

ДЕЯКІ КОРПУСНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ МОРСЬКИХ ОБ'ЄКТІВ

Мелехов Р.К., Круцан Г.М. (Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАНУ, Львів, Україна), **Тубілевич К.** (Політехніка Ченстоховська, Польща)

This paper present problem of development and implementation of high strength low-alloy weldable steels and titanium alloys in the submarine building. The susceptibility to SCC in sea water of these so-called sorbitic-hardening steels has been investigated. The influence on the resistance to SCC of steel manufacturing methods and heat treatment of base metal and weldments has been established.

Розвиток будівництва підводних і надводних кораблів, як і інших морських об'єктів, перш за все офшернаго промислу, зумовив необхідність створення нових високоміцних зварюваних конструкційних сталей і титанових сплавів [1-27]. За початок післявоєнних розробок підводних і надводних кораблів нових поколінь можна вважати 1952 рік, коли було сформовано дві групи конструкторів і вчених для розробки підводного човна проекту 627 (атомохода першого покоління) та його енергетичної установки з атомним реактором [1,2]. Але фактично перший льодоламач з енергетичною ядерною установкою послужив судном для відпрацьовування корабельної силової установки. Для виготовлення вказаних об'єктів необхідно було розробити нові високоміцні зварювані конструкційні сталі на корпуси як самих кораблів, так і елементів рульової системи, внутрішнього насичення суден та їх енергетичних установок.

Оскільки глибина занурення атомного підводного човна (АПЧ) проекту 627 повинна була досягати 300 м, що у 1,5 рази перевищувало цей параметр у порівнянні з тодішніми дизель-електричними підводними човнами світу, необхідно було розробити нову сталь для міцного корпусу. Така сталь АК-25 була розроблена ЦНДІ-48 (директор Г.І.Капирін) на основі однієї з марок броньових сталей. Із сталі АК-25 також був виготовлений зварний міцний корпус АПЧ проекту 659, який на більшій довжині мав циліндричну форму (товщина стінок різних частин корпусу змінювалась від 22 до 35 мм), а відсікові переборки виготовлено з листа товщиною 10 мм. В той же час на обшивку і набір легкого корпусу було використано маломагнітну сталь (товщина листів 4-16 мм), яка виявилася не придатною для цього в результаті високої схильності до розтріскування в морській воді.

Висока міцність при одночасній добрій зварювальності і задовільних пластичних характеристиках та в'язкості руйнування сталі АК-25 (типу 12ХН2МФ), як і сталей АК наступних розробок (АК-29, АК-32, АК-34, АК-35, АК-36, АК-40, АК-42, АК-46 відповідно типу 14Х2Н3МФ, 12ХН3МФ, 15ХН5МФ, 12ХН4МФ, 12ХН5МФ, 20ХН9К4МФ, 12ХН5М1Ф, 10ХН5МФ), а в подальшому – сталей АБ, досягалась в основному в результаті вторинного твердіння високо-дисперсійної сорбітної структури в процесі відпуску загартованої сталі. В даний час ці, так звані сорбітно-твердіючі, сталі знайшли широке застосування як у судобудуванні, так і для виготовлення інших великогабаритних морських конструкцій, наприклад льодотривких платформ [1-9].

Фізико-механічні властивості, особливості формування структури і характеристики технологічності сталей АК і АБ висвітлено в публікаціях основних авторів розробок – Гориніна І.В., Малишевського В.А. і Легостаєва Ю.Л., а результати лабораторних досліджень корозійно-механічної тривкості описано в низці статей та дисертаціях Малишевського В.А. і Легостаєва Ю.Л. [3-8]. Особливе місце в дослідженнях займають питання тріщинотривкості, малоциклової втоми та корозійного розтріскування вказаних сталей і їх зварних з'єднань під дією морської води.

В результаті розробки наступних проектів торпедних АПЧ вимоги до корпусних матеріалів зростали і, наприклад, міцні корпуси атомоходів 645-го проекту, перший з яких включено до складу ВМФ в 1963 році, був виготовлений із сталі з $\sigma_{0,2} = 600$ МПа, а для виготовлення легкого корпусу, баластних цистерн, огороження рубки і переферійних частин корабля була застосована маломагнітна сталь з $\sigma_{0,2} = 400$ МПа. В процесі експлуатації в легкому корпусі АПЧ виникли багаточисельні тріщини. Сталь виявилась дуже схильною до розтріскування під дією морської води в результаті МКК, малоциклової корозійної втоми та “класичного” корозійного розтріскування. В подальшому від застосування маломагнітної сталі на легкі корпуси АПЧ вирішено відмовитись, оскільки широкими дослідження не виявлено шляхів для усунення схильності сталей данного типу до розтріскування в морській воді.

В наступних проектах АПЧ другого покоління, наприклад проекту 671, в конструкції міцного корпусу використано сталь АК-29 (товщина листа до 35 мм) вищої міцності, ніж сталь АК-25, що дало можливість збільшити глибину занурення [1]. Сталь АК-29 також була успішно використана в конструкції міцного корпусу атомохода проекту 667А: корпус із зовнішніми шпангоутами мав циліндричну форму значного діаметра – 9,4 м – при товщині стінок до 40 мм і в основному був виготовлений із сталі АК-29, а міжвідсікові переборки з цієї ж сталі мали товщину 12 мм. В останньому атомоході другого покоління – проект 667БДМ – в конструкції міцного корпусу, а також кінцевих і міжвідсікових переборок використано сталь електрошлакового переплаву з підвищеною пластичністю. Як і в двох вищезгаданих проектах на легкий корпус застосовано маломагнітну сталь, що призвело до вказаних негативних наслідків.

Для виготовлення деяких конструкційних елементів кораблів, в тому числі АПЧ другого покоління, щораз ширше почали застосовуватись титанові сплави, а також зроблено спроби використати інші немагнітні легкі сплави [1]. Так, в АПЧ проекту 671 з титанового сплаву виготовлено великогабаритний обпливач антени гідроакустичного комплексу і рулі управління атомоходом, а в АПЧ проекту 670 титанові сплави використано для обпливачів гідроакустичних антен, проникливих частин кормової частини і в кормовому опірнні. У той же час легкий корпус, баластні цистерни і міцна рубка атомоходу були виготовлені із маломагнітної сталі і сплаву АМГ, а надбудова та огороження висувних пристроїв – із алюмінієвого сплаву. Використання таких різно-рідних матеріалів, які створюють гальванічні пари, зумовило необхідність застосування спеціальних заходів щодо захисту від корозії (встановлення прокладок, цинкових протекторів і т.п.), що ускладнило експлуатацію корабля.

Вперше можливість використання титанових сплавів для виготовлення міцного корпусу АПЧ розглядалась при виконанні проекту 661. Вибір титанового сплаву для виготовлення корпусу атомоходу був зумовлений найвищими його спеціальними характеристиками міцності (табл. 1), а також тим, що таким чином можна було зменшити масу корпусу і один із важливих демаскуючих чинників – магнітне поле об'єкту та збільшити швидкість у зануреному стані [1,2]. Крім цього, титанові сплави є безкорунційними корозійно-опірними матеріалами в морській воді, про що, наприклад, свідчить відсутність іонів титану в воді світового океану.

Для вирішення такого грандіозного завдання необхідна була розробка високоміцних титанових сплавів так званого морського призначення, освоєння виробництва листового прокату, штамповок, поковок, труб і т.п., відпрацювання технології зварювання великогабаритних і в значних товщинах корпусних конструкцій [1]. В усіх технологіях, а також в умовах експлуатації необхідно було врахувати специфіку нових матеріалів, перш за все високу схильність до поглинання газів – водню, азоту і кисню, і

шкідливих домішкових елементів, що вимагало поряд із створенням нового технологічного обладнання широких досліджень, в тому числі корозійно-механічних.

Таблиця 1. Порівняльні характеристики сталей і титанового сплаву ПТ-3* [10]

Матеріал	σ_t , МПа	Специфічні параметри тривкості	
		(МПа·м ³)/т	Витривалість матеріалу корпусу під тиском, т/м ³
Сталь АК	784	99,8	0,175
Сталь АБ	588	74,9	0,195
Титановий сплав ПТ-3*	588	132,1	0,150
* Механічні характеристики товстого листа із псевдо- α сплаву ПТ-3: $\sigma_B = 630$ -880 МПа; $\delta = 10$ -12%; $\Psi = 30$ -36%; $KCU = 70$ J/cm ² .			

Однак перші випробовування корпусних конструкцій з титанових сплавів не принесли успіху, що причинилось до значного розширених робіт. Використаний в будівництві АПЧ 661-го проекту сплав ПТ-3 (табл. 1), з якого освоєно виробництво листів товщиною 5-60 мм, був неякісним, що зумовило виникнення в готових виробках тріщин. Тому біля 20% обшивки легкого корпусу атомохода було замінено. Виявилась також втрата герметичності 10 цистерн головного баласту. Удосконалення сплаву ПТ-3, в результаті чого було розроблено сплав ПТ-3В (3,5÷5,0% Al; 1,2÷2,5 V; 0,10 C; 0,25 Fe; 0,12 Si; 0,30 Zr; 0,1 Cu+Ni; 0,15 Cr+Mn; 0,15 O; 0,04 N; 0,006÷0,08 H; 0,30% інших домішкових елементів) і освоєння технології виробництва листів товщиною до 100 мм, змінило ситуацію, а цей сплав визнано придатним для судобудування.

Вже в середині 70-х років для виготовлення міцного корпусу АПЧ проекту 685 (перший атомохід цього проекту спущено на воду в 1983 році) як основний конструкційний матеріал використано високоміцний титановий сплав з границею текучості 720-750 МПа. Титановий сплав, розроблений ЦНДІ металургії та зварювання під керівництвом акад. І.В.Гориніна, також використано як основний корпусний матеріал для АПЧ проекту 705. Корпус атомохода по всій довжині мав форму тіла обертання. Титанові сплави застосовано також і для виготовлення інших елементів конструкції та корабельних систем. Але в процесі експериментального доведення об'єкту було виявлено розтріскування зварного титанового корпусу.

Для визначення працездатності титанового сплаву в умовах дії високих напружень корпусних конструкцій на великих глибинах було вирішено провести широкий комплекс досліджень і експериментів. На масштабних і натурних відсіках АПЧ відпрацьовувались конструкційні рішення, технології виготовлення вузлів, проводилась експериментальна перевірка статичної, циклічної і динамічної тривкості конструкцій [1]. В рамках програми 685 було побудовано 3 спеціальних док-камери, одна з яких мала діаметр 5 м і довжину 20 м, друга відповідно 12 і 27 м і третя 15 і 55 м. В першій камері створювався тиск 40 МПа при одноразовому навантаженні і 20 МПа при циклічному навантаженні. Друга док-камера мала робочий тиск 20 МПа, а третя – 16 МПа. Блоки корабля випробовувались тиском в самій великій док-камері. Одночасно проводились широкі дослідження корозійно-механічної тривкості сплавів титану та їх зварних з'єднань в лабораторіях різних дослідницьких організацій.

В результаті раціонального використання нових матеріалів і реалізації низки оригінальних конструкційних рішень маса корпусу АПЧ проекту 685 складала 39% від нормального водовмісту корабля, що перевищило відповідний показник інших АПЧ, які крім того мали значно меншу глибину занурення. В результаті використання титанового сплаву на зовнішній зварний корпус, який складався з 10 безкінгстонних систем головного баласту, носової та кормової частини, прониклюваних частин і огороження висувних пристроїв в значній степені зменшено масу об'єкта.

Широкі експериментально-дослідницькі роботи увінчались створенням високоміцних титанових сплавів так званого “морського призначення” з надійними експлуатаційними характеристиками і задовільними технологічними властивостями [1,2,10-20]. Так, принципово важливим елементом нового АПЧ третього покоління проекту 945 було використання для виготовлення міцного корпусу титанового сплаву з $\sigma_B = 700-720$ МПа, в результаті чого гранична глибина занурення збільшилась в 1,5 рази порівняно з АПЧ другого покоління, суттєво зменшелось його магнітне поле (щодо цього параметра атомоходи 945-го проекту зберігають світове лідерство і в даний час) [1]. Однак застосування титанових сплавів в конструкціях призводить до значного зростання коштів на виготовлення АПЧ, що в сучасних умовах є не можливим.

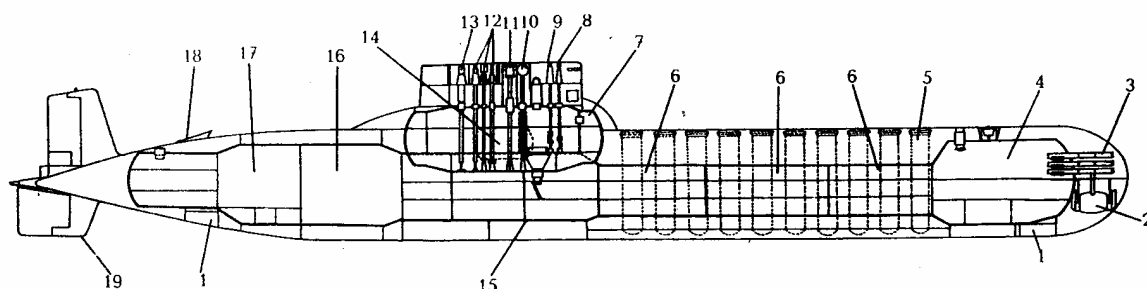


Рис. 1. Поздовжній розріз атомохода проекту 941: 1 – шахта висувної поворотної колони; 2 – основна антена гідроакустичного комплексу “Скат-3”; 3 – 533 мм торпедні апарати; 4 – торпедний відсік; 5 – ракетна шахта; 6 – ракетний відсік; 7 – відсік центрального поста і радіотехнічного оснащення; 8 – перископ “Сигнал-3”; 9 – перископ “Лебідь-21”; 10 – антенний пост радіосектанта; 11 – антенний пост радіолокаційного комплексу “Радіан-У”; 12 – антенний пост засобів зв’язку; 13 – антенний пост системи викривання кільватерного сліду; 14 – вспливаюча ратункова камера; 15 – головний міцний корпус (лівий борт); 16 – реакторний відсік; 17 – турбінний відсік; 18 – крило для захисту гвинто-рульової групи від льоду; 19 – лівий кормовий вертикальний руль з стабілізатором [2]

А найбільшим об'єктом в світі, виготовленим частково із титанового сплаву, є важкий ракетний крейсер стратегічного призначення проекту 941 (шифр “Акула”), за класифікацією НАТО – “Turphoon” (рис. 1, 2). Конструкція атомоходу виконана за типом “катамаран”: два міцних корпуси, кожний діаметром 7,2 м, із титанового сплаву, розташовані в горизонтальній площині паралельно один одному. З титанового сплаву виготовлено також дві окремих гермететичних капсули-відсіки – торпедний відсік і розташований між головними корпусами в діаметральній площині модуль управління, в якому розміщено центральний пост, а за ним – відсік радіотехнічного оснащення (рис. 1,2) [1,2].

Обидва корпуси і капсули-відсіки з’єднані між собою переходами. Загальна характеристика АПЧ: довжина – 172,8 м; ширина – 23,3 м; повна водовмісткість – 49800

м³; робоча глибина занурення – 380 м; гранична глибина занурення – 500 м; екіпаж – 179 членів; основна енергетична установка – два реактора типу PWR потужністю 2x73,5 МВт. Легкий корпус виконано із сталі, а на його поверхню нанесено спеціальне гумове покриття, що підвищує скритність корабля.

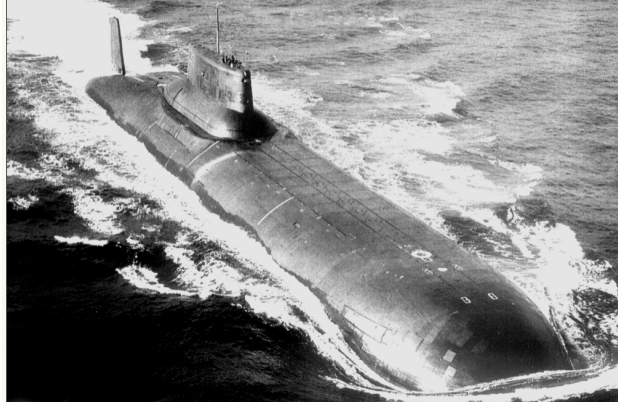


Рис. 2. Атомохід проекту 941 [1].

В даний час в США у відповідності з прийнятою концепцією створення кораблів підвищеної міцності, живучості, надійності, мобільності і т.п. реалізується комплексна програма щодо суттєвого розширення застосування титану в будівництві надводних кораблів ВМФ [17].

Досвід використання титанових сплавів в будівництві підводних і надводних кораблів, а також глибинних апаратів, в конструкції яких використовується також покращена модифікація найбільш широко застосовуваного в промисловості сплаву ВТ6, послужив основою для освоєння технологій виготовлення низки конструкційних елементів обладнання офшернаго промислу, в тому числі важливих трубних елементів райзерів [21-27]. Так, наприклад, на східному ринку пропонується значний асортимент труб із титанових сплавів так званого «морського призначення» і з найбільш поширеного конструкційного сплаву ВТ6 (6Al-4V) та його модифікації 6Al-4V ELI, які постачаються в термообробленому стані після гідровипробувань і ультразвукового контролю (табл. 2) [16,25]. Для підвищення корозійної тривкості, особливо в підкисленій морській воді, до складу сплавів може вводитись паладій або рутеній.

Наразі титанові сплави ще недостатньо використовуються в конструкціях платформ офшернаго промислу, хоча, наприклад, в платформах Норвежського сектора Північного моря біля 3000 т конструкцій виготовлено із сплавів титану [23]. Успішне застосування в 1987 році в США 6 тон титанового сплаву в конструкції напружених з'єднань днищевої частини платформи з райзером на глибині 500 м є суттєвим досвідом і підтвердженням перспективності цих матеріалів для виготовлення великогабаритних конструкцій, які зазнають дії морської води і високих навантажень [27]. А оскільки глибина промислової зони в перспективі досягне 2000 м, титанові сплави будуть безконкурентними матеріалами як для виготовлення райзерів, так і для різних глибинних конструкцій та апаратів (рис. 3) [21-23]. Але для забезпечення надійної роботи райзерів на значних глибинах необхідно перш за все вирішити проблему малоциклової втоми трубної системи [22].

Таблиця 2. Технічні характеристики труб з титанових сплавів для райзерів [25]

Хімічний склад	6Al-4V 3,2Al-2,7V- 1,3Mo-1Zr	6Al-4V ELI 3Al-2,5V	3,2Al-2,7V- 1,3Mo-1Zr	3Al-2,5V
Спосіб виробництва	Гарячекатані	Пресовані	Холодно- катані	Холодно- катані
Стан поверхні	Механічна обробка до $R_a = 2,5-3,2$	Механічна обробка до $R_a = 2,5-3,2$	Травлення	Травлення
Зовнішній діаметр, мм	219-508	102-355	88,9-355	88,9-355
Товщина стінки, мм	13-102	9,5-102	3,2-25,4	3,2-25,4
Довжина труби, мм	8000	8000	11000	11000
Механічні характеристики (min):				
σ_b , МПа	895	830	720	620
$\sigma_{0,2}$, МПа	825	765	630	485
δ , %	7	10	15	15
Ψ , %	20	25	30	25

Взагалі для освоєння ресурсів світового океану (наприклад, на долю морських покладів в даний час припадає біля половини нових розвіданих запасів нафти і приблизно чверть її світового видобування), гідрології, досліджень та проведення промислових робіт на дні морів і океанів потрібні глибоководні конструкції із достатнім ресурсом щодо втомної тріщинотривкості в морській воді.

Якщо на першій стадії розвитку титанової промисловості проведення широкого комплексу наукових і виробничих робіт в основному диктувалось потребами військово-промислового комплексу, то в даний час використання титану стає все більш широке в цивільних галузях промисловості. Навіть стверджується, що використання титану і його сплавів в цивільному судобудуванні є найбільш ефективним, хоча в основному цей висновок базується на аналізі втрат, зв'язаних з трубними системами суден (кошти заміни та втрати в результаті простоювання суден під час ремонту) [16].

Найбільш поширеними титановими сплавами для морських об'єктів в США є високочисті сплави Grade 5 (аналог – 5В) і Grade 23 (аналог – 37), тоді як Росія використовує сплави 3В, 5В і сплав 37 (табл. 2, 3) [16]. Розробляються також сплави інших хімічних складів, як наприклад, сплави з підвищеним навіть до 6% вмістом циркону [16,19,20,26], а в даний час створено і освоєно промислове виробництво „морських” титанових сплавів з границею текучості до 900 МПа [16].

Але враховуючи дуже значну металоємність морських платформ, як і інших великогабаритних конструкцій, основним матеріалом для їх будівництва є високоміцні зварювані сталі, а до найбільш перспективних в даний час належать сталі АБ, характеристики яких, критерії вибору та визначення ресурсу, в тому числі зварних конструкцій і доцільні сфери застосування описано в [3,4,7-9].

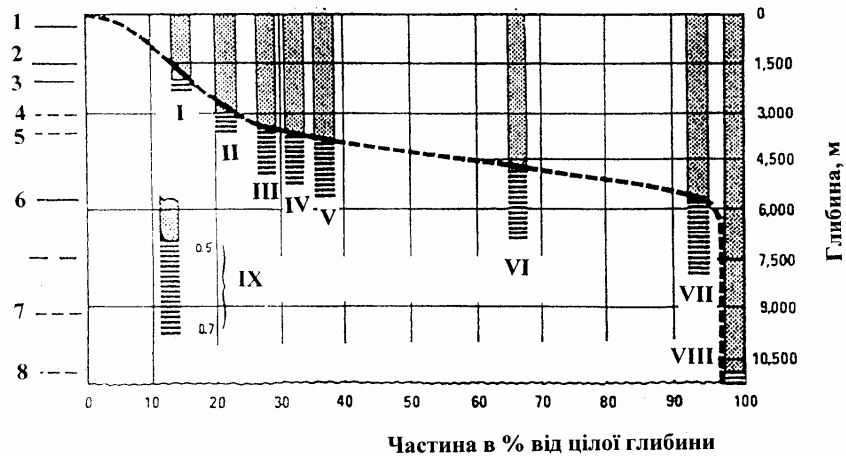


Рис. 3. Потенційно досягальна глибина занурення для матеріалів глибинних апаратів заданими Pergamon Press Ltd., Oxford: 1,5 – Льодовитий океан; 2,7 – Атлантичний океан; 3 – Тихий океан; 4 – “язики” Льодовитого океану; 6 – середня глибина; 8 – Маріанська западина; I-III – сталь із значеннями $\sigma_{0,2}$ (МПа), відповідно: 100, 150 і 200, які приймаються при розрахунках міцності корпусу; IV – сплави алюмінію ($\sigma_B = 60$ МПа); V – сплав титану ($\sigma_{0,2} = 120$ МПа); VI – сплав титану ($\sigma_{0,2} = 150$ МПа); VII – композит “пластик-скляне волокно”; VIII – скло і кераміка; IX – відношення маси корпусу апарата до витискуваної маси води

Таблиця 3. Морські титанові сплави [16]

Росія		США	
Марка сплаву	Склад	Марка сплаву	Склад
3В	5Al-1,8V	Grade 9	4Al-2V
5В	5,4Al-1,5V-1Mo-0,08C	Grade 5	6Al-4V
37	5,4Al-2,2Mo-0,5Zr-0,5Nb-0,08C	Grade 23	6Al-4V з пониженим вмістом кисню

Однією із особливостей цих сталей, як і сплавів титану морського призначення, є їх схильність до корозійного розтріскування в морській воді в визначеному інтервалі потенціалів поляризації, але тільки при наявності на поверхні мікроконцентраторів напружень (на відміну від маловуглецевих і низки низьколегованих сталей, які не виявляють чутливості до корозійного розтріскування в морській воді [28,29]). Вказані особливості були встановлені на зразках товщиною 20 і 30 мм із сталей АК і титанових сплавів з попередньо наведеними тріщинами (рис. 4 - 6) [5,6,19,20,26]. Діапазони критичних потенціалів розширюються при підкисленні морської води, що відповідає реальним умовам у випадку застоювання води в щілинах, під черепашками та водорослями, осадами продуктів корозії і т.п.

Оскільки потенціали корозії вказаних матеріалів встановлюються на декілька десятків вольт поза зоною критичних потенціалів, існує небезпека зміщення потенціалу в експлуатаційних умовах до критичних величин в результаті контакту з іншими матеріалами конструкції, зміни середовища на локальній ділянці поверхні та інших чинників.



Рис. 4. Поверхня руйнування зразка товщиною 30 мм з попередньо наведеною тріщиною з сплаву Ti-6Al-1,5V-6Zr: 1 – зона механічного надрізу; 2 – зона втомної попередньо створеної тріщини; 3 – зона формування корозійної тріщини; 4 – зона корозійної тріщини; 5 – зона пластичного утягування металу при доламуванні зразка

чи при цьому чинники, які можуть впливати на корозійно-механічну тривкість матеріалів протягом багаторічної експлуатації. В діаграму, приведену на рис. 8, включено значення K_c , K_{IC} , K_{sc} і K_{Isc} (3,5%-ний розчин NaCl з пониженим рН) для сталей різного способу виплавлення та термічної обробки, як це в якості прикладу приведено тільки для деяких сталей в таблиці, вміщеній в [30].

Тому відсутність мікроконцентраторів напружень є надійним методом запобігання корозійному розтріскуванню та малоцикловій корозійній втомі. Але в умовах стабільної пасивності поверхні конструкційних елементів із сталі АК навіть наявність мікродфектів може не зумовлювати розвитку корозійно-механічних процесів руйнування в результаті притуплення вершини цих мікродфектів [30].

Отже, надзвичайно важливим фактором при виборі конструкційного матеріалу, технології зварювання та термічної обробки є дані про величини K_{IC} і K_{Isc} як основного металу, так і різних зон зварного з'єднання. Тому проведено низку досліджень з метою визначення цих параметрів, враховуючи навіть можливість застосування прокату незначної товщини, коли не реалізується плоска деформація при випробовуванні зразків з такого прокату. Результати досліджень повинні узагальнюватись, доповнюватись даними натурних випробовувань, як це, наприклад, проведено для низки корпусних сталей АК (рис. 8), а обсяг досліджень повинен бути суттєво розширений, враховуючи

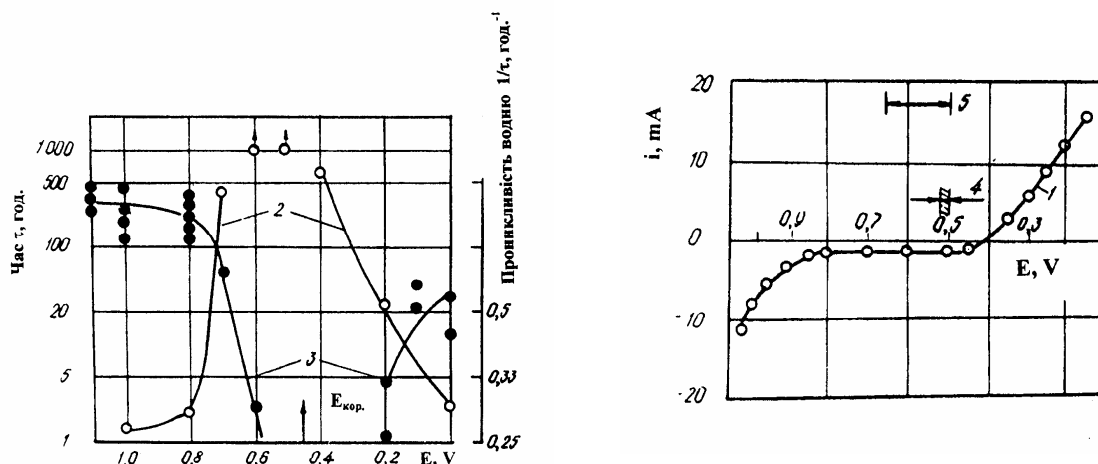


Рис. 5. Поляризаційна крива сталі 12ХН5МФ (1), залежність від потенціалу поляризації часу до розтріскування (2) і інтенсивності проникнення водню через зразки-мембрани (3) в 3,5%-ному розчині NaCl

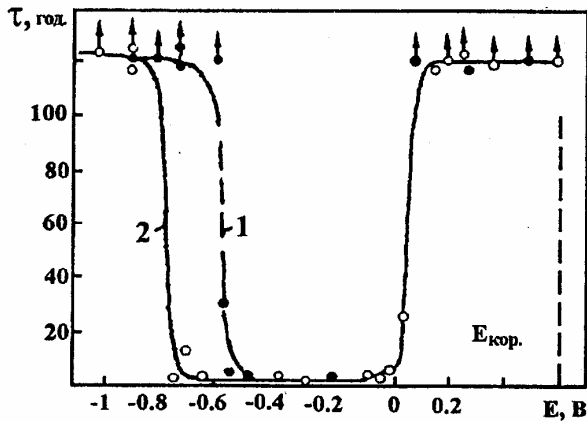


Рис. 6. Залежність часу до розтріскування зразків з титанового сплаву Ti-6Al-1,5V-6Zr з концентрацією кисню 0,08% (1) і 0,21% (2) в 3,5%-ному розчині NaCl з $\text{pH } 1$ при $K_i = 59,6 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$

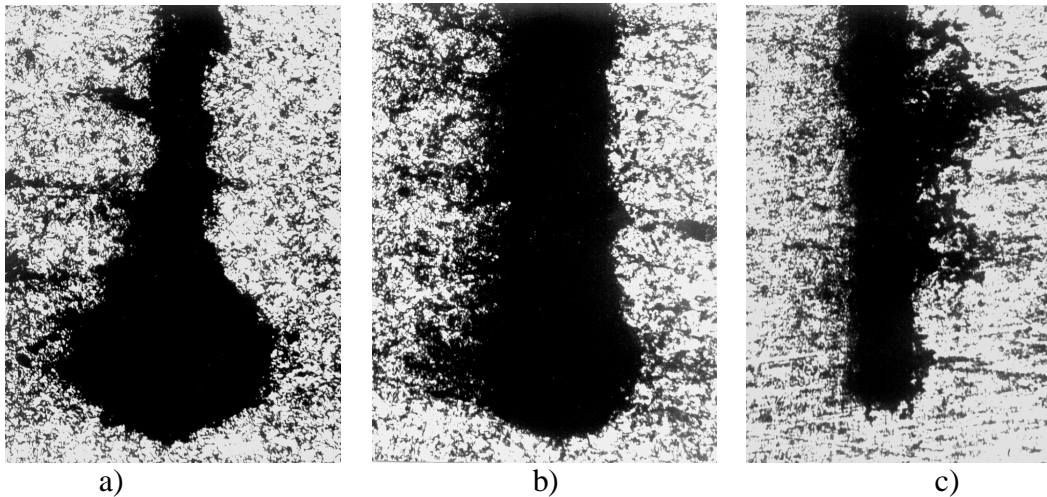


Рис. 7. Вершини попередньо створених в зразках втомних тріщин після 3000-годинних випробувань в 3,5%-ному розчині NaCl зразків з сталі типу: а – 15XН5МФ; б – 12XН3МФ; с – 20XН9К4МФ

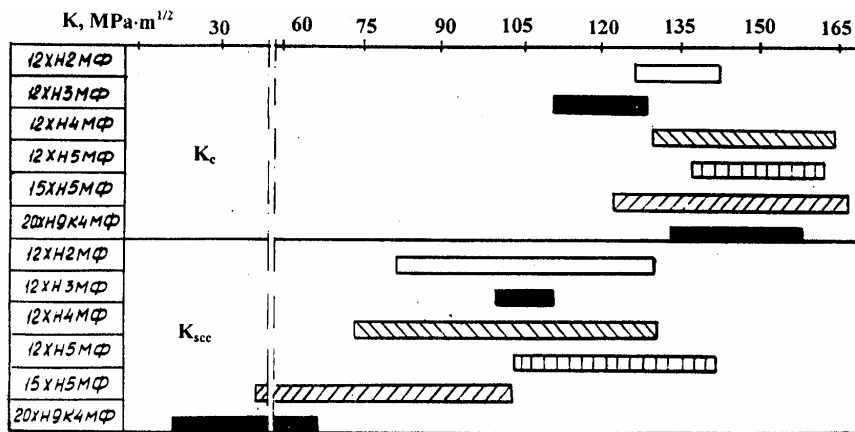


Рис. 8. Зведена діаграма величин K_c (K_{Ic}) і K_{scc} (K_{Iscc}) для прокату товщиною 20 мм із вибраних сталей АК

Список літератури: 1. Ильин В.Е. Подводные лодки России: Иллюстр. Справ./В.Е.Ильин, А.И.Колесников.- М.: ООО «Издательство Астель»: ООО «Издательство АСТ», 2000.- 286 с. 2. Апальков Ю.В. Корабли ВМС СССР: Справочник в 4-х

томах. Том 1. Подводные лодки. Часть I.- СПб: «Галлея Принт», 2002.- 90 с.; Часть II. – СПб: «Галлея Принт», 2003. – 96 с. **3.** Перспективы и проблемы металловедения при строительстве уникальных ледостойких платформ/ И.В.Горынин, В.А.Малышевский, Ю.Л.Легостаев, Л.В.Грищенко, И.К.Походня // Сучасне матеріалознавство ХХІ сторіччя. Київ, Наук. думка, 1998.- С.84-93. **4.** Использование механики разрушения для обеспечения надёжности арктических круп-номасштабных сварных металлоконструкций/ И.В.Горынин, А.В.Ильин, В.П.Леонов, В.А.Малышевский// Фізико-хім. мех. мат. 2001, № 2.- С. 133-148. **5.** Трещиностойкость судостроитель-ных сталей в хлоридных и сероводородсодержащих средах /Ю.Л.Легостаев, Л.Г.Шолтмир, А.М.Круцан, С.И.Гирный// Фізико-хім. мех. мат. 1989, № 2.- С. 61-65. **6.** Коррозионное растрескивание хромоникельмолибденовых сталей в хлоридном растворе/ В.А.Малышевский, Р.К.Мелехов, О.В.Куров, Ю.Л.Легостаев// Фізико-хім. мех. мат. 1980, № 4.- С. 3-7. **7.** Горынин И.В., Ильин А.В., Леонов В.П. Расчёт долговечности элементов конструкций с учётом технологических факторов. Судостроит. пром-сть. Сер. Проектирование судов.- 1991.- Вып. 17.- С. 3-14. **8.** Совершенствование требований к материалам для ЛСБУ на основе подходов механики разрушения/ И.В.Горынин и др.// Российский Морской Регистр Судоходства. Научн.-техн. Сб. № 23.- СПб, 2000.- С. 9-113. **9.** Палий О.М. Проблемы обеспечения прочности и ресурса корпусов судов и объектов морской техники при использовании высокопрочных материалов. Тр. междунар. конф. по судостроению. Серия С.- СПб; Изд. ЦНИИ им. А.Н.Крылова, 1994.- С. 1-12. **10.** Krylov V.V., Mineev J.K. About designing experience of submarines and deep submersibles from titanium alloys in bureau “Malachite”. Proc. of the Ninth World Conf. on Titanium “Titanium’99.science and Technology” (7-11 June 1999, Saint-Petersburg, Russia), Vol/ II/ 1999.- P. 1050-1057. **11.** Dergachev F.G. The first titanium high-speed Project 661 submarine. “Gangut” publ. house, 1998, No 14.- 56 p. **12.** Ushov S.S., Khesin J.D., Suvorov N.N. Marine application of titanium. Proc. of the Ninth World Conf. on Titanium “Titanium’99. Science and Technology” (7-11 June 1999, Saint-Petersburg, Russia), Vol. II, 1999.- P. 1050-1057. **13.** Life time of castings made of titanium alloy in sea water/Ushkov S.S., Filin Yu.A., Molchanova N.F., Okunev Yu.K.// Ibid.- С. 1114-1118. **14.** Ушков С.С., Копылов В.Н., Разуваева И.Н. Научные аспекты выбора регламентированного структурно-текстурного состояния «морских» сплавов титана. Металловедение и термическая обработка металлов 1999, № 9.- С. 38-42. **15.** Назаров Ф.Ф. Физико-химические основы выбора коррозионно-стойких материалов для работы в морской воде// Вопросы металловедения 1998, № 2(15). – С. 79-87. **16.** Горынин И.В., Ушков С.С., Хесин Ю.Д. Новые технологии и перспективные материалы на основе титана, прогноз их развития и освоения промышленностью. Проблемы современного металловедения 1998, май.- С. 54-59. **17.** Ушков С.С., Иголкин А.И. Новые области применения титана и задачи металловедения на современном этапе// Вопросы металловедения 1995, № 1.- С.61-73. **18.** Gorynin I.V., Anoshkin N.F. The status of titanium production and titanium application in the CIS. Proc. of the 10th World Conf. on Titanium “Ti-2003” (13-18 July, 2003, CCH-Congress Center Hamburg, Germany). Plenary Lecture. **19.** Влияние поляризации и загрязнённости кислородом на склонность титанового сплава к коррозионному растрескиванию/ Р.К.Мелехов, А.А.Труфанов, К.Б.Кацов, В.А.Шер, И.Н.Левина // Фізико-хім. мех. мат. 1988, № 2.- С. 69-73. **20.** Коррозионное растрескивание сварных соединений высокопрочного титанового сплава/А.А.Труфанов, Р.К.Мелехов, О.Д.Смиян, В.А.Шер//Автоматическая сварка 1990, № 5.- С. 31-36. **21.** New titanium alloy development and tube manufacture for offshore oil and gas production/ V.V.Tetyukhin, V.G.Smirnov, A.A.Fyodorov// Proc. of the Ninth World Conf. on Titanium “Titanium’99.

Science and Technology” (7-11 June 1999, Sain-Petersburg, Russia), Vol. II, 1999.- P. 1119-1123. **22.** Berge S. Titanium risers for offshore oil and gas production-fatigue considerations. Ibid.- P. 1064-1071. **23.** Lunde L., Seiersten M. The use of titanium in offshore industry. Ibid.- P. 1058-1063. **24.** Schutz R.W., Baxter C.F., Boster P.L. Titanium alloy utilization in drilling and offshore production systems// Proc/ of the 10th World Conf. on Titanium “Ti-2003”(13-18 July 2003, CCH-Congress Center Hamburg, Germany). **25.** Рекламный проспект Верхнесалдинского металлургического производственного объединения, 2004. **26.** Melechow R., Tubielewicz K., Błaszczuk W. Tytan i jego stopy. Gatunki, właściwości, zastosowanie, technologia obrobki, degradacja. Wyd. Politechniki Częstochowskiej. Częstochowa 2004. – 388 s. **27.** Dziekowski M.Z. Titanium’s contribution to the world’s deepest offshore system. Proc. of the Sixth Intern. Conf. on Titanium (1988, Canes), 1988. Part 1.- P. 517-518. **28.** Корозійно-механічне руйнування зварних конструкцій/ В.І.Похмурський, Р.К.Мелехов, Г.М.Круцан, В.Г.Здановський.- К.: Наук. думка 1995.- 262 с. **29.** Василенко И.И., Мелехов Р.К. Коррозионное растрескивание сталей. – К.: Наук. думка 1977.- 265 с. **30.** Круцан А.М., Мелехов Р.К., Тубилевич К.: Коррозионное растрескивание корпусных сорбитно-твердеющих сталей и их сварных соединений. Международный сборник научных трудов «Прогрессивные технологии и системы машиностроения», Донецк 2000.

Сдано в редакцию 14.04.05

Рекомендовано д.т.н., проф. Бухач А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЧИСТОВОГО ТОРЦОВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ

Мельничук П.П., Выговский Г.Н., Громовой А.А.

(Житомирский государственный технологический университет, г.Житомир, Украина)

The paper is dedicated to development of scientific fundamentals of finishing face milling of flat surfaces by tools with super-hard materials, with the aim to provide stable indices of quality of machining by means of estimation of influence of main factors of geometric, kinematical, dynamical origin, and with the aim of control of parameters of quality of machined flat surfaces on the basis of structural–mathematic modeling of technological processing system and processes which take place in it.

Повышение качества обработки поверхностей вызывает необходимость использования новых прогрессивных инструментов, среди которых применяются торцовые фрезы косоугольного резания. Размеры таких инструментов имеют порядок, близкий к межопорному расстоянию шпинделя станка и характеризуются значительной массой, которая сопоставима с массой шпинделя станка. Для процессов механической обработки торцовыми фрезами косоугольного резания характерны малые значения толщины срезаемого слоя, высокие скорости резания и т.п. [1–3].

Торцовые фрезы косоугольного резания предназначены для чистовой обработки плоских поверхностей. При обработке достигается значение параметра шероховатости $Ra = 1,0$ мкм и меньше. Поэтому на качество обработанной поверхности влияют все, даже незначительные, погрешности геометрии и кинематики системы “станок – инструмент”. Важное значение приобретает учет динамических процессов, которые имеют место при обработке, и определение их влияния на качество обработанной поверхности.