Хмельницький національний університет,  
м. Хмельницький, Україна

## ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ЗМІЦНЕНИХ ПОВЕРХОНЬ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ В КОРОЗІЙНО-АКТИВНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

### 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. Так, використання високолегованих нержавіючих сталей, титану та його сплавів дозволяє більше ніж в 3 рази підвищити кавітаційну зносостійкість деталей обладнання в нейтральних, кислих і лужних середовищах харчових виробництв [1, 3].

Внаслідок 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 мають 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 з погляду підвищення їх корозійної стійкості, кавітаційної зносостійкості з переважним впливом корозійного фактора руйнування і, частково, при багатому цикловому поверхневому корозійно-втомному руйнуванню при суттєвому впливі корозії на сумарний механо-хімічний знос.

З іншого боку корозійна стійкість, а в багатьох випадках і повна хімічна інертність по відношенню до агресивних середовищ, зумовила інтерес дослідників і практиків до застосування полімерів для виготовлення деталей, що працюють в умовах тертя та 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, в 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 рівнонаправленими витками спіралей [8]. При цьому, температура поверхні зразків залишається постійною на протязі всього часу проведення випробувань, а її відхилення знаходиться в межах  $\pm 2$  °С.

Термоциклічну обробку сталей 45, 15Х і 40Х проводили «маятниковим» і середньо температурними способами. При «маятниковій» ТЦО зразки із сталі 45 нагрівали до температури на 30 ... 50 °С, а для сталей 15Х і 40Х на 50 ... 70 °С вище точки  $A_{c1}$  і охолоджували на повітрі на 50 ... 70 °С нижче точки  $A_{r1}$ . Швидкість нагрівання становила 5,8 ... 6,7 °К/с, а охолодження – 2 ... 6 °К/с. Кількість циклів термообробки для сталі 45 становила 4 ... 6, а для сталей, легованих хромом – 7 ... 9 циклів.

Зразки із сталей 15Х і 40Х при «маятниковій» і середньо температурній ТЦО нагрівали до температур на 50 ... 70 °С вище точки  $A_{c1}$  і охолоджували до температур на 30 ... 50 °С нижче точки  $A_{r1}$  на повітрі, а при середньо температурній ТЦО остаточне охолодження проводили у воді.

Іонне азотування нормалізованих і термоцикльованих зразків сталей 45 і 40Х проводили на установці безводневого азотування в азото-аргонному середовищі (75 %  $N_2$  і 25 %  $Ar$ ) за режимами I і II. Для режиму I: температура  $t = 500$  °С, робочий тиск в камері  $P = 200$  Па і для режии II:  $t = 560$  °С,  $P = 90$  Па. Час іонного азотування в обох випадках 6 год.

Полімерні покриття наносили на зразки зі сталі 45 нормалізованої. На шліфовану і обезжирену 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  $\tau = 5 \dots 10$  хв. В 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 біля 200 мкм, а для фторопласту – 250 мкм [5]. Вибір покриттів з поліпропілену ПП2 та фторопласту Ф4 ґрунтувався на результатах раніше проведених досліджень [6].

Електростатичний метод нанесення полімерних покриттів є найбільш поширений внаслідок можливості формування рівномірного покриття, товщину якого можна регулювати в широких межах. У

ванні (робочій камері) вібровихровим методом створюється кип'ячий шар, який знаходиться під дією коронного розряду електричного поля високої напруги. В зоні корони проходить іонізація повітря з передачею електричного заряду аерозольним частинкам. При розміщенні в кип'ячому шарі заземленого холодного зразка на його поверхні під дією електричних сил осідають негативно заряджені частинки полімеру. Після чого покриття обплавлюється в муфельній печі при температурі  $t = 200 \dots 210$  °C для поліпропілену ПП2, та  $t = 250 \dots 280$  °C для фторопласту Ф4 [5].

Дослідження кавітаційно-ерозійної зносостійкості проводили на установці з магнітострикційним вібратором (МСВ), яка комплектується ультразвуковим генератором УЗДН-А [6]. Температура робочого середовища підтримувалася в межах  $20 \pm 2$  °C, амплітуда коливань вібратора  $a = 53$  мкм, частота  $f = 22$  кГц при потужності ультразвукового випромінювання генератора  $P = 150$  Вт. Випробування проводили в нейтральному середовищі (3 %-розчин NaCl в дистильованій воді), кислому ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4 - 10$  г/л +  $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 - 5$  г/л) та лужному ( $\text{CaO} - 250$  г/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. Так, 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 дістає і для сталі 40X, яка становила біля 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 з точки зору 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 разів) ТЦО. Аналіз отриманих даних вказує на те, що оптимальне число циклів для маятникової обробки сталі 45  $n_{opt} = 5 \dots 6$  і  $n_{opt} = 7 \dots 9$  для сталей 15X і 40X при маятниковій і середньотемпературній ТЦО. Саме за стабілізованим значенням ударної в'язкості знаходили для кожної сталі  $n_{opt}$ , а далі інші механічні характеристики, що наведені в табл. 1. Власне аналогічний підхід рекомендовано в роботах [1, 2].

Дослідженнях малоциклової втоми показало (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, кислому середовищах та на повітрі пояснюється утворенням гідроксидного шару на поверхні, який перешкоджає доступу кисню в зону деформації і нівелює розклинюючу дію оксидів.

Таблиця 1

### Механічні характеристики сталей після ТЦО

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

Чисельник – нормалізація; знаменник – термоциклічна обробка.

Електрохімічні дослідження, зокрема аналіз поляризаційних кривих показав, що поряд із зміцненням встановленого потенціалу в позитивну область для зразків після ТЦО, порівняно з нормалізованими, відбувається розширення пасивної зони. Так, 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 в жорсткій воді. Крім того, в анодній і катодній областях поляризаційних кривих кут їх нахи-

лу 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 менші при випробуваннях в жорсткій воді і розчинах хлориду натрію [2].

Інтенсивні електрохімічні процеси розчинення сталей в 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). В 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) [4, 7, 8].

Враховуючи втомну природу зношування досліджували багатоциклову втомну довговічність термоцикльованих зразків в корозійно – активних середовищах. Як показали проведені дослідження (рис. 2) багатоциклова втомна витривалість сталі 40X після середньотемпературної ТЦО порівняно з нормалізацією зросла на повітрі з  $\sigma_{-1} = 160\text{МПа}$  до  $\sigma_{-1} = 187\text{МПа}$ , тобто на 17 %, а в розчинах хлориду натрію з  $\sigma_{-1} = 124\text{МПа}$  до  $\sigma_{-1} = 156\text{МПа}$ , 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).

При циклічному навантаженні зразків в рідкому середовищі відповідно з гідродинамічною теорією поширення ударних хвиль, ударно – хвильові явища в значній мірі визначають інтенсивність і співвідношення пружної і пластичної деформації поверхневих шарів металів. Вплив середовища при цьому проявляється в зміні поверхневої енергії металу, що утруднює або полегшує розрядку дислокацій в поверхневому шарі.

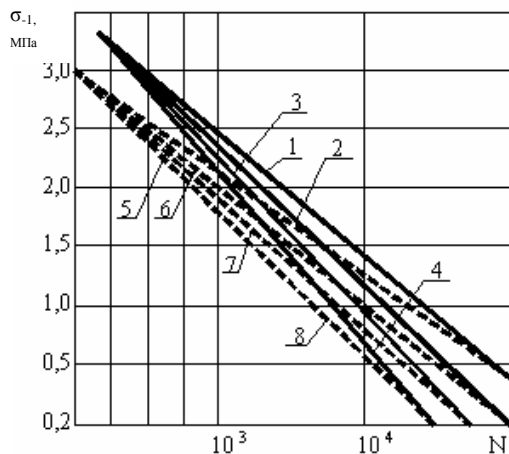


Рис. 1 – Малоциклова довговічність сталі 40X після маятникової ТЦО (1 ... 4) і після нормалізації (5 ... 8) в середовищах: 1, 5 – лужне з РН = 12; 2, 6 – на повітрі; 3, 7 – нейтральне (3% - ний розчин NaCl з РН7); 4, 8 – кисле (яблучний сік з РН 6,5)

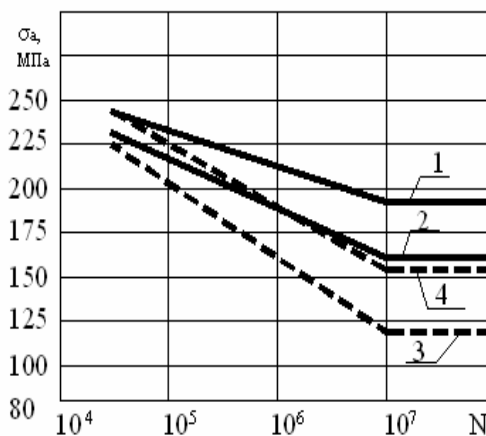


Рис. 2 – Багатоциклова витривалість сталі 40X на повітрі: після середньотемпературної ТЦО – 1, після нормалізації – 2 і в 3% - ному розчині NaCl: 3 – після нормалізації, 4 – після середньо-температурної ТЦО

При тривалому навантаженні (багатоциклова витривалість  $\sigma_a \ll \sigma_m$ ) і при малоцикловій витривалості, особливо при  $\sigma_a > \sigma_m$ , вже з перших циклів навантаження дислокації утворюють скупчення. При дії зовнішнього напруження  $\sigma_a$  і сил взаємодії з іншими дислокаціями, в головці скупчення виникають напруження, що перевищують міцність на зсув – проходить порушення суцільності, виникнення мікротріщин. Мікротріщини утворюються в об’ємах металу, де густина дислокацій досягає критичного значення [5]. Утворення мікротріщин сприяє стоку до них дислокацій, викликаючи розміщення шару. Кількість мікротріщин з часом зростає, що приводить до більш інтенсивного розміщення внаслідок зменшення довжини пробігу дислокацій. При цьому переміщення скупчень дислокацій до мікротріщин може відновити діяльність раніше не працюючих джерел дислокацій, що викликає зростання густини лінійних дефектів і зменшення швидкості розміщення [5].

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 – розміцнення також триваліший у часі. Саме тому маємо вищі характеристики витривалості зразків після ТЦО при їх випробуваннях на повітрі і в 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 середовища, проходить при значно менших механічних напруженнях [6, 7].

Дослідження проведені методом ФМР показали [8], що при випробуваннях в розчинах хлориду натрію різної концентрації спостерігається зменшення, порівняно з випробуванням у воді, максимуму розширення лінії ФМР, а також зміна кінетики зміцнення і розміцнення.

Значне зменшення максимальної густини дислокацій в розчинах хлориду натрію пов'язане, очевидно, з пониженням енергії поверхневого бар'єру при адсорбції на поверхні металів хлор – іонів і полегшення виходу дислокацій на поверхню. Тому і знижуються характеристики довговічності сталей при малоцикловому і багатоцикловому навантаженні не лише в розчинах хлориду натрію, але і в кислому середовищі.

Кавітаційно-ерозійна стійкість визначалася за втратами маси зразків шляхом зважування на аналітичних вагах. Результати досліджень усереднювались за значеннями 3 ... 5 дослідів. Коефіцієнт варіації відхилення даних – 12 %.

Аналіз отриманих даних (табл. 2) показує, що термоцикльовані зразки мають вищу корозійну стійкість в 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 рази менший порівняно з нормалізованими зразками. Отже, ТЦО може бути ефективним методом для підвищення корозійної стійкості вуглецевих конструкційних сталей.

Таблиця 2

**Вплив маятникової ТЦО на кавітаційно-ерозійну і корозійну стійкість сталі 45**

Середовище	Амплітуда, мкм	Кількість термоциклів	Струм корозії, мА/см <sup>2</sup>	Витрати маси, мг/см <sup>2</sup>
3% NaCl	0*	нормалізація	0,0079	-
"-	0*	5	0,0052	-
жорстка вода	0*	нормалізація	0,0037	-
"-	0*	5	0,0030	-
3% NaCl	40	нормалізація	-	12,0
"-	40	5	-	11,8
"-	28	нормалізація	-	4,2
"-	28	6	-	3,2
жорстка вода	40	нормалізація	-	4,8
"-	40	6	-	4,8
"-	40	6	-	4,7
"-	28	8	-	2,4
"-	28	нормалізація	-	2,6
"-	28	6	-	2,5

0\* – без накладання ультразвукових коливань (статика)

Також отримані дані вказують на те, що при амплітуді коливань вібратора 40 мкм термоцикльовані і нормалізовані зразки в 3 % - му розчині NaCl показали практично однакову стійкість. При зменшенні амплітуди коливань (зменшення жорсткості мікроударного навантаження) з 40 до 28 мкм стійкість термоцикльованих зразків збільшилась в 1,35 рази порівняно з нормалізованими (3 % NaCl). При дослідженнях в жорсткій воді, термоцикльовані і нормалізовані зразки при амплітудах коливань вібратора 40 і 28 мкм показали практично однакову стійкість (табл. 2).

Дослідженнями встановлено, що незалежно від складу газової атмосфери в поверхневих шарах сталі 40X утворюються  $\epsilon$  ( $F_{12-3}N$ ),  $\gamma'$  ( $F_{14}N$ ) і  $\alpha$ -фази ( $F_{16}N_2$ ). При цьому фазовий склад і співвідношення між фазовими структурами можна регулювати шляхом зміни параметрів азотування: температури азотування  $T$ ,  $K$ ; тиску газової суміші  $p$ , Па; вмісту азоту в азото-аргонній суміші. Аналіз отриманих даних показує, що найбільш суттєво впливає на кількість утворення тієї чи іншої фази температура іонного азотування. Так, з її зменшенням підвищується кількість  $\epsilon$ -фази і одночасно зменшується кількість  $\gamma'$  та  $\alpha$ -фаз.

Товщина нітридної зони по мірі збільшення температури обробки, збільшення вмісту азоту в газовій суміші, а також з підвищенням вмісту вуглецю зростає. Так, при іонному азотуванні за режимом I товщина нітридної зони на сталі 20 складає біля 7 мкм, а на сталі 45 – 12 мкм. У той же час зі збільшенням вмісту вуглецю основи, зменшується глибину дифузійного шару, відповідно, з 0,7 до 0,6 мкм.

Зі збільшенням температури і часу азотування зростає глибина карбонітридної зони і загальна товщина дифузійної зони. Карбонітридна зона при збільшенні температури азотування на 30 К протягом 4 год збільшилася з 18 мкм до 21 мкм. При азотуванні протягом 4 год глибина дифузійної зони становила 0,21 мм, а протягом 6 год – 0,26 мм.

Аналіз поляризаційних кривих показує значне сповільнення корозійних процесів азотованих зразків, порівняно з нормалізованими. На кривих знятих в статичі і при кавітації є ділянки пасивного стану (рис. 3), а поляризаційні криві неазотованих зразків мають більші кути нахилу до осі потенціалів, що є свідченням більш високих швидкостей протікання анодних і катодних реакцій. Крім того, і в статичі, і в динаміці (кавітації) проходить зміщення рівноважного потенціалу в область більш додатніх значень: від – 570 мВ для сталі 45 в статичі 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.

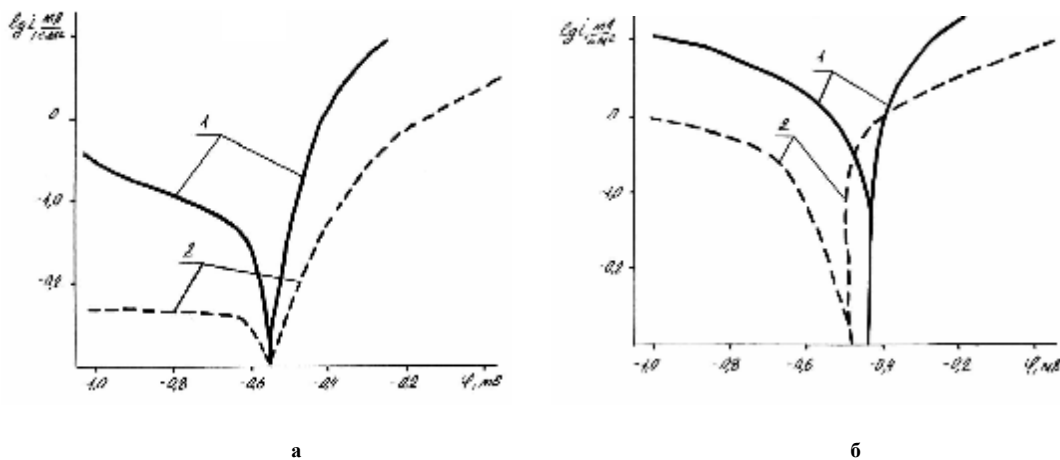


Рис. 3 – Поляризаційні криві сталі 45 в статичі (а) і при кавітації (б) в 3%-му розчині хлориду натрію: 1 – зразок нормалізований; 2 – зразок азотований

З іншої сторони,  $\epsilon$ - 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 веде до зменшення кількості мікропор і мікротріщин. Тому низькотемпературне азотування зразків після попередньої термічної обробки проводили при температурах 500 °C і 560 °C (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.

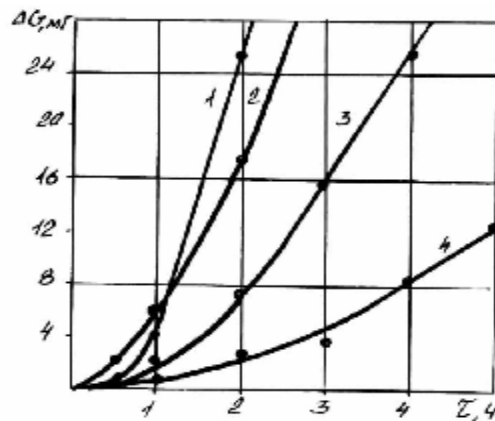


Рис. 4 – Втрати маси сталей 20 (1) і 45 (2) після нормалізації і (3, 4) після іонного азотування (3 % - вий розчин хлориду натрію)

Величина встановлених потенціалів азотованих зразків також зміщуються в сторону більш додатніх значень, що є ознакою підвищення корозійної стійкості. Для азотованих поверхонь сталі 45 величина встановленого потенціалу  $\Phi_{вст}$  в 3% - му розчині хлориду натрію знаходиться за рівнянням:

$$\Phi_{вст} = -182,4 - 0,9t + 0,2CN_2 + 0,04p, \quad (1)$$

де  $t$ ,  $CN_2$ ,  $p$  – температура, вміст азоту в газовій суміші і її тиск відповідно.

Аналіз кривих кавітаційного зношування (рис. 4) азотованих зразків порівняно з нормалізованими, показав значне підвищення (для сталі 20 в 4,7; сталі 45 в 5,3 рази) зносостійкості в 3%-му розчині хлориду натрію за 3 год. випробувань на МСВ, що пояснюється підвищенням корозійної стійкості і підвищенням характеристик міцності поверхневих шарів.

Застосування розробленого методу низькотемпературного іонного азотування сталі 40Х (рис. 5) дозволило підвищити кавітаційно-ерозійну зносостійкість порівняно з традиційним азотуванням в 1,15; 1,53; 1,65 і 1,84 рази в 3%-му розчині хлориду натрію, сироватці, молоці і 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.

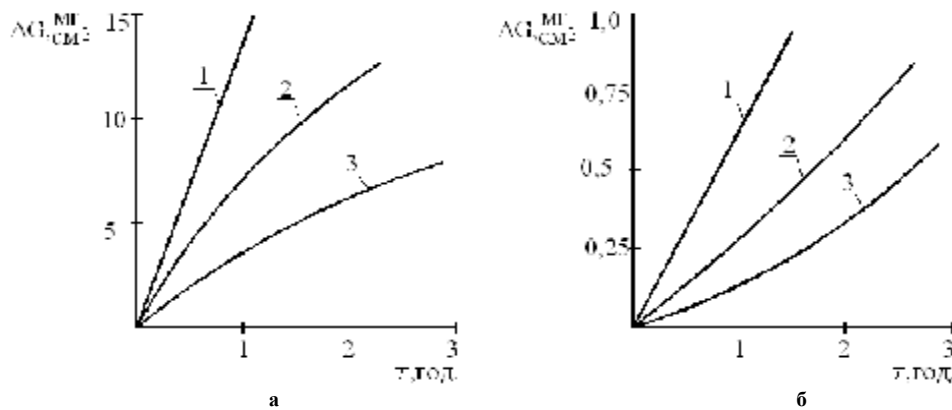


Рис. 5 – Втрати маси сталі 40Х при кавітації:  
а – сироватка; б – молоко:  
1 – нормалізація; 2 – азотування; 3 – низькотемпературне азотування

Дослідження на кавітаційно-ерозійну зносостійкість поліпропілену та покриття на його основі показали (рис. 6, а), що покриття на основі полімеру ПП2 мають дещо нижчу зносостійкість порівняно з поліпропіленом в усіх досліджених середовищах. Так, за 2 год випробувань різниця зносостійкості становила 1,35; 1,38 та 1,45 разів, відповідно, у нейтральному, кислому та лужному середовищах. З продовженням часу кавітаційних випробувань різниця в зносостійкості збільшується і за 3 год мікроударного навантаження становить 1,7; 1,68 та 1,51 разів.

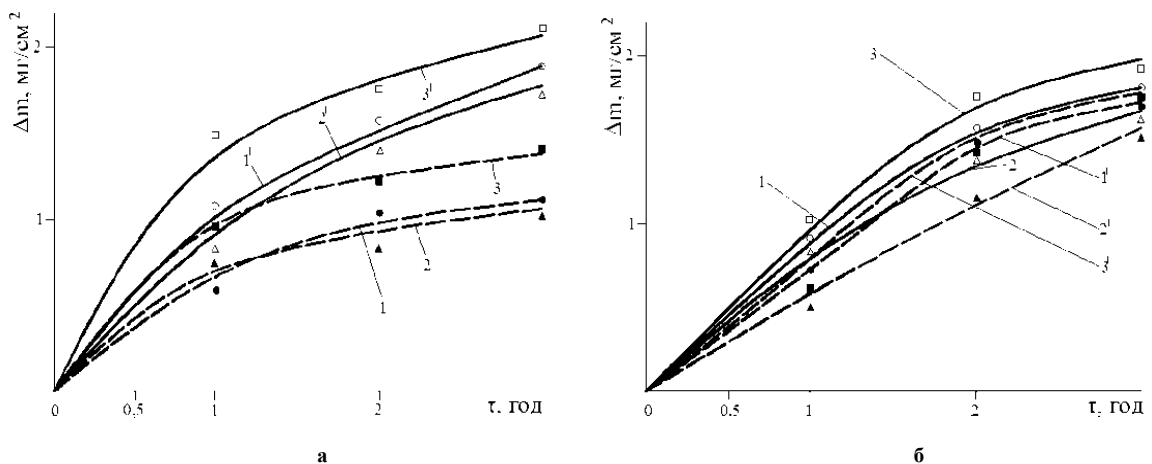


Рис. 6 – Кавітаційно-ерозійна стійкість:  
а – поліпропілену ПП2 1, 2, 3 та покриття на основі поліпропілену ПП2 на сталі 45 1<sup>1</sup>, 2<sup>1</sup>, 3<sup>1</sup>;  
б – фторопласту Ф4 1, 2, 3 та покриття на його основі 1<sup>1</sup>, 2<sup>1</sup>, 3<sup>1</sup>, відповідно, в нейтральному (1, 1<sup>1</sup>),  
кислому (2, 2<sup>1</sup>) та лужному середовищах (3, 3<sup>1</sup>)

Очевидно, що причиною цього є різниця швидкостей проходження звукових хвиль в поліпропілені і в сталевій матриці, що викликає появу відбивних 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 обумовлюють зменшення його пружних властивостей, а відтак приводять до збільшення енергії відбивних звукових хвиль (рис. 6, а; криві 1<sup>а</sup>, 2<sup>а</sup>, 3<sup>а</sup>).

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

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

Аналіз даних (табл. 3) показує, що застосування полімерних покриттів для підвищення кавітаційно-ерозійної стійкості металевих сплавів є досить ефективним способом. Так, в нейтральному середовищі покриття на основі поліпропілену ПП2 та фторопласту Ф4 дозволяють приблизно в 2 рази збільшити кавітаційну зносостійкість сталі 45 нормалізованої.

Таблиця 3

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

Для оцінки довговічності деталей важливе значення має кінетика зношування робочих поверхонь деталей. Аналіз кривих втрат маси в кислому середовищі (рис. 7, а) показує катастрофічне руйнування сталі 45 в кислому середовищі (крива 1 на рис. 2, а) і значне збільшення стійкості при застосуванні полімерних покриттів на основі поліпропілену і фторопласту (криві 2 і 3 на рис. 7, а). Покриття з поліпропілену і фторопласту показують практично однакову зносостійкість в кислому середовищі, а найбільш зносостійкими є деталі з поліпропілену (крива 4 на рис. 7, а). Важливим є також те, що крива кінетики зношування поліпропілену має затухаючий характер, що вказує на зменшення інтенсивності руйнування зі збільшенням часу мікроударного навантаження.

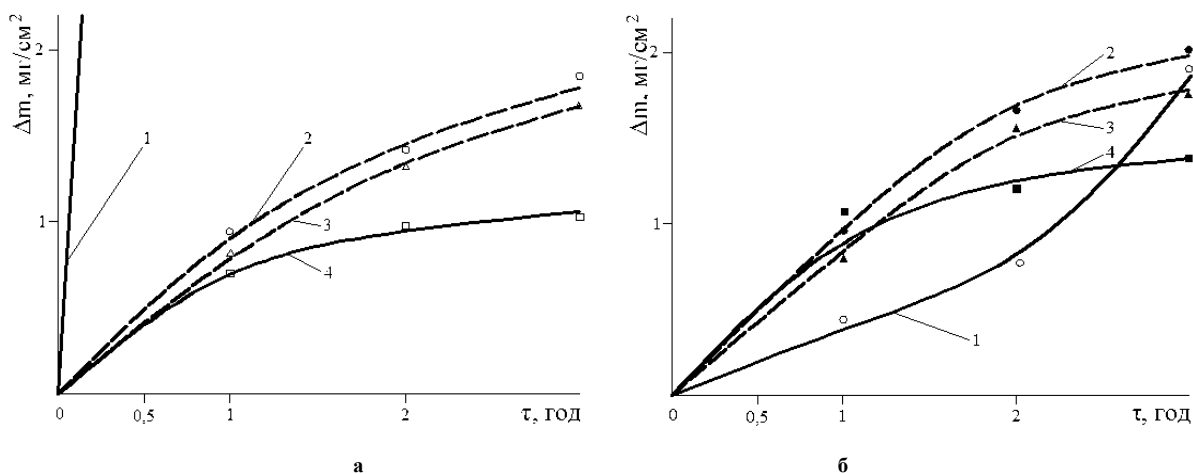


Рис. 7 – Кавітаційно-ерозійна стійкість:

- а) 1 – сталь 45 нормалізована; 2 – сталь 45 норм. + покриття з поліпропілену;  
3 – сталь 45 + покриття з фторопласту Ф4; 4 – поліпропілен в кислому середовищі;  
б) 1 – сталь 45 нормалізована; 2 – сталь 45 норм. + покриття із фторопласту Ф4; 3 – фторопласт Ф4;  
4 – поліпропілен ПП2 в лужному середовищі

Більш складний і суперечливий характер мають криві кінетики втрат маси сталі 45 нормалізованої, полімерних покриттів на сталі та самих полімерів при їх кавітаційному руйнуванні в лужному середовищі (рис. 7, б). На початку випробувань сталь 45 нормалізована має значно менші втрати маси аніж полімерні покриття, а після 2 год кавітації процес зношування різко прискорюється і набуває катастрофічного характеру (крива 1 на рис. 7, б). В той же час, швидкості руйнування покриття на основі фторопласту (крива 2 на рис. 7, б) та фторопласту (крива 3 на рис. 7, б) зменшується зі збільшенням часу мікроударного навантаження. Найбільш ефективним кавітаційностійким матеріалом (крива 4 на рис. 7, б) є поліпропілен ПП2, який дозволяє на 26 % збільшити стійкість деталей в лужному середовищі, порівняно з деталями з фторопласту Ф4.

### Висновки

1. Підвищення кавітаційно-ерозійної зносостійкості розробленим способом низькотемпературного іонно-плазмового азотування сталей 45 і 40Х досягається внаслідок підвищення корозійної стійкості, зменшення пористості  $\varepsilon$  - фази та внутрішніх напружень нітридної зони покриття.

2. Виявлені закономірності формування фазового складу покриття, співвідношення між ними залежно від режимів азотування дозволяють не лише прогнозувати кавітаційну стійкість зміцнених конструкційних сталей, але і закладати довговічність роботи деталей на стадії їх проектування.

3. Покриття на основі поліпропілену та фторопласту дещо поступаються по кавітаційно-ерозійній стійкості поліпропілену та фторопласту, але є ефективним захистом металевих поверхонь від руйнування в нейтральних, кислих та лужних середовищах.

4. Досліджені покриття в 2 рази збільшують кавітаційно-ерозійну стійкість металевих поверхонь в нейтральних і більш як в 40 разів в кислих середовищах. 3. Найбільш ефективним для експлуатації в лужних середовищах є кавітаційностійкі деталі із поліпропілену, а при великих механічних навантаженнях із фторопласту.

### Література

1. Преис Г.А. Повышение износостойкости оборудования пищевой промышленности / Г.А. Преис, Н.А. Сологуб, А.И. Некоз. – М.: Машиностроение, 1979. – 208 с.
2. Фомин В.В. Гидроэрозия металов. М.: Машиностроение, 1977. – 287 с.
3. Важенин С.Ф. Титан для оборудования пищевой промышленности / С.Ф. Важенин, В.Г. Крючек, В.М. Максименко. – К.: Техніка, 1973. – 232 с.
4. Куликовский Е.А. Повышение кавитационной стойкости железо-углеродистых сплавов химико-термической обработкой: Автореф. дис. канд. тех. Наук. – Минск, 1975. – 21 с.
5. Стечишин М.С. Довговічність деталей обладнання харчової промисловості при корозійно-механічному зношуванні: Автореф. дис. докт. техн. наук. – Хмельницький, 1998. – 32 с.
6. Федюкин В.К. Термоциклическая обработка сталей и чугунок. – Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1977. – 144 с.
7. Белый В.А. Полимерные покрытия / В.А. Белый, В.А. Довгяло, О.Р. Юркевич. – Минск: Наука и техника. – 1976. – 414 с.
8. Стечишин М.С. Зносостійкість полімерних матеріалів при їх мікроударному навантаженні / М.С. Стечишин, А.В. Мартинюк. – Проблеми тертя та зношування: Наук.-техн. зб. – К.: НАУ, 2008. – Вип.49. – С. 123-130.
9. Сухарев Э.А. Технология и свойства защитных покрытий в машинах. – Ровно: УГУВХП. – 2004. – 182 с.
10. Стечишин М.С., Береговой А.І. Вплив термоциклічної обробки на структуру і фізико-хімічні властивості конструкційних сталей // Вісник ХНУ. Технічні науки: Хмельницький – 2007. – № 1. – С. 28-34.
11. Прокопенко А.В., Торгов В.Н. Методика испытаний компрессорных лопаток ГТД на усталость в коррозионной среде // Проблемы прочности. – 1980. – № 4 – С. 107-109.
12. Фридель Ж. Дислокации: Пер. с англ. – М.: Мир, 1965 – 664 с.
13. Гутман Э.М. Механохимия металлов и защита от коррозии. – М.: Металлургия, 1981. – 270 с.
13. Карпенко Г.В. Влияние среды на прочность и долговечность металлов. – К.: Наукова думка, 1976. – 125 с.
14. Стечишин М.С., Некоз А.И., Погодаев А.И. Закономерности кавитационно-эрозионного изнашивания металлов в коррозионных средах // Трение и износ. – 1990. – Т. 11, № 3. – С. 454-463.

Надійшла 14.07.2011