

ІОННО-ПЛАЗМОВЕ АЗОТУВАННЯ ТРУБОПРЕСОВОГО ІНСТРУМЕНТУ З ШТАМПОВИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ КОРОЗІЙНОСТІЙКИХ ТРУБ З МЕТОЮ ПОКРАЩЕННЯ ЙОГО ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ХАРАКТЕРИСТИК

*PhD (Матеріалознавство), викладач¹ Л.С. Кривчик
здобувач², викладач-методист¹ В.Л. Пінчук
Зав. каф.², проф., докт. техн. наук Л.М. Дейнеко
¹ВСП «Нікопольський фаховий коледж*

²Кафедра матеріалознавства і термічної обробки металів

Український державний університет науки і технологій, м. Дніпро, Україна

Докт. техн. наук, нач. лаб. В.О. Столбовий

*Лабораторія розробки і дослідження інтенсивних іонно-плазмених технологій
Інститут фізики твердого тіла, матеріалознавства і технологій
Національного центру ХФТІ НАН України (м. Харків, Україна)*

Одним з видів гарячого деформування є гаряче пресування. Його широко використовують для виготовлення виробів із усіх сталей і сплавів, які важко деформуються. У зв'язку з розвитком енергетики та електротехнічної промисловості, бурхливим зростанням авіа-і суднобудування, з'явилася велика кількість різновидів процесу пресування, різко зросла кількість сплавів, що пресуються. Ще одна найважливіша перевага пресованих виробів полягає в тому, що їх можна зробити такої складної конфігурації, яку іншими способами обробки тиском або навіть різанням отримати неможливо. Найширше застосування пресування отримало для виробництва труб з низькопластичних сталей і сплавів.[4]

На горизонтальному гідравлічному пресі здійснюється тільки операція пресування труб з гільз, отриманих прошивкою на вертикальних пресах або свердлуванням і подальшим експандуванням.(Рис.1)

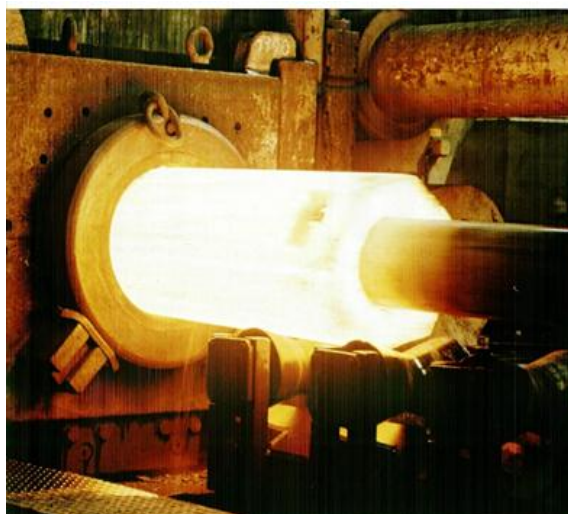


Рисунок 1 – Горизонтальний гідравлічний прес, [5]

Постійна швидкість пресування дозволяє одержувати на таких пресах труби майже з будь-яких сталей і сплавів, а застосування скломастила забезпечує високу якість.

Матриця є найбільш важливим інструментом, в якому змінюється форма заготовки, тому вона - найбільш зношена частина пресового інструменту. Основні причини руйнування матриць: втрата форми і розмірів каналу, крихке руйнування і розгарні тріщини [6](Рис.2). Стійкість матричних кілець 5-7 пресовок при пресуванні високолегованих корозійностійких сталей.



Рисунок 2 - Дефекти матричних кілець

Спосіб виготовлення безшовних труб з циліндрових заготовель з металів і сплавів, які важко деформуються, включає в себе свердління циліндричної заготовки, нанесення технологічного мастила, нагрів порожнистої заготовки, завантаження заготовки в контейнер, послідовні операції експандування заготовки в контейнері преса і пресування труби, відділення труби від прес-залишку. Експандування заготовки здійснюють експандером, діаметр якого виконаний відповідно з співвідношенням

$$D_{\text{експ}} = D_{\text{внутр.заг}} * K_{\text{експ}}, \quad (1)$$

де $D_{\text{експ}}$ - діаметр експандера, мм; $D_{\text{внутр.заг}}$ - внутрішній діаметр заготовки, мм; $K_{\text{експ}}$ - коефіцієнт експандування ($K_{\text{експ}} = 1,5-3,5$).

При цьому на передньому кінці експандера співвісно закріплена прошивна голка довжиною, що становить 1,2-3,0 довжини свердління заготовки, і діаметром оправки, що становить 0,980-0,995 внутрішнього діаметра направляючого кільця, встановленого в тримачі інструментальної дошки. Після експандування контейнер з прес-штемпелем відводять у вихідне положення, а інструментальну дошку переміщують на наступну позицію з попередньо встановленою прес-матрицею, причому між прес- матрицею і заготовкою, що експандована, розміщують мастильну шайбу і подальшим ходом преса здійснюють пресування труби. Співвідношення розмірів оправок дозволяють отримувати високоякісні труби з низьким рівнем різновтовщинності готових труб.[7]

Експандування дозволяє використати заготовлі більшої довжини, ніж при прошивці (відношення довжини заготовки до її діаметра при експандуванні може досягати 10-11, а при прошивці не перевищує 6-8), що підвищує продуктивність пресів, однак збільшує трудомісткість виробництва за рахунок введення операції свердлування крізного отвору в заготовлі.

Для експандування свердлених гільз застосовують оправки спеціальної форми, одна з яких приведена на рис.2. Відношення діаметра оправки $\delta_{оп}$ до діаметра носика δ_n приймається для неіржавіючих сталей 3.5, а для важкодеформованих 2.5÷3.0.[8] (Рис.3)

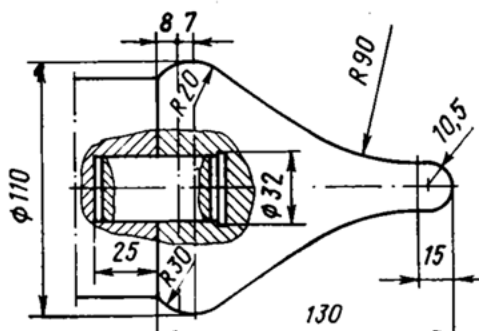


Рисунок 3 - Оправка для експандування свердлених гільз, [9]

Умови роботи експандерів: нагрівання заготовки перед прошивкою в камерній печі, встановлення експандера на голку, прошивка заготовки.

Стійкість експандеру – 100 циклів.

Види поломок:

- Деформація зовнішньої поверхні;
- розтріскування;
- Поздовжні продири.

Якість труб, отриманих пресуванням, визначається значною мірою стійкістю інструмента. Робочий інструмент працює в умовах високих температур, інтенсивних швидкостей ковзання і значного питомого тиску, що зумовлює необхідність використати як матеріал високолеговані теплостійкі інструментальні сталі, що володіють підвищеною в'язкістю і міцністю.

Сталі для штамів гарячого пресування мають тривалий контакт із гарячим металом. Тому вони працюють за значно важчих умов, ніж молотові штампи. Для штамів гарячого пресування необхідно застосовувати сталі підвищеної теплостійкості. У деяких випадках для таких штамів застосовується сталь 3Х2В8Ф, теплостійкість якої зберігається до 650 °С. Але наявність значної кількості карбідів вольфраму у складі сталі знижує в'язкість сталі. Тому частіше використовують сталі 4Х5МФ1С, 5Х3В3МФС, 3Х3М3Ф, 4Х4ВМФС та ін., які характеризуються вищою теплостійкістю та міцністю при робочих температурах порівняно зі сталями помірної теплостійкості 5ХМН та 5ХМВ. Їх використовують для виробництва трубопресового інструменту для пресування корозійностійких сталей, які важко пресуються (матричні кільця, голки-оправки, експандери, штемпельні головки).[10]

Хімічний склад сталей наведений в таблицях 1,2,3.

Таблиця 1- Хімічний склад сталі 4X5MФ1С, % по масі (ДСТУ 3953-2000), AISI 4140 (USA)

C	Si	Mn	Cr	V	Mo	Ni	Cu	S	P
						не більше			
0,32	0,90	0,20	4,50	0,30	1,20	0,35	0,30	0,30	0,03
0,40	1,20	0,50	5,50	0,50	1,50				

Таблиця 2- Хімічний склад сталі 5X3B3MФС, % по масі (ДСТУ 3953-2000) AISI H11 (USA)

C	Si	W	Mn	Cr	V	Mo	Ni	Cu	S	P
							Не більше			
0,45-	0,8-	2,8-	0,15-	2,5-	0,3-	1,2-	0,35	0,30	0,03	0,03
0,55	1,1	3,3	0,45	3,5	0,5	1,5				

Таблиця 3- Хімічний склад сталі 4X4BMФС, % по масі (ДСТУ 3953-2000) AISI H11 (USA)

C	Si	W	Mn	Cr	V	Mo	Ni	Cu	S	P
							Не більше			
0,37-	0,6-	0,8-	0,2-0,5	3,2-4	0,6-	1,2-	0,6	0,30	0,03	0,03
0,44	1,0	1,2			0,9	1,5				

Традиційна технологія термозміцнення інструменту з штампових сталей уявляє собою загартування з наступним відпуском. Загартування проводиться для розчинення значної частини карбідів і одержання високолегованого мартенситу [11].

Наступний відпуск викликає додаткове зміцнення внаслідок дисперсійного твердіння. Для підвищення в'язкості його виконують найчастіше при більш високих температурах на більш низьку твердість: 45 – 52 HRC і трооститну структуру (рис. 4).

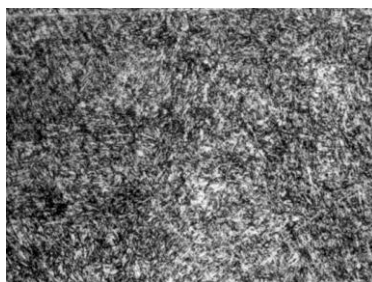


Рисунок 4 - Мікроструктура сталі 4X5MФ1С після загартування від 1070°C і відпущеної при 550 – 570°C (1 відпуск), 530 –550°C (2 відпуск) (троостит відпуску), * 500

Але існуючі матеріали і методи зміцнення (загартування з відпуском) не забезпечують жорсткі умови роботи трубного інструменту. Тому певний інтерес представляє вибір сучасних матеріалів, розробка й коректування методів термічної обробки для підвищення зносостійкості інструменту.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Ефективним способом зміни складу поверхневого шару штампового інструмента, що забезпечують необхідний комплекс властивостей його робочої поверхні, є хіміко-термічна обробка. У результаті змінюються структура й властивості поверхневого шару, підвищуються міцність, зносо- і теплостійкість сталі шляхом утворення стійких у процесі нагрівання карбідів, нітридів, боридів і т.п. Для трубного інструменту найчастіше проводять азотування (газове, іонне в плазмі ДВДР, в плазмі тліючого розряду, карбонітрацію в розплавах солів ціанатів і карбонатів).[12-15]

Азотування широко застосовується в різних галузях промисловості для підвищення довговічності і надійності деталей і інструментів. В даний час на підприємствах використовують в основному як газове азотування, так і нову прогресивну технологію – іонно-плазмове (вакуумно-дугове) азотування. При такому азотуванні дифузійне насичення поверхні азотом відбувається з використанням низькотемпературної плазми [16-18]. Спосіб дифузійного насичення поверхні азотом з використанням низькотемпературної плазми якісно відрізняється від класичних схем хіміко-термічної обробки значно більшою швидкістю дифузії, можливістю зниження температури процесу і екологічною чистотою. У процесі насичення під дією іонного бомбардування в сталі виникає збільшена концентрація структурних дефектів, що сприяє підвищенню інтенсивності процесів дифузії і, в тому числі, масопереносу азоту і створює можливість для появи нових фаз, які не утворюються в умовах звичайного насичення. Однією з перешкод для широкого впровадження методу іонно-плазмового азотування в промисловість є недостатність даних для оптимізації технологічних режимів. [19-20] У зв'язку з цим визначення ефективності застосування цього типу азотування для різних типів сталей і режимів експлуатації виробів є актуальним завданням. Вивчення взаємозв'язку між параметрами процесу, а також структурою і властивостями азотованих шарів дає можливість прискорити перехід до цих прогресивних технологій, які забезпечують підвищені якісні характеристики виробів, а також збільшення ресурсу при їх експлуатації.

Іонне азотування (в порівнянні з пічним) має наступні переваги: прискорює дифузійні процеси в 1,5 – 2 рази; дозволяє отримати дифузійний шар регульованого складу і будови; характеризується незначними деформаціями виробів і високим класом чистоти поверхні [21].

Після проведення азотування азотований шар на поверхні складається з нітридної зони $Fe_{2-3}N$ (ϵ -фаза) і Fe_4N (γ' -фаза) і підслою азотистого ферита (α -фаза), в якому при охолодженні виділяються нітриди хрому, молібдену, алюмінія (рис. 5, 6).

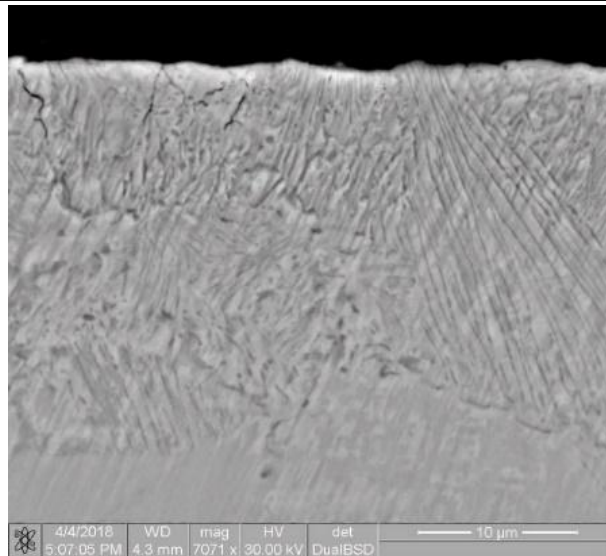


Рисунок 5 - Азотований шар при електронному дослідженні, [22]

3. Мета та задачі дослідження

Традиційна технологія зміцнення термічною обробкою трубного інструменту із вказаних сталей майже вичерпала свої можливості по подальшому підвищенню його експлуатаційних властивостей. Тому метою даного дослідження є удосконалення методів зміцнення трубопресового інструменту для пресування корозійностійких труб.

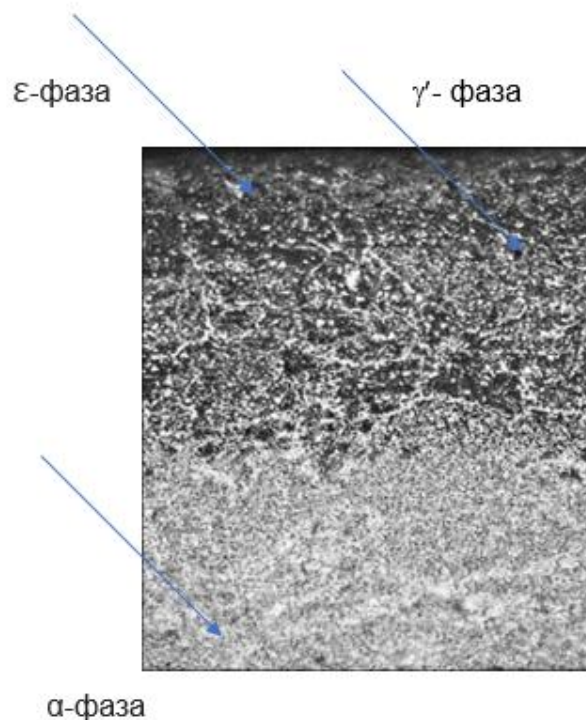


Рисунок 6 - Мікроструктура зміцненого шару сталі 4X5MФ1С після іонного азотування, х 200

4. Матеріали та методика досліджень

В роботі 3(три) кільця з сталі 5Х3В3МФС діаметром 73,5 мм і 71,5 мм і 2 (два) кільця з сталі 4Х5МФ1С діаметром 73,5 мм були піддані іонному азотуванню в плазмі двоступеневого дугового розряду в модифікованій установці «Булат-6» в лабораторії плазмотехнологій Інституту фізики твердого тіла ННЦ ХФТІ (м.Харків) (Рис.7).

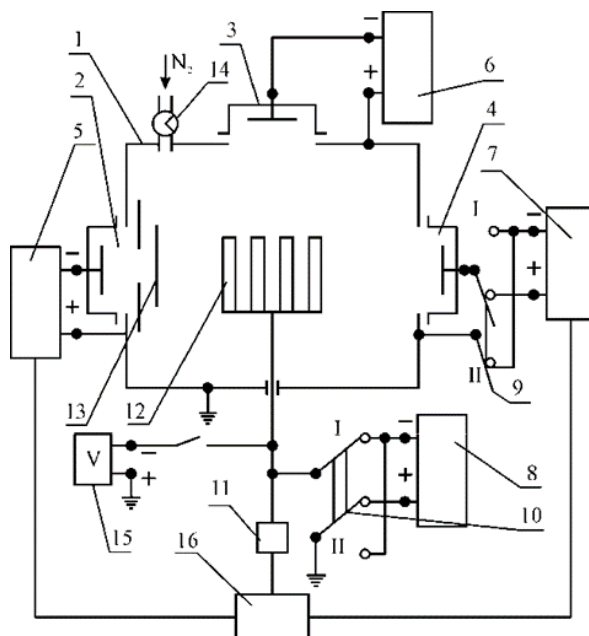


Рисунок 7 - Схема вакуумно-дугової установки для іонного азотування:

1 - корпус вакуумної камери; 2, 3, 4 – вакуумно- дугові випарники; 5, 6, 7 - джерела живлення випарників; 8 - джерело живлення підкладки; 9, 10 - перемикачі; 11 - поворотний пристрій; 12 - інструменти для оброблення; 13 - екран, прозорий для газу і електронів; 14 - система автоматичної підтримки тиску газу; 15 - генератор високовольтних імпульсів; 16 - блок автоматичного управління осадженням багат шарових покриттів.

Найбільш надійну оцінку результатів хіміко-термічної обробки дають металографічні дослідження, які дають відомості про товщину і будову шару з'єднань і дифузійного шару. Зазвичай для металографічного дослідження шліфи труїли ніталем - 2 - 4% -ним спиртовим розчином азотної кислоти. Для судження про фазовий склад шару використовували методи кольорового і електролітичного травлення в розчині їдкого натру. Також були проведені електронні дослідження металографічних шліфів (вихідні шліфи були порізані на тонкі зразки по 5 мм), приготовлені і піддані вивченню на растровому електронному мікроскопі (РЕМ), висока дозволена здатність (до 60 А) і виняткова глибина різкості якого роблять його майже незамінним для металографічних досліджень [23-24]. Замір твердості поверхні зразків після ХТО був виконаний за допомогою мікротвердоміра (мікроскопа) - типу ПМТ-3 при навантаженні 100гс HV_{0,1} [25].

В роботі проведено рентгеноструктурний аналіз досліджуваних зразків сталі 4Х5МФ1С. Діфрактометричні дослідження проводилися на

рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2.0 в кобальтовому Со-Ка випромінюванні із застосуванням Fe селективно поглинаючого фільтра. Дифраговане випромінювання реєструвалося сцинтиляційним детектором [26] (Рис.8).

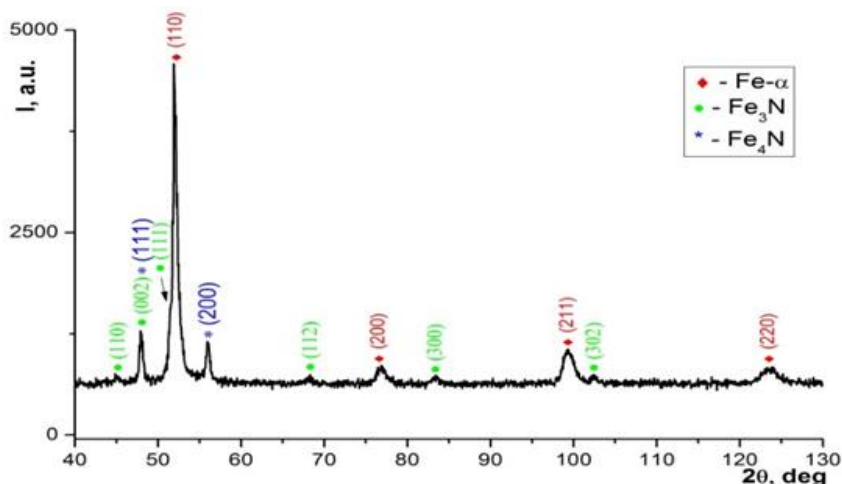


Рисунок 8 – Діфрактограма зразку після іонного азотування

При проведенні іонно-плазмового азотування можлива зміна послідовності технологічних операцій, тобто спочатку проводиться азотування інструменту, а потім його високотемпературна обробка. Три експандери довжиною 185 мм були встановлені в модернізовану вакуумно-дугову установку типу «Булат-6». Вакуумну камеру відкачували до тиску $P = 0,004$ Па, напускали азот до тиску 0,3 Па, включали двоступеневий дуговий газовий розряд при струмі 100 А і при негативному потенціалі на виробі 1300 В підтримували температуру 650°C протягом 2 годин.

Після проведення глибокого азотування на глибину 1,5-2 мм було проведено загартування з відпуском. Фазовий склад азотованого шару, в основному, визначається сполукою Fe_4N , розчином азоту в залізі $\alpha\text{-Fe}$, а також нітридами легуючих елементів. При цьому значно прискорюється процес азотування, оскільки атоми азоту легше проникають в незагартовану сталь. Механічну обробку можна проводити тільки один раз після завершення процесу хіміко-термічної обробки. [27]

Потім інструмент нагрівають за технологією попереднього нагріву до $\approx 600\text{-}650^{\circ}\text{C}$, витримка, нагрів до температури $\approx 900\text{-}950^{\circ}\text{C}$, витримка, подальший нагрів до температури загартування $\approx 1050\text{-}1100^{\circ}\text{C}$, витримка, охолодження в маслі або полімерному середовищі і піддають відпусканню, при цьому перший відпуск здійснюють при температурі не вище $240\text{-}250^{\circ}\text{C}$, другий відпуск при $\approx 470\text{-}500^{\circ}\text{C}$ і фінішний відпуск при $\approx 550\text{-}570^{\circ}\text{C}$. Після цього проводять механічну обробку виробів, тобто видаляють припуск разом з дефектним окисленням шаром (окаліною) і отримують чистові розміри інструменту. При цьому усуваються також відхилення від геометричних розмірів (повідки), які зазвичай мають місце при термічній обробці виробів складної форми. На обробленій таким чином поверхні забезпечується присутність азотованого шару з твердістю 9 ГПа, тобто вище звичайної для

загартованої і відпущеної даної марки сталі 7 ГПа. На обробленій поверхні забезпечується присутність азотованого шару, що містить γ' -фазу і твердий розчин азоту в залізі з твердістю вище стандартної для даної марки сталі і товщиною в кілька сот мікрометрів.

Графіки зміни твердості по глибині для сталі 4X4ВМФС наведені на рис. 9.

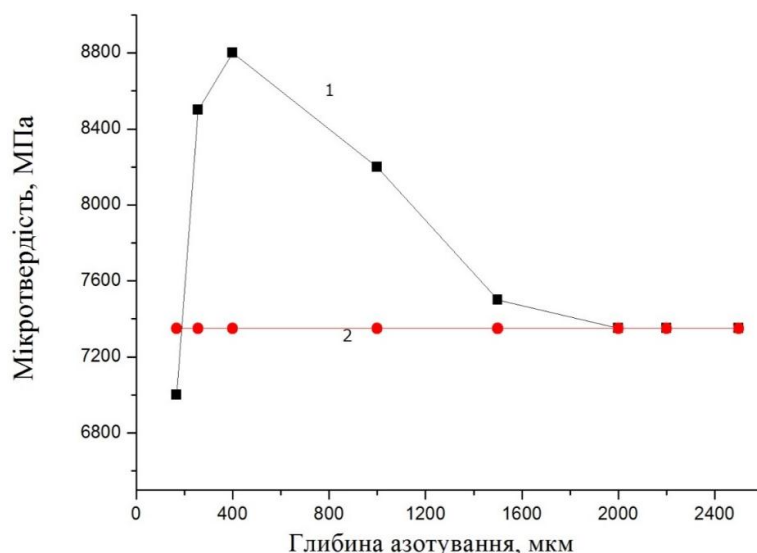


Рисунок 9 - Вимірювання твердості експандера зі сталі 4X4ВМФС по глибині, час азотування 2 години. 1-азотований шар, 2 загартована сталь, [28]

Фотографія поперечного шліфа експандера сталі 4X4ВМФС показана на рис. 10.

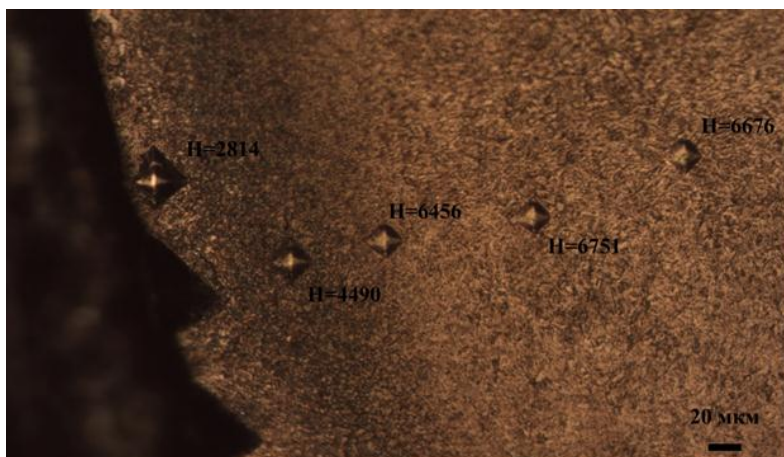


Рисунок 10 - Фотографія поперечного шліфа експандера з сталі 4X4ВМФС, [29]

Рентгенодифракційні спектри, отримані з поверхні зразків сталі 4X4ВМФС до і після азотування, наведені на рис. 11 [30].

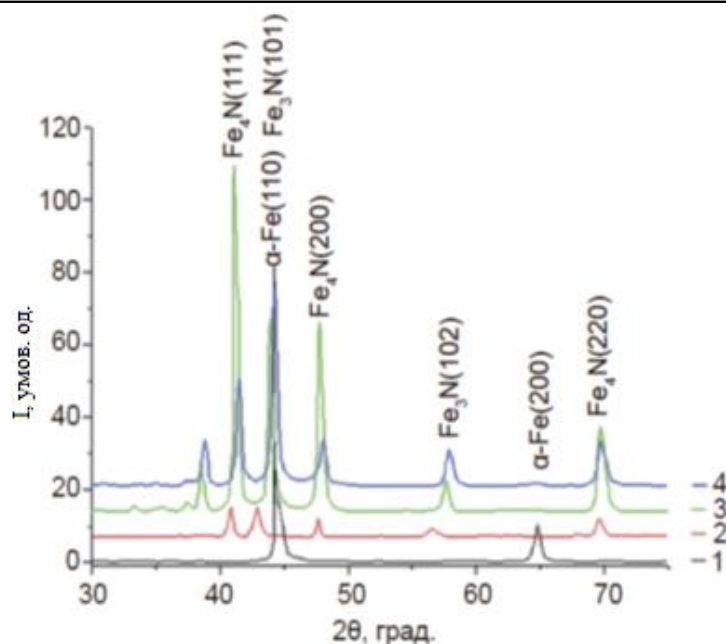


Рисунок 11 - Ділянки рентгенодифракційних спектрів зразків зі сталі 4X4VMΦC до і після азотування:

1 - вихідний стан; 2 - після газового азотування при 520°C протягом 18 годин; 3 - після іонно-плазмового азотування при 520°C протягом 2 годин 40 хвилин; 4 - після іонно-плазмового азотування при 530°C протягом 4 годин 30 хвилин, [30]

4. Результати досліджень

Результати заміру мікротвердості експериментальних зразків сталі 4X5MΦ1C після іонного азотування наведені в таблиці 4, а зміна твердості в залежності від глибини визначення твердості на рисунку 12. [9].

Таблиця 4 - Результати заміру мікротвердості зразків сталі 4X5MΦ1C після іонного азотування

№ зразку	Зона відстань від поверхні	Діаметр відбитка мкм	Середній діаметр відбитка, мкм	Навантаження Г	Значення мікротвердості МПа	Середнє значення мікротвердості, МПа	Середнє значення мікротвердості, кг/мм ²
1	10	14	14,568	100	9800		
2	10	14	14,184	100	9900		
3	10	14	14,8	100	9800	9800	980
4	20	15	15,184	100	8400		840
5	20	15	15,024	100	8300	8300	830
6	30	15	15,872	100	7800		

Продовження таблиці 4

№ зразку	Зона відстань від поверхні	Діаметр відбитка мкм	Середній діаметр відбитка, мкм	Навантаження Г	Значення мікротвердості МПа	Середнє значення мікротвердості, МПа	Середнє значення мікротвердості, кг/мм ²
7	30	15	15,332	100	7850	7830	783
8	40	16	16,64	100	7300		
9	40	16	16,096	100	7400	7350	735
10	50	17	17,864	100	6800		
11	50	17	17,864	100	6700	6750	675
12	60	17	18,172	100	6500	6500	650
13	70	16	16,94	100	6100	6100	610
14	80	18	18,94	100	6000	6000	600
15	150	19	18,94	100	5600		
16	150	18	18,708	100	5700	5650	565
17	250	18	18,096	100	5400		
18	250	19	19,712	100	5400	5400	540
19	центр	19	19,172	100	5000		
20	центр	18	18,096	100	4990	4995	499,5

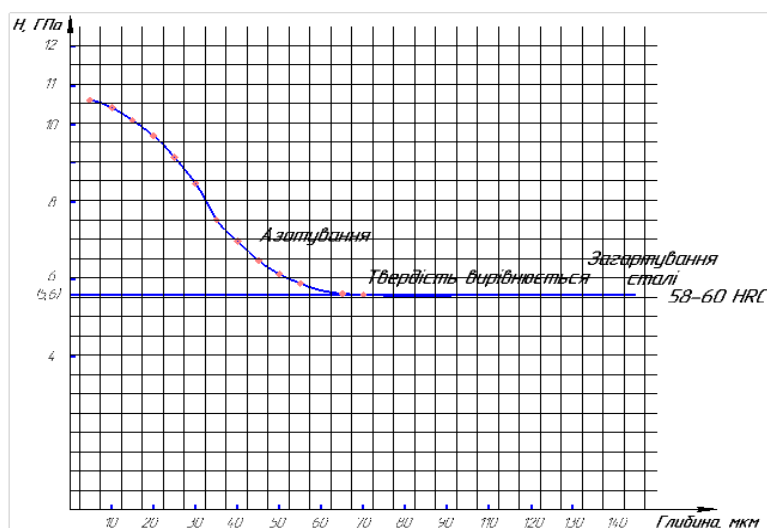


Рисунок 12 – Зміна твердості інструментальної сталі 4X5MФ1С після іонного азотування в залежності від глибини визначення твердості, [10]

Аналіз фазового складу показав, що в початковому стані виявляється однофазний структурний стан на основі фази α -Fe (рис.10, спектр 1). Після газового азотування в поверхневих шарах відбувається формування γ' -фази (Fe_4N), а також ϵ -фази (Fe_2N і Fe_3N). У зразках після 20 годин газового азотування співвідношення фаз в поверхневому шарі: 60 об.% Fe_4N , 20 об.% Fe_3N і 20 об.% Fe_2N . При іонно-плазмовому азотуванні (рис.10, спектри 3 і 4)

на відміну від газового азотування відбувається формування тільки 2 фаз - Fe_4N і Fe_3N . Утворення більш крихкої фази Fe_2N в цьому випадку не відбувається. У разі азотування при $520^{\circ}C$ протягом 120 хв. співвідношення фаз становить 65 об.% Fe_4N і 35 об.% Fe_3N і змінюється до 30 об.% Fe_4N і 70 об.% Fe_3N при температурі іонного азотування $530^{\circ}C$ і тривалості 270 хв.[30]

Результати заміру твердості (рис. 13, ліворуч) свідчать, що твердість поверхні зразків, оброблених з використанням іонного азотування, дещо більше аналогічних значень, отриманих після газового азотування, при тому, що час азотування зменшено практично на порядок. Також видно, що збільшення тривалості при іонному азотуванні від 160 до 270 хвилин практично не призводить до зміни твердості. Але призводить до суттєвого збільшення глибини азотованого шару. Глибина азотованого шару залежить від часу азотування (швидкість азотування 15 – 20 мкм/год.).

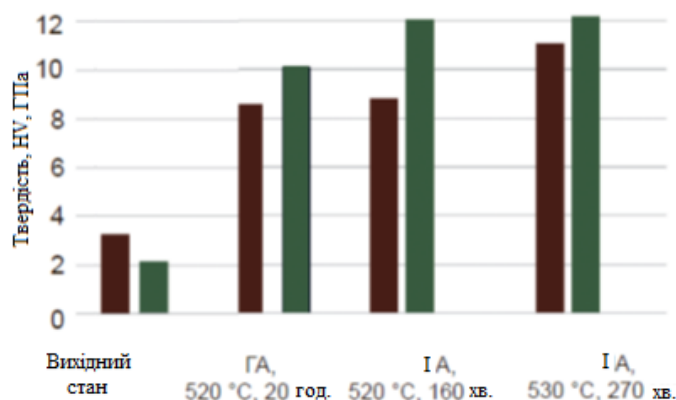


Рисунок 13 - Порівняльні гістограми твердості зразків в початковому стані (до азотування) і після газового і іонного азотування (ГА - газове азотування; ІА - іонне азотування [30]) /ліворуч/ та Випробування трубного інструменту на ТОВ «ВО ОСКАР» (м. Дніпро) /праворуч/

Випробування інструменту після зміцнюючої обробки виконано на пресовій дільниці ТОВ «ВО ОСКАР» (м. Дніпро) (рис.13, праворуч).

Результати випробувань: якщо стійкість матричних кілець зі сталі 5Х3В3МФС (ДІ-23) після звичайного термозміцнення складає 4 – 6 пресувань, то кільця з більш економнолегованої безвольфрамкової сталі 4Х5МФ1С, додатково піддані хіміко-термічній обробці (іонному азотуванню в плазмі ДВДР) показали стійкість 9 – 10 пресувань, внаслідок більш високої твердості, теплостійкості, утворення особливої структури на поверхні, внаслідок проведення іонного азотування. Якщо стійкість експандерів з сталі 4Х4ВМФС після звичайного термозміцнення складає 80-100 пресовок, то

після проведення глибокого азотування на глибину 1,5-2 мм і послідуєчого загартування з відпуском вона збільшується до 130-140 пресовок внаслідок утворення на поверхні нітридів заліза і легуючих елементів і як наслідок збільшення твердості і зносостійкості поверхні і експлуатаційної стійкості експандерів.

Висновки

1. Спосіб хіміко-термічної обробки дає можливість збільшити ресурс роботи трубопресового інструменту. Це досягається за рахунок створення на його поверхні азотованого шару в газовій плазмі вакуумно-дугового розряду шляхом проведення операцій іонного азотування і подальшої хіміко-термічної обробки. Як видно по глибині сталь набуває більшу твердість в порівнянні зі звичайним загартуванням. Таким чином, така методика модифікації поверхні є перспективною для підвищення стійкості гартованих сталей як з низькою, так і з високою температурою відпуску.

2. Для матричних кілець з сталей 4X5MФ1С і 5X3В3МФС після іонного азотування твердість поверхневого шару підвищилась до рівня 9500-11000МПа, а експлуатаційна стійкість інструменту збільшилася в 1,5 – 1,7 рази, що забезпечується утворенням на поверхні інструменту зміцненого шару, який складається після іонного азотування з нітридної зони Fe₂₋₃N (ε-фаза) і Fe₄N (γ'-фаза) і підшару азотистого фериту (α-фаза), в якому при охолодженні виділяються нітриди хрому, молібдену, ванадію, що підтвердили результати металографічних досліджень, електронної мікроскопії, рентгеноструктурних досліджень та випробування механічних властивостей і результатами промислової апробації інструменту.

Посилання

1. Мельник В.С., Сабол С.Ф., Бородій Ю.П., Кліско А.В. Інструмент для пресування труб. Тези доповідей загальноуніверситетської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів, присвяченої дню Науки. Секція «Машинобудування», 2010. С. 51-52.
2. Друян В. М., Гуляєв Ю.Г., Чукмасов С.О. Теорія та технологія трубного виробництва: підручник. Дніпро: VAL, 2000. 587 с.
3. Кузьмич В. О., Косенко В.М., Бузенко Л.В. Технологія виробництва сталевих труб методом гарячого пресування: підручник. Київ : НТУУ «КПІ», 2011. 224 с.
4. Гавриленко О. В. Основи технології виробництва труб методом гарячого пресування : навчальний посібник. Харків : ХНАДУ, 2017. 144 с.
5. Головань В. В. Технологія виробництва труб : навчальний посібник Кривий Ріг: КНТУ, 2014. 240 с.
6. Підкова О. В., Головня В.В., Лозицький В.М. Технологія виготовлення труб зі спеціальними властивостями : навчальний посібник Київ: Центр учбової літератури, 2008. 320 с.
7. Кривчик Л.С., Пінчук В.Л., Столбовий В.О., Думенко К.О., Перчун Г.І. Спосіб термічної обробки виробів з легованих інструментальних сталей: пат. 151611 Україна: МПК С21D 9/22, С23С 8/24; заяв. 14.04.2022 р., опубл. 18.08.2022 р.
8. Кривчик Л.С., Хохлова Т.С., Пінчук В.Л., Дейнеко Л.М., Столбовий В.О. Дослідження структури і властивостей штампових сталей для виготовлення трубного інструменту після проведення зміцнюючої термічної і хіміко-термічної обробки і нанесення зносостійких покриттів, Металургійна та гірничорудна промисловість. 2021. №2, С. 71-88.

9. Кривчик Л.С., Хохлова Т.С., Цеханський Д.Н., Пінчук В.Л. Особливості виробництва труб пресуванням. Шляхи підвищення стійкості трубопресового інструменту, XIII-а Всеукраїнська конференція «Молоді вчені 2023 – від теорії до практики» м. Дніпро 23 березня 2023 р.
10. Кривчик Л.С., Хохлова Т.С. Використання хіміко-термічної обробки для покращення експлуатаційних властивостей трубопресового інструменту // Матеріали Всеукраїнської конференції «Молодь і наука. Практика інноваційного пошуку» Національна металургійна академія України, м. Дніпро, 18 грудня 2019 р. С. 72-76.
11. Кривчик Л.С., Хохлова Т.С. Використання хіміко-термічної обробки з метою покращення експлуатаційних властивостей інструмента для пресування нержавіючих труб // XI Міжнародна науково-практична інтернет-конференція «Сучасний рух науки» м. Дніпро. 8-9 жовтня 2020 р., С. 347-353
12. Кривчик Л.С., Хохлова Т.С., Дейнеко Л.М., Пінчук В.Л. «Хіміко-термічна обробка трубопресового інструменту для виробництва корозійностійких труб – ефективний сучасний засіб термозміцнення з метою покращення експлуатаційних властивостей інструменту» // IX International Scientific and Practical Conference INTERNATIONAL FORUM: PROBLEMS AND SCIENTIFIC SOLUTIONS Australia. Melbourne, February 6-8, 2022 С.583-597
13. Кривчик Л.С., Хохлова Т.С., Дейнеко Л.М., Пінчук В.Л. Сучасні шляхи зміцнення трубного інструменту для виробництва корозійностійких труб» Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference SCIENTIFIC RESEARCH IN XXI CENTURY OTTAWA, CANADA 16-18.07.2022. С. 368-380
14. Кривчик Л.С., Хохлова Т.С. Зміцнення трубного інструменту для виробництва гарячопресованих і холоднодеформованих корозійностійких труб, Конкурсна робота на отримання Премії НАН України, грудень 2022 р.
15. Кривчик Л.С., Пінчук В.Л., Хохлова Т.С. «Шляхи зміцнення трубопресового інструменту для виробництва корозійностійких труб з метою покращення його експлуатаційних характеристик» // V Международная научно- практическая конференция THEORY AND PRACTICE OF SCIENCE: KEY ASPECTS. Рим. Італія. 7-8 ноября, 2021, С. 349-371
16. Кривчик Л.С., Пінчук В.Л., Столбовий В.О., Думенко К.О., Перчун Г.І. Спосіб термічної обробки виробів з легованих інструментальних сталей: пат. 151611 Україна: МПК С21D 9/22, С23С 8/24; заяв. 14.04.2022 р., опубл. 18.08.2022 р.
17. Матвієнко І.І. Технологія хіміко-термічної обробки сталей. К.: Вища школа, 2003. 416 с.
18. Павленко Р. М. Технологія хіміко-термічної обробки металів: навчальний посібник. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2014. 319 с.
19. Кривчик Л.С., Пінчук В.Л., Хохлова Т.С., Столбовий В.О., Дейнеко Л.М. Зміцнення трубного інструменту шляхом проведення комбінованої обробки – іонного азотування з нанесенням зносостійких покриттів» // IV Міжнародній конференції «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід» м. Гельсінкі, Фінляндія. Листопад 2021 р.
20. Кривчик Л.С., Пінчук В.Л., Хохлова Т.С. Вибір зміцнюючої технології трубопресового інструмента для виробництва нержавіючих труб // VIII Міжнародна науково-практична конференція «Modern problems in science», Прага, Чехія, 9-12 листопада 2020 р., С. 699-707
21. Кривчик Л.С., Хохлова Т.С., Дейнеко Л.М., Пінчук В.Л., Столбовий В.О. Зміцнення трубного інструменту для виробництва корозійностійких труб з метою покращення його механічних і трибологічних властивостей», V-а міжнародна конференція «Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід», 29 листопада 2022 р.
22. Кривчик Л.С., Хохлова Т.С., Пінчук В.Л. Шляхи термозміцнення трубопресового інструменту для виробництва неіржавіючих труб // Матеріали Всеукраїнської науково-технічної конференції студентів і молодих вчених “Молода академія 2020” (м. Дніпро, 21-22 травня 2020 р.). – Т. 1. – Дніпро, НМетАУ, 2020.
23. Ломино С., Овчаренко В.Д., Полякова Г.Н., Андреев А.А., Шулаев А.М. Межэлектродная плазма вакуумной дуги в атмосфере азота . Сб. докл. 5-го Межд. симпозиума «Вакуумные технологии и системы», ISVTE-5. Харьков, 2002. С. 202-222.

24. Brading H.J., Morton P.H, Earweaker G. Plasma-nitriding with nitrogen, hydrogen and argon gasmixtures: Structure and composition of coating // Surf. Eng. 1992. v.8. №3. P 206-211.
25. Лахтин Ю.М., Крымский Ю.Н Физические процессы при ионном азотировании. Защитные покрытия на металлах. 1968. в. 2., С. 225-229.
26. Andrea Szilagyine Biro. Trends of nitriding processes. Production Processes and Systems. 2013. vol. 6., №1. P. 57-66.
27. Саблев Л.П., Ломино Н.С., Ступак Р.И., Андреев А.А., Чикрыжов А.А. Двухступенчатый вакуумно-дуговой разряд: характеристики и методы создания. Сб. докл. 6-й Межд. конф. «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов». Харьков, 2005, ч. 2, С. 159 – 169.
28. Edenhofer B. The ion nitrating process – thermo chemical treatment of steel and cast materials. Metal and Material Technological, 1976, v.8, №8, P. 421-426.
29. Саблев Л.П., Ломино Н.С., Ступак Р.И., Андреев А.А., Чикрыжов А.А. Двухступенчатый вакуумно-дуговой разряд: характеристики и методы создания. Сб. докл. 6-й Межд. конф. «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов». Харьков, 2005, ч. 2, С. 159 – 169.
30. Столбовий В.О. Фізико-технологічні основи формування багат шарових наноструктурних вакуумно-дугових покриттів на основі нітридів тугоплавких металів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра тех. наук: 01.04.07. Харків, 2021, 36 с.

ДО ПИТАННЯ ФОРМИ ТА РОЗМІРІВ ПРИФУРМЕННОЇ ПОРОЖНИНИ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

*Доц., канд. техн. наук Г.Ю. Крячко, проф., докт. техн. наук Є.М. Сігарьов,
доц., канд. техн. наук А.А. Похвалітій, здобувач А.С. Яцков,
здобувач О.А. Юженко*

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське, Україна

Незважаючи на використання сучасних методів дослідження, зокрема рентгенівської томографії [1], створення математичних моделей для визначення форми і розмірів прифурменної порожнини доменних печей базується на результатах холодного фізичного моделювання. Тому адекватність моделей реальним процесам у фурменній зоні залишається спірним питанням.

Уяви про форму і розміри прифурменної порожнини на початку склалися за даними досліджень її геометрії на холодних моделях при витоку повітряного струменя в шар модельного коксу. Невипадково, що і перші математичні моделі прифурменної порожнини створювалися з опиранням на результати холодного моделювання. Серед таких моделей найбільш відомою слід назвати розробку Довгала А.М. та Шумилова К.А. з Київського інституту автоматики [2]. Дослідники показали, яким чином на їх думку повинна змінюватись форма і розміри газової каверни в коксовій насадці при зміні основних факторів впливу, зокрема масової витрати дуття і розмірів кусків коксу (рис. 1, а), а також діаметра повітряних фурм (рис. 1, б).