

УДК 621.774.38

DOI: 10.30838/UJCEA.0333.270526.68.1244

## ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЙ ІОННО-ПЛАЗМОВОГО АЗОТУВАННЯ ВТОРИННОТВЕРДЮЧИХ ШТАМПОВИХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ТРУБНОГО ІНСТРУМЕНТУ

ДЕЙНЕКО Л. М.<sup>1\*</sup>, докт. техн. наук, проф.,

КРИВЧИК Л. С.<sup>2</sup>, доктор філософії,

ПІНЧУК В. Л.<sup>3</sup>, здоб.,

СТОЛБОВИЙ В. О.<sup>4</sup>, докт. техн. наук, проф.

<sup>1\*</sup> Кафедра матеріалознавства і термічної обробки металів, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49010, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-15-44, e-mail: [leonid\\_deyneko@i.ua](mailto:leonid_deyneko@i.ua), <https://orcid.org/0000-0001-9662-4608>

<sup>2</sup> Відокремлений структурний підрозділ, Нікопольський фаховий коледж, Український державний університет науки і технологій, пр. Трубників, 18, 53210, Нікополь, Україна, тел. + 38 (050) 723-16-46, e-mail: [lcrivchik@gmail.com](mailto:lcrivchik@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-7769-3808>

<sup>3</sup> Відокремлений структурний підрозділ, Нікопольський фаховий коледж, Український державний університет науки і технологій, пр. Трубників, 18, 53210, Нікополь, Україна, тел. +38 (066) 044-17-39, e-mail: [v.l.pinchuk@nmt.org.ua](mailto:v.l.pinchuk@nmt.org.ua), <https://orcid.org/0000-0001-8257-9252>

<sup>4</sup> Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут», вул. Академічна, 1, 61108, Харків, Україна, тел. +38 (057) 335-35-30, e-mail: [nsc@kipt.kharkov.ua](mailto:nsc@kipt.kharkov.ua), <https://orcid.org/0000-0001-7734-0642>

**Анотація.** *Постановка проблеми.* В Україні виробництво труб є однією з найбільш важливих галузей народного господарства. Багато труб використовують нафтова та газова промисловість. Але, крім цього, також важливим споживачем є машинобудівельна, автомобільна, тракторна, суднобудівельна, авіаційна промисловості та інші галузі народного господарства. Виробництво труб з легованих та високолегованих марок сталей захвачує майже всі галузі промисловості. Широке поширення одержав процес виробництва сталевих труб методом пресування на гідравлічних пресах. Спосіб гарячого пресування дозволяє виготовляти труби із усіх важкодеформуємих сталей і сплавів. На відміну від трубопрокатних установок на пресах, можна одержати труби з більш тонкою стінкою й меншого діаметра. Трубопресовий інструмент піддається інтенсивному зносу. За умовами експлуатації прес-голки, матриці, експандери відносяться до важко навантаженого інструменту, процес відбувається при високих температурах, тисках та інтенсивному терті. **Мета статті.** Дослідити різноманітні технології іонно-плазмового азотування штампових сталей для виготовлення трубопресового інструменту з метою підвищення міцності, зносостійкості, експлуатаційної стійкості при виробництві труб з корозійностійких високолегованих сталей. При виробництві труб з високолегованих сталей застосовують процес експандування. Експандування заготовки здійснюють експандером, при цьому на передньому кінці експандера співвісно закріплена прошивна голка. Сталі для інструменту гарячого пресування мають тривалий контакт із гарячим металом, робочий інструмент працює в умовах високих температур, інтенсивних швидкостей ковзання і значного навантаження, що зумовлює необхідність використати високолеговані теплостійкі вториннотвердіючі інструментальні сталі, що володіють підвищеною в'язкістю і міцністю. **Висновок.** Запропоновані технології зміцнення трубопресового інструменту з використанням іонно-плазмового азотування дають можливість збільшити ресурс роботи трубопресового інструменту. Для експандерів трубопрофільного пресу з сталі 4Х4ВМФС після реалізації комплексної обробки з використанням глибокого іонно-плазмового азотування, комплексних обробок з використанням загартування, відпусків при різних температурах і наступного азотування значно на 25–30 % збільшені експлуатаційні властивості інструменту і термін його експлуатації, а також якість його поверхні, що значно поліпшує якість внутрішньої поверхні труб з високолегованих сталей.

**Ключові слова:** експандер; азотування; пресування; загартування; відпуск; пресування; в'язкість; міцність

## FEATURES OF ION-PLAZA NITRIDING TECHNOLOGIES OF SECONDARY-HARDENING STAMP STEELS FOR MANUFACTURING TUBE TOOLS

DEINEKO L.M.<sup>1\*</sup>, Dr Sc. (Tech.), Prof.,

KRYVCHIK L.S.<sup>2</sup>, PhD,

PINCHUK V.L.<sup>3</sup>, *PhD.*,  
STOLBOVYI V.O.<sup>4</sup>, *Dr Sc. (Tech.), Prof.*

<sup>1\*</sup> Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, Ukrainian State University of Science and Technologies, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49010, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-44, e-mail: [leonid\\_deyneko@i.ua](mailto:leonid_deyneko@i.ua), <https://orcid.org/0000-0001-9662-4608>

<sup>2</sup> Separate Structural Unit Nikopol Professional College, Ukrainian State University of Science and Technologies, 18, Trubnyky Ave., Nikopol, 53210, Ukraine, tel. +38 (050) 723-16-46, e-mail: [lcrivchik@gmail.com](mailto:lcrivchik@gmail.com), <https://orcid.org/0000-0002-7769-3808>

<sup>3</sup> Separate structural unit Nikopol Professional College, Ukrainian State University of Science and Technology, 18, Trubnyky Ave., Nikopol, 53210, Ukraine, tel. +38 (066) 044-17-39, e-mail: [v.l.pinchuk@nmt.org.ua](mailto:v.l.pinchuk@nmt.org.ua), <https://orcid.org/0000-0001-8257-9252>

<sup>4</sup> National Science Center “Kharkiv Institute of Physics and Technology”, 1, Akademichna St., Kharkiv, 61108, Ukraine, tel. +38 (057) 335-35-30, e-mail: [nsc@kipt.kharkov.ua](mailto:nsc@kipt.kharkov.ua), <https://orcid.org/0000-0001-7734-0642>

**Abstract. Problem statement.** In Ukraine, pipe production is one of the most important sectors of the national economy. The oil and gas industry uses a lot of pipes. But, in addition, the machine-building, automobile, tractor, shipbuilding, aviation industries and other sectors of the national economy are also important consumers. The production of pipes from alloyed and high-alloy steel grades covers almost all industries. The process of producing steel pipes by pressing on hydraulic presses has become widespread. The hot pressing method allows pipes to be manufactured from all difficult-to-deform steels and alloys. Unlike pipe rolling plants on presses, pipes with a thinner wall and a smaller diameter can be obtained. The pipe pressing tool is subject to intensive wear. According to the operating conditions, press needles, matrices, expanders are heavily loaded tools, the process occurs at high temperatures, pressures and intense friction. **The purpose of the article.** To investigate various technologies of ion-plasma nitriding of die steels for the manufacture of pipe pressing tools in order to increase strength, wear resistance, and operational stability in the production of pipes from corrosion-resistant high-alloy steels. In the production of pipes from high-alloy steels, the expanding process is used. The expansion of the workpiece is carried out by an expander, with a piercing needle coaxially fixed at the front end of the expander. Steels for hot pressing tools have long-term contact with hot metal, the working tool operates in conditions of high temperatures, intense sliding speeds, and significant load, which necessitates the use of high-alloy heat-resistant secondary hardening tool steels with increased toughness and strength. **Conclusion.** The proposed technologies for strengthening pipe pressing tools using ion-plasma nitriding make it possible to increase the service life of the pipe pressing tool. For expanders of a pipe profile press made of 4X4VMFS steel, after implementing complex processing using deep ion-plasma nitriding, complex processing using hardening, tempering at different temperatures and subsequent nitriding, the operational properties of the tool and its service life, as well as the quality of its surface, are significantly increased by 25–30 %, which significantly improves the quality of the inner surface of pipes made of high-alloy steels.

**Keywords:** *expander; nitriding; pressing; hardening; tempering; pressing; viscosity; strength*

**Постановка проблеми.** Азотування широко застосовується в різних галузях промисловості для підвищення довговічності і надійності деталей і інструментів. Для цього в наш час на підприємствах в основному використовують, як традиційне, газове азотування, так і нову прогресивну технологію – іонного азотування. При іонному азотуванні дифузійне насичення поверхні азотом відбувається з використанням низькотемпературної плазми [1]. Спосіб дифузійного насичення поверхні азотом з використанням низькотемпературної плазми характеризується значно вищою швидкістю дифузії, відсутністю викривлення поверхні, можливістю значного зниження температури процесу і екологічною чистотою. У процесі насичення під дією іонного бомбардування в матеріалі виникає надмірна 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 при підвищеній температурі [2–4].

Вивчення особливостей різноманітних технологій іонно-плазмового азотування трубного інструменту для пресування корозійностійких труб на трубопрофільних пресах, взаємозв'язку між технологією процесу, структурою і властивостями металу дозволяє прискорити перехід до більш прогресивних технологій для підвищення якісних характеристик інструменту і збільшення ресурсу його роботи [5].

**Аналіз публікацій.** Встановлено, що твердість азотованого шару є вищою, ніж цементованого, і зберігається при нагріванні до високих температур 450–500 °С, тоді як твердість цементованого шару деталей, метал яких має мартенситну структуру, зберігається тільки до 200–225 °С.

Після азотування сталь і чавун набувають:

- високої твердості на поверхні, яка не змінюється при нагріванні до температури 500–600 °С;
- високої межі витривалості;
- високої кавітаційної стійкості;
- високої корозійної стійкості на повітрі, у прісній воді і у водяній парі [7].

Азотований шар добре шліфується і полірується. Азотують вуглецеві сталі та сталі, що леговані алюмінієм, молібденом, ванадієм, титаном, бором та іншими елементами, а також чавуни, з яких виготовляють деталі паливних насосів, гільзи та циліндри двигунів внутрішнього згорання, зубчасті колеса, колінчасті вали, деталі турбін, парових установок тощо.

Значного поширення у практиці ХТО набувають атмосфери на основі частково дисоційованого аміаку і компонентів, що містять вуглець: природного чи світильного

газу, продуктів піролізу вуглеводнів, синтину, газу, спирту тощо. Як рідкі середовища для азотування використовують розплави ціаністих солей лужних металів (KCN; NaCN; NaCNO та ін.) з домішками карбонатів ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ;  $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) у різних пропорціях, а також розплави на основі карбаміду  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$  з такими самими домішками.

В результаті азотування метал поверхневого шару має високі твердість, зносо-, задиро- і теплостійкість, високий опір втомі та корозії. При реалізації низько- та середньотемпературного азотування деформація виробів, що обробляються, істотно нижча, ніж, наприклад, після цементації та загартування. Крім цього, температурний інтервал низькотемпературного азотування дозволяє поєднати в єдиному режимі азотування та відпуск попередньо загартованого виробу [8].

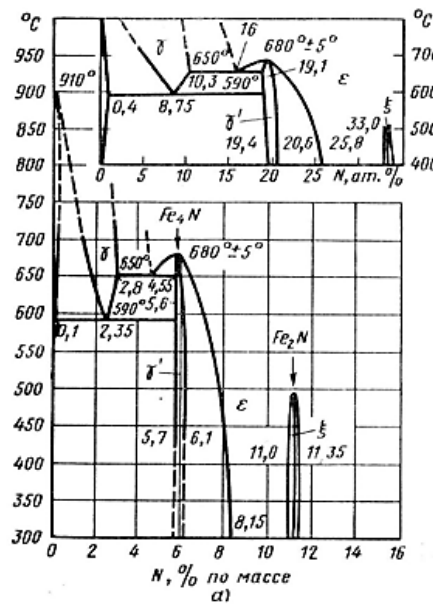


Рис. 1. Діаграма стану Fe–N

Послідовність утворення фаз у металі при дифузійному насиченні азотом відповідає послідовності їх розташування на діаграмі стану Fe–N (рис. 1). Наприклад, при температурі азотування 550 °С спочатку утворюється азотистий ферит ( $\alpha$ -фаза), потім  $\gamma$ -фаза (азотистий аустеніт),  $\gamma'$ -фаза ( $\text{Fe}_4\text{N}$  –

проміжна фаза змінного складу з ГЦК ґратками) і в зовнішньому шарі металу –  $\epsilon$  – фаза (проміжна фаза з ГП ґратками та широкою областю гомогенності).

Мікроструктура азотованого шару сталі 4Х5МФ1С після азотування показана на рисунку 2.

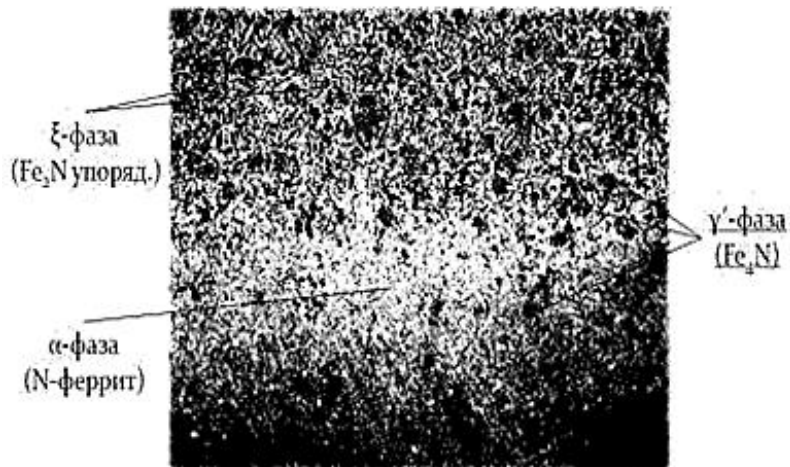
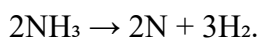


Рис. 2. Мікроструктура азотованого шару сталі 4X5MФ1С після азотування,  $\times 400$

При азотуванні легованих сталей утворюються леговані  $\epsilon$ - і  $\gamma$ -фази. Легуючі елементи Al, Mo, B, Ti, V, W підвищують розчинність азоту в  $\alpha$ -фазі й утворюють спеціальні нітриди типу MN, M<sub>2</sub>N (наприклад VN, TiN, Cr<sub>2</sub>N та інші). Виділяючись у дрібнодисперсному стані, ці нітриди підвищують твердість азотованого шару та його термічну стійкість. Найпоширенішими марками сталей, що піддають азотуванню, є 38ХМЮА; 40ХНМА; 18Х2Н4МА, 4Х5МФ1С, 4Х4ВМФС та інші. При азотуванні отримують шар товщиною 0,3–0,6 мм із твердістю 700–1200 HV [9].

Найпоширенішим є газове азотування, яке проводиться в середовищі амоніаку. При нагріванні амоніак дисоціює з утворенням атомарного азоту та водню за реакцією:



Атомарний азот адсорбується поверхнею металу та дифундує у кристалічну ґратку заліза. Унаслідок цього формується азотований шар із підвищеною твердістю. Азот добре розчиняється в  $\alpha$ -залізі. Його розчинність становить приблизно 0,01 % при температурі 20 °С і підвищується до близько 0,1 % при нагріванні до 591 °С. Це дає можливість проводити азотування при відносно низьких температурах (приблизно 500–580 °С), що значно нижче температур, характерних для цементації. Завдяки цьому зменшується деформація виробів і зберігаються їх точні

геометричні розміри [9]. Газове пічне азотування відбувається в негерметичних шахтних або ковпакових печах, і наявність деякої кількості аміаку та його сполук в повітрі робочої зони є неминучим. Процес характеризується низкою суттєвих небезпек, зокрема використанням аміаку, який характеризується сенсibiliзуючою, мутагенною та тератогенною дією на організм людини. Для мінімізації шкідливості необхідно забезпечити потужну вентиляцію, автоматичний контроль герметичності печей та суворе дотримання техніки безпеки.

Для скорочення тривалості процесу (в 2...3 рази), підвищення якості азотованого шару і зменшення його крихкості широко застосовується іонно-плазмене азотування [10].

Принцип дії ПА полягає в тому, що в розрядженому ( $P = 150\text{--}1000$  Па) азотовмісному газовому середовищі між катодом – деталями і анодом – стінками вакуумної камери – викликається аномальний розряд, який утворює активне середовище (іони, атоми), що забезпечує формуванню азотованого шару. Технологічними факторами, які впливають на ефективність іонного азотування, являються температура процесу, тривалість насичення, тиск, склад і витрати робочої газової суміші. Температурний діапазон іонного азотування при зміцненні сталей більше, ніж газового і заходиться в межах 400–700 °С. Обробка при температурах

нижче 500 °С особливо ефективна при зміцненні виробів з легованих сталей, тому що значно підвищує їх експлуатаційні властивості при збереженні твердості серцевини на рівні 55–60 HRC.

Використання методу пічного азотування сталей із застосуванням аміаку при температурах від 500 до 600 °С дозволяють досягти товщини азотованого шару в межах 0,2–0,6 мм за час від 10 до 90 годин обробки. Застосування каталітичного азотування із застосуванням спеціальних каталізаторів для дисоціації аміаку дозволяють знизити тривалість обробки печі до двох разів. Іонне азотування в газовій плазмі вакуумно-дугових установках при температурах від 500 до 600 °С дозволяє скоротити час азотування до 1 години, регулювати фазовий склад, змінюючи співвідношення робочих газів у суміші, для досягнення необхідного ефекту, а також позбутися шкідливого впливу аміаку. Іонно-плазмове азотування широко

застосовується для зміцнення інструменту із загартованих сталей [11].

**Мета статті.** Обґрунтування запропонованих різноманітних технологій іонно-плазмового азотування штампових сталей з метою підвищення міцності, зносостійкості, експлуатаційної стійкості при виробництві труб з корозійностійких високолегованих сталей.

**Результати досліджень.** Спосіб іонно-плазмового азотування трубопресового інструменту в вакуумно-дуговому розряді проведений в установці з вакуумною камерою, забезпеченою дуговими випарниками. На рисунку 3 приведена схема установки «Булат-6», яка використана для азотування інструменту в дуговому газовому розряді.

Азотування проводиться після попереднього відкачування до тиску 0,003 Па і тиску азоту (при напуску азоту) 0,3 Па. Регулюючи позитивний потенціал в межах від 100 до 150 В; протягом однієї години підтримувалась температура азотування 650–700 °С.

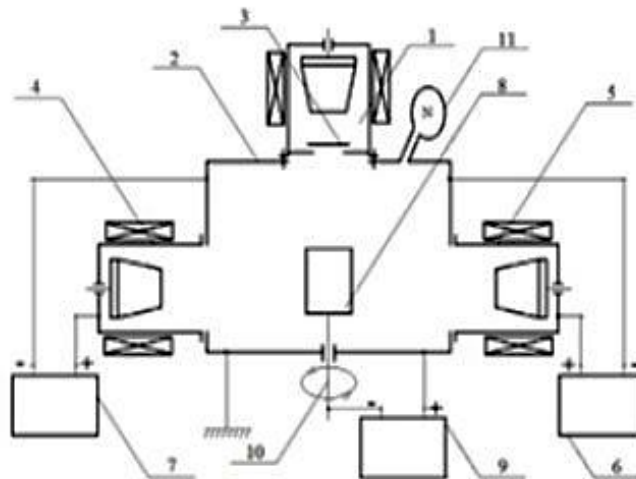


Рис. 3. Принципова схема вакуумно-дугової установки типу «Булат-6» для іонного азотування:

1, 4, 5 – вакуумно-дугові випарники; 2 – вакуумна камера; 3 – циліндричний екран; 6, 7 – джерела живлення газового розряду; 8 – азотовані вироби; 9 – високотисковий джерело живлення дугового розряду; 10 – поворотний пристрій; 11 – напікач

Двоступінчастий вакуумно-дуговий розряд (ДВДР) є розрядом, в якому позитивний стовп дуги розділений на два ступені, перший з яких являє собою вакуумну дугу з холодним катодом – 10, а другий ступінь – позитивний стовп дугового розряду в самій камері – 1 в плазмі робочого газу азоту низького тиску – 4.

Плазма ДВДР застосовується для азотування, та іонного очищення (нагріву) поверхонь деталей. У ДВДР існує дві різноманітні області: газометалева плазма закрита кільцевим екраном – 2, що не пропускає металеві іони з боку катода – 10 і газової плазми поблизу анода – 5. Деталь, що азотується – 3 знаходиться в області газової

плазми, для рівномірного нагріву деталей обертається за допомогою поворотного пристрою – 8.

Вакуумно-дугове азотування у плазмі двоступеневого розряду відбувається таким чином. Розпорошені з поверхні катода – 10 – частинки металу не проникають у робочу частину вакуумного об'єму – 1, а залишаються обсягом перед екраном – 2. Екран являє собою два диски, що пропускають іони іонізованого газу, і затримують іони та атоми металу. А з іншого боку камери подається потенціал на водоохолоджуваний анод – 5. У цьому випадку це магнітна котушка, що фокусує і стабілізує, електрично відірвана від корпусу камери. На неї подається плюс джерела дуги. Всередину камери подається газ (азот)  $P = 4 \cdot 10^{-3}$  Торр. Магнітні котушки є анодом для газової плазми і у вакуумній камері

запалиться так званий двоступінчастий розряд. А при подачі на поворотний пристрій – 8, на якому знаходиться азотована деталь – 3 негативного потенціалу – 1300 В від високовольтного джерела – 7, буде призводити до швидкого нагрівання деталі – 3. При нагріві інструменту до 470–550 °С відбуватиметься процес азотування. Нагрів деталі, що азотуються, регулюється анодним струмом, тиском у вакуумній камері і потенціалом на поворотному пристрої [12].

Швидкість і глибина азотованого шару буде залежати від температури деталі, іонного струму на деталі залежить та від щільності газової плазми ДВДР, а також від самого азотованого матеріалу. Температура деталі, що нагрівається, залежить від прикладеного потенціалу. Характер осцилограми при потенціалі – 1300 В у процесі азотування наведено на рисунку 4.

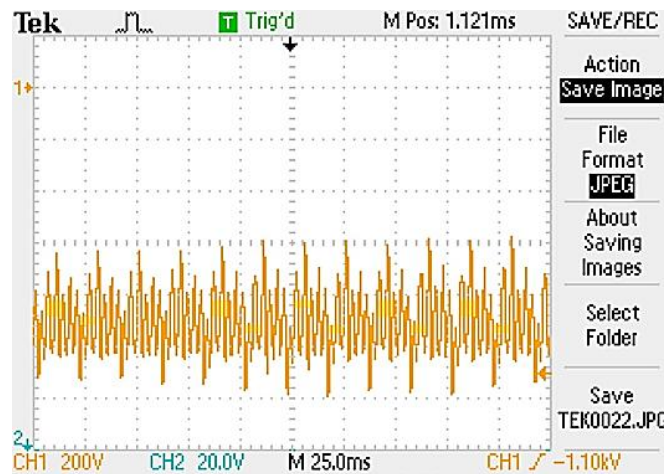


Рис. 4. Осцилограма постійного потенціалу – 1300 В у процесі азотування в газовій плазмі двоступеневого вакуумно-дугового розряду

Загальний вигляд установки «Булат-6» (ННЦ ХФТІ) показаний на рисунку 5, а. Установка інструменту в камері показана на рисунку 5, б.

Зразки перед загрузкою у вакуумну камеру проходять механічну очистку (за потреби), потім промивають лужним розчином в ультразвуковій ванні і остаточно промивають нефрасом С2 – 80/120. Вакуумну камеру відкачувал до тиску  $P = 0,3 \cdot 10^{-3}$  Па. Після досягнення необхідного вакууму в камеру дозовано напускається газ азот до тиску  $P = 0,6$  Па і проводиться іонне

очищення та активацію поверхні підкладок у газовому вакуумно-дуговому розряді, який дозволяє проводити очистку прискореними іонами газової плазми (без металевих іонів). Газовий вакуумно-дуговий розряд є розрядом, в якому позитивний стовп дуги розділений на два ступені, перший з яких являє собою вакуумну дугу з холодним катодом, а другий ступінь – позитивний стовп дугового розряду знаходиться за металевим екраном, він не пропускає іони випаровуваного металу в саму камеру [13].



а

б

Рис. 5. Загальний вигляд установки «Булат-6» (ННЦ ХФТИ) (а) і установка інструменту в камері (б)

Якісне очищення та активація поверхні зразків перед процесом азотування дозволяє видалити можливі забруднення та оксиди, що можуть перешкоджати якісному процесу азотування. Швидкість і глибина азотування

залежить від іонного струму на деталі, що пов'язано з щільністю газової плазми вакуумно-дугового розряду, а також від температури нагріву деталі та від прикладеного потенціалу.



Рис. 6. Вигляд садки для процесу іонного азотування

Азотування проводилось при струмі катоду  $I_k = -100$  А, струм на аноді  $I_A = 100$  А. Напряга на поворотному механізмі  $U_p = -1100$  від джерела живлення. Тиск азоту у вакуумно-дуговій камері під час очищення  $P_N = 0,6$  Па. Температура металу зразків була  $550...620$  °С, час азотування 1–2 години.

Вигляд садки для іонного азотування показаний на рисунку 6.

В промисловості на горизонтальному гідравлічному пресі здійснюється тільки операція пресування труб з гільз, отриманих прошивкою на вертикальних пресах або свердлуванням і подальшим експандуванням. Експандування дозволяє використати заготовлі більшої довжини, ніж при прошивці (відношення довжини заготовлі 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 наскрізного отвору в заготівлі. Для експандування свердлених гільз застосовують оправки спеціальної форми – експандери. Поверхня пресового інструменту відчуває питомий тиск, рівень якого наближається до межі міцності матеріалу, з якого виготовлений інструмент. При пресуванні сталей поверхня експандерів може розігріватися до 800–850 °С, що обумовлює перебіг процесів термовтоми та розпалу металу поверхні [14].

Однією з основних причин виходу з ладу експандерів є розвиток процесів термомеханічної втоми, що призводять до появи сітки тріщин «розпалу». Умови роботи експандерів: нагрівання заготовки перед прошивкою, встановлення експандера на голку, прошивка заготовки. Експлуатаційна стійкість експандеру – 100 циклів.

З урахуванням умов експлуатації до матеріалу ставляться такі вимоги: висока теплостійкість; в'язкість; висока розгаростійкість; зносостійкість; жаростійкість; висока теплопровідність [15].

Тому штампові сталі, з яких виготовляється інструмент, повинні мати:

– високу теплостійкість, що забезпечує необхідний опір пластичної деформації робочій поверхні штампу при нагріванні. Вона характеризується за температурою, при якій межа плинності залишається не нижче 900–1000 МПа, оскільки питомі

навантаження при гарячому штампуванні досягають 800–900 МПа, а також за температурою нагріву, після якого сталь зберігає твердість HRC 40–50;

– високу стійкість проти розпалу; вона тим краще, що більше в'язкість і теплопровідність металу;

– стійкість інструменту проти взаємодії з матеріалом заготовки, а також окалиностійкість.

Теплостійкість штампових сталей створюється складним легуванням хромом, молібденом, вольфрамом і ванадієм [16]. Хімічний склад та призначення основних марок штампових сталей регламентовано ДСТУ 3953-2000.

Сталь 4X4BMФC (ДІ-22) є сталлю підвищеної теплостійкості та в'язкості. Це найбільш широко використовувана сталь для більшості інструментів гарячого деформування, прес-форм лиття під тиском, трубопресового інструменту горизонтальних пресів (матричні кільця складних матриць, голки-оправки, експандери, втулки). Відмінною особливістю її є підвищений вміст карбідоутворюючих елементів (хрому, молібдену, вольфраму, ванадію).

Температури загартування теплостійких сталей вибирають з умов отримання найбільшої твердості при збереженні досить дрібного зерна аустеніту, що забезпечує краще поєднання експлуатаційних властивостей інструменту. Хімічний склад сталі наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад сталі 4X4BMФC, % по масі (ДСТУ 3953-2000), AISI 4140 (USA)

C	Si	Mn	Cr	V	Mo	W	Ni	Cu	S	P
						Не більше				
0,37	0,6	0,20	3,2	0,6	1,20	0,8	0,6	0,30	0,03	0,03
0,44	1,0	0,50	4	0,9	1,50	1,2				

Зарубіжними аналогами сталі 4X4BMФC є сталі 30WCrV17-2, 45WCrV7, X30WCrV5-3, X30WCrV9-3, X40CrMoV5-1 (DIN, WNr – Німеччина), SKD62 (JIS – Японія), H12, T20812 (США). Відмінною особливістю сталі 4X4BMФC від сталей помірної теплостійкості є підвищений вміст

карбідоутворюювальних елементів (хрому, молібдену, вольфраму, ванадію) при 0,3–0,4 % С.

Для отримання більш високої стійкості до зношування та деформації проводить загартування інструменту з підвищених

температур аустенізації з отриманням в металі інструменту зерна аустеніту № 7–8.

Традиційна сучасна технологія зміцнення пресового і штампового інструмента з напівтеплостійких штампових сталей – це високотемпературне загартування з відпуском. Ціль остаточної термічної обробки – одержання в готовому інструменті оптимальної комбінації основних властивостей: твердості, міцності, зносостійкості, в'язкості й теплостійкості [17].

Високотемпературне загартування проводиться для розчинення значної частини карбідів і одержання високолегованого мартенситу. Тому температури загартування – підвищені й обмежуються лише

необхідністю зберегти дрібне зерно й достатню в'язкість металу [18].

Проміжний підігрів інструменту до 800–850 °С при нагріві під загартування необхідний для запобігання розтріскування внаслідок низької теплопровідності штампових сталей.

Охолодження з температур аустенізації проводять в маслі М3–М16 з підігрівом до 50–70 °С або в полімерному середовищі. Структура сталі після загартування з відпусками являє собою сорбіт з дисперсними частками спеціальних карбідів, (які виділилися при відпуску мартенситу) та з можливою кількістю спеціальних карбідів, які не розчинилися в аустеніті при нагріванні під загартування [11].

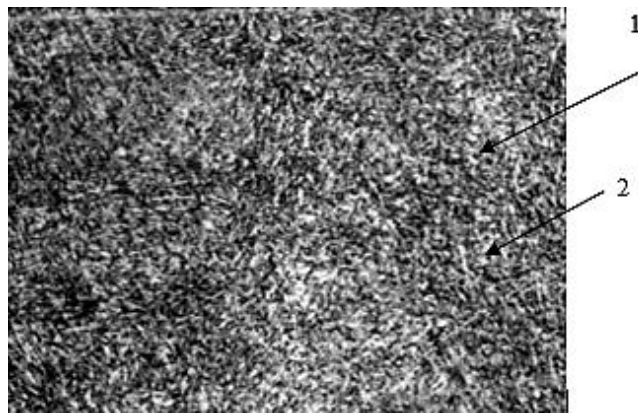


Рис. 7. Мікроструктура сталі 4X4VMFC після загартування від 1 070 °С і відпуску при 620–630 °С (1 відпуск), 560–580 °С (2 відпуск.) ×500:

1 – карбіди, які утворилися при відпуску мартенситу; 2 – сорбіт відпуску (матриця)

Вважається, що найбільш ефективним методом зміцнення пресового і штампового інструменту є його хіміко-термічна обробка.

Враховуючи складний характер роботи трубопресового інструменту для підвищення його експлуатаційної стійкості були запропоновані способи хіміко-термічної обробки з проведенням глибокого азотування у вакуумно-дуговому газовому розряді, загартування та відпуск (у різній послідовності).

Інструмент з температури азотування нагрівається до температури 900–950 °С, витримується і подальше нагрівається до температури загартування 1050–1070 °С, витримується, підстужується на повітрі до температури 900 °С і загартовується в полімерному середовищі, а перший відпуск

проводять при температурі не вище 240–250 °С з витримкою ≥1 години з подальшим нагрівом до температури другого відпуску не вище 350–380 °С з витримкою ≥1 години, а фінішний відпуск проводять при температурі не вище 580 °С [19].

Метою багаторазового відпуску є створення умов для раціонального структуроутворення в металі після загартування:

– перший відпуск проводять при температурах не вище 240–250 °С – це обумовлено тим, що при загартуванні легованих інструментальних сталей (для попередження розтріскування інтенсивне охолодження металу припиняють при температурах не нижче ~120–130 °С) за рахунок чого в металі остається до 28–30 %

аустеніту залишкового, який стійкий до перетворення при наступних відпусках. Тому доцільно перший відпуск робити в інтервалі температур виділення з мартенситу і аустеніту залишкового вуглецю, який утворює велику кількість часток нестабільного карбиду (типу  $\epsilon$ -карбид,  $Fe_{2,4}C$ ), які рівномірно розміщені у металі (тобто як на границях, так і в тілі зерен) і зменшує рівень напружень в металі;

– другий відпуск проводять при температурах не вище 350–380 °С – це обумовлено тим, що при розпаді мартенситу при температурах відпуску вище ~250 °С (для вуглецевих сталей частки нестабільного карбиду розчиняються або перетворюються у частки цементиту до цієї температури), а для легованих за більш високих температур відпуску утворюються частки цементиту або легovanого цементиту), які рівномірно розміщені у металі (тобто як на границях, так і в тілі зерен) і зменшується рівень напружень в металі, а також додатково створюються умови для повного перетворення залишкового аустеніту, який не розпався при першому відпуску, а також підготовлює твердий розчин до утворення часток спеціального карбиду при подальшому підвищенні температури відпуску;

– третій відпуск проводять за температури не вище 580 °С – відомо, що в легованих сталях температура виділення спеціальних карбідів починається при температурах  $\geq 480$ –490 °С, тому доцільно створити умови для процесів структуроутворення при яких в металі виникне велика кількість часток спеціальних карбідів, рівномірно розташованих по об'єму металу і які не зможуть збільшитися при цьому відпуску у розмірах за рахунок використання раціональної температури відпуску для кожного хімічного складу інструментальної сталі, яка конкретно використана при виготовленні виробів [20].

Така технологія вирішує завдання підвищення експлуатаційних властивостей інструментальної сталі за рахунок створення раціональних умов для процесів структуроутворення при використанні технологічної схеми: азотування,

загартування і багаторазові відпуски при різних температурах, що забезпечує збільшення зносостійкості при отриманні твердості азотованого шару ~ 9 ГПа.

Це дозволяє отримати інструмент з більш високим рівнем зносостійкості і твердості за рахунок конкретного набору операцій обробки та їх параметрів.

Структура інструменту після глибокого азотування і загартування з відпусками представлена на рисунку 8.

Інший пропонуєміий спосіб хіміко-термічної обробки трубопресового інструменту зі штампових сталей включав нагрів до температури 10500–1070 °С, охолодження на повітрі до температури 900 °С, загартування в водному розчині полімерного середовища і триразовий відпуск, при цьому перший відпуск проводили при температурі не вище 240–250 °С з витримкою  $\geq 1$  години з подальшим нагрівом до температури другого відпуску не вище 350–380 °С з витримкою  $\geq 1$  години та нагрівом до температури третього відпуску (при температурі не вище 580 °С з витримкою  $\geq 2$  години), який був поєднаний з азотуванням в плазмовій установці з двоступеневим дуговим розрядом низького тиску до отримання поверхневого насичення азотом шару товщиною 50–70 мкм [21].

Метою проведених відпусків було створення раціональних умов для процесів структуроутворення при використанні технологічної схеми ХТО.

В наступній технології ХТО з використанням іонно-плазмового азотування операцію загартування з 1070–1080 °С здійснювали у водному розчині полімеру (можливо і у водному розчині хлориду) з подальшими відпусками при температурах не вище 240–250 °С (перший відпуск), наступний другий відпуск проводили при температурі не вище 350–380 °С, а третій відпуск був поєднаний з азотуванням спочатку за температури не вище 540 °С з витримкою більше 2 годин, а після цього продовжили азотування за температури не вище 580 °С з витримкою більше 2 годин, а охолодження проводили в атмосфері аміаку з піччю до 200 °С і далі на повітрі. Це дозволяє

отримати інструмент з більш високим рівнем зносостійкості і твердості за рахунок конкретного набору операцій обробки та їх

параметрів [22-23].

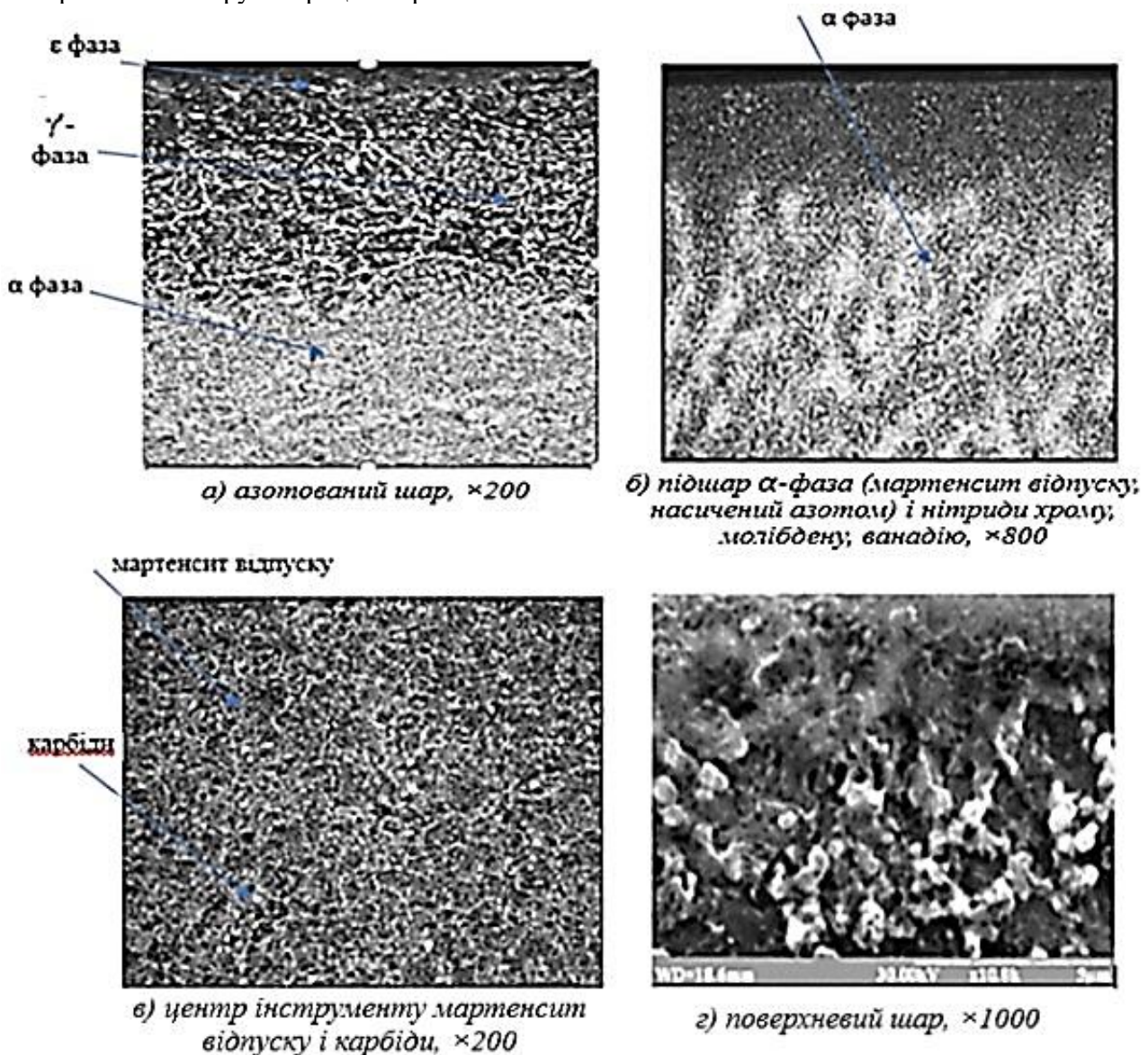


Рис. 8. Структура інструменту після глибокого азотування і загартування з відпусками: троосто-сорбітна структура з дисперсними спеціальними карбідами і карбіди, які не розчинилися при аустенізації,  $\times 200$

Атоми азоту, що проникли в поверхневий шар сталі, дифундують по об'єму сталі. Залежно від тривалості обробки виникає відповідний концентраційний профіль, що характеризує розподіл азоту по глибині [24].

Якщо на поверхні концентрація азоту досягає величини, необхідної для утворення  $\gamma'$ - і  $\epsilon$ -нітриду, то відзначається утворення саме цих нітридів. Вони ростуть з окремих зародків і швидко утворюють суцільний шар, який називається нітридним, або «шаром

сполук». Товщина шару, незалежно від вмісту азоту в зазвичай застосовуваних середовищах, збільшується в результаті подальшого поглинання азоту. Одночасно продовжується дифузія атомів азоту через шар сполук вглиб металу. При цьому швидкість їх дифузії через  $\gamma'$ -фазу приблизно в 25 разів, а через  $\epsilon$ -нітрид навіть в 60 разів менше, ніж через ферит.

В результаті обробки в приповерхневих шарах сталевих деталей можуть утворюватися шари з різним вмістом азоту. Найвищою

концентрацією азоту володіє зовнішній шар  $\epsilon$ -фази ( $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$ ). За ним глибше лежить шар з меншою концентрацією азоту  $\gamma^1$ -фаза ( $\text{Fe}_4\text{N}$ ). Ще глибше знаходиться шар  $\gamma$ -фази (дифузійна зона). Далі знаходиться вже вихідний матеріал, наприклад  $\alpha$ -фаза заліза (у маловуглецевих сталях). При недостатньому ступені обробки верхні шари можуть відсутні. Шар сполук і дифузійна зона разом утворюють азотований шар [25].

При цьому за допомогою плазмового азотування можливо отримання:

– дифузійної зони з розвиненим нітридним шаром, що забезпечує високу стійкість до корозії і припрацьовуваність тертьових поверхонь – для деталей, що працюють на знос,

– дифузійної зони без нітридного шару – для ріжучого, штампувального інструменту або деталей, що працюють при високих тисках зі знакозмінними навантаженнями.

Плазмовим азотуванням можна поліпшити такі характеристики виробів:

- твердість;
- зносостійкість;
- втомну витривалість;

Основною перевагою методу є стабільна якість обробки з мінімальним розкидом властивостей від деталі до деталі, від завантаження до завантаження.

Однією з головних переваг сучасної плазмової обробки є екологічна безпека. Обробка здійснюється в маловодневому або безводневому газовому середовищі, тому повністю відсутня загроза пожежі та вибуху. Крім того, процес проводять у вакуумній камері, що не вимагає вжиття спеціальних заходів проти забруднення навколишнього середовища. Тому плазмова хіміко-термічна обробка – це екологічно чистий, ресурсо- та енергозберігаючий, тобто економічно вигідний процес [26].

Плазмова хіміко-термічна обробка включає в себе кілька основних взаємопов'язаних процесів, які можна представити у вигляді окремих стадій:

1- отримання активних частинок, тобто дисоціація та іонізація насичуючого елемента в результаті перетворень у газовій фазі;

2- доставка активізованих частинок до поверхні оброблюваного металу (зовнішній масоперенос);

3- скупчення атомів і іонів насичуючого елемента на поверхні металу (адсорбція), електронна взаємодія цих іонів з металом (хемосорбція) і впровадження їх в метал (абсорбція), тобто масоперенос на межі метал – газове середовище;

4- переміщення впроваджених атомів та іонів від поверхні вглиб металу (дифузія), тобто внутрішній масоперенос, який можливий тільки за умови розчинності дифундуючого елемента в металі [27].

Процеси, що протікають на перерахованих стадіях, взаємопов'язані і комплексно впливають на ефективність хіміко-термічної обробки. Найскладніші з них, які важко піддаються дослідженню, протікають на поверхні металу при його взаємодії з дисоційованою та іонізованою газовою фазою. Однак саме вони визначають формування високого градієнта концентрацій насичуючого елемента, що забезпечує високу інтенсивність обробки. Швидкість і механізм адсорбції та інших видів сорбції визначаються властивостями газової плазми, у складі якої знаходяться робочі частинки [28].

У процесі хіміко-термічної обробки для управління структурою та механічними властивостями одержуваного поверхневого шару оброблюваних деталей підтримуються та контролюються такі основні параметри процесу обробки:

1) склад газового середовища, тобто концентрація в ній газів, що містять насичуючі елементи (азот, вуглець тощо), а також водень і, можливо, інші гази;

2) температура обробки;

3) тривалість процесу обробки;

4) робочий тиск газів у реакторі;

5) основні параметри розряду, що створює плазму;

6) ступінь дисоціації та іонізації робочих газів;

7) енергія іонів та щільність іонного струму на поверхні деталі.

В роботі [29] показано, чим більша температура азотування, тим більша

концентрація азоту в азотованому шарі та його товщина. При цьому твердість сталі може при високих температурах знижуватися через розкладання твердих вищих нітридів заліза.

**Методика дослідження.** За першою технологією з проведенням глибокого іонно-плазмового азотування були виготовлені експандери трубопресової установки зусиллям 16 МН у кількості 3 (трьох) штук зі сталі 4Х4ВМФС діаметром 120 мм і довжиною 195 мм. Була проведена іонно-плазмова обробка протягом 1–2 годин при 480–540 °С, що забезпечує процеси азотування на поверхні зразків. Далі експандери поміщають в шахтну піч, поступово нагрівають за технологією попереднього нагріву до  $\approx 900\text{--}950$  °С, витримують, а подальший нагрів здійснюють в розплавлених солях до температури загартування  $\approx 1080\text{--}1100$  °С, витримують, здійснюють охолодження в полімерному середовищі і піддають відпусканню, при цьому перший відпуск здійснюють при температурі не вище 240–250 °С, другий відпуск за температур не вище 350–380 °С, а фінішний відпуск здійснюють за температури не вище 580 °С.

Після цього проводять механічну обробку виробів, тобто видаляють припуск разом з дефектним окисленим шаром (окалиною) і отримують чистові розміри інструменту. При цьому усуваються також відхилення від геометричних розмірів (повідки або жолоблення), які зазвичай мають місце при термічній обробці виробів складної форми. Найбільш надійну оцінку результатів хіміко-термічної обробки дають металографічні дослідження, які дозволяють отримати відомості про товщину і будову отриманого поверхневого шару на поверхні деталей. Зазвичай для металографічного дослідження шліфи труїли ніталем – 2–4%-м спиртовим розчином азотної кислоти. Також були проведені металографічні дослідження шліфів з використанням мікроскопу Ахіоvert 200 МАТ, замір твердості поверхні зразків після ХТО був виконаний за допомогою мікротвердоміра (мікроскопа) – типу ПМТ-3 при навантаженні 100 Гс, а також із застосуванням портативного електронного ультразвукового твердоміру (типу «Ультракон») [30].

Отримані результати наведені в таблицях 2, 3.

Таблиця 2

Режими хіміко-термічної обробки дослідних зразків

Режим обробки	Температура азотування, °С	Температура загартування, °С	Температура відпуску, °С	Твердість, HV <sub>0,1</sub>
1 – за поширеною технологією	530–550	1 050–1 070	320–350	980–1 020

Таблиця 3

Режими хіміко-термічної обробки дослідних зразків

Марка сталі	Обробка	HV <sub>0,1</sub>
4Х4ВМФС	іонне азотування + загартування з трьохкратним відпуском(1)	1 045, 1 055, 1 030
4Х4ВМФС	іонне азотування + загартування з трьохкратним відпуском(2)	1 030, 1 035, 1 045

Графік термічної обробки експандерів трубопрофільних пресів з використанням

глибокого іонного азотування показаний на рисунку 9.

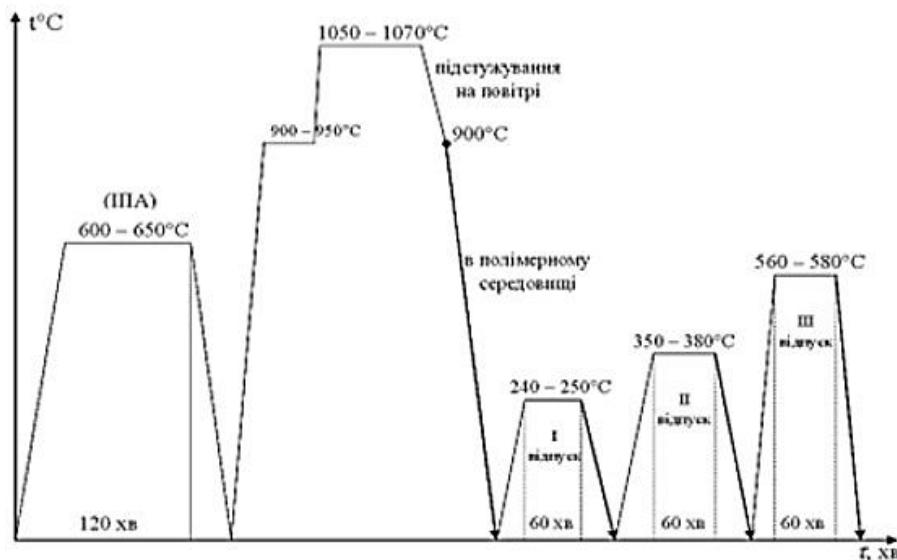


Рис. 9. Графік термічної обробки експандерів трубопрофільних пресів з використанням глибокого іонного азотування

По другій технології на випробування були надані експандери трубопресової установки зусиллям 16 МН у кількості 3 (трьох) штук: зі сталі 4Х4ВМФС діаметром 120 мм і довжиною 195 мм. Експандери піддані загартуванню з трьохкратним відпуском для зміцнення, а далі іонному азотуванню в плазмі ДВДР на установці «Булат-6» лабораторії плазмових технологій

ННЦ ХФТІ (м. Харків), яке поєднане з третім відпуском інструменту. Після проведення термічної обробки на всіх зразках проводили заміри твердості із застосуванням портативного електронного ультразвукового твердоміру (типу «Ультракон») і мікротвердоміру ПМТ-3. Отримані результати наведені в таблицях 4, 5.

Таблиця 4

**Режими хіміко-термічної обробки дослідних зразків**

Режим обробки	Температура відпуску, °С		Температура азотування, °С	Твердість, НV <sub>0,1</sub>
	I	II		
1 – за поширеною технологією	560–580	550–560	530–550	985–1 015

Таблиця 5

**Режими хіміко-термічної обробки дослідних зразків**

Марка сталі	Обробка	НV <sub>0,1</sub>
4Х4ВМФС	загартування з відпуском(1) + іонне азотування (2)	1 045, 1 053, 1 033
4Х4ВМФС	загартування з відпуском(1) + іонне азотування (2)	1 030, 1 035, 1 045

Результати апробації запропонованого способу хіміко-термічної обробки трубопресового інструменту зі штампових сталей свідчать, що за рахунок зміцнення матриці та проведення іонного азотування відбувається значне підвищення твердості поверхневих шарів інструменту, яке з властивостями матриці буде сприяти покращенню експлуатаційної стійкості

трубопресового інструменту, призначеного для виготовлення труб, що виготовляються шляхом гарячого пресування. Це дозволить підвищити твердість поверхневого шару та матриці і тим самим збільшити експлуатаційну стійкість трубного інструменту на 20–30 %, а також знизити витрати при виготовленні труб з легованих марок сталей [31-32].

За третьою технологією експандери трубопресової установки зусиллям 16 МН у кількості 3 (трьох) штук: зі сталі 4Х4ВМФС діаметром 120 мм і довжиною 195 мм піддані загартуванню з трьохкратним відпуском для зміцнення, а третій відпуск поєднаний з іонним азотуванням в плазмі ДВДР на установці «Булат-6» лабораторії плазмових

технологій ННЦ ХФТІ (м. Харків). Після проведення термічної обробки на всіх зразках проводили заміри твердості із застосуванням портативного електронного ультразвукового твердоміру (типу «Ультракон») і мікротвердоміру ПМТ-3.

Отримані результати наведені в таблицях 6, 7.

Таблиця 6

**Режими зміцнення трубопресового інструменту зі штампових сталей з проведенням іонного азотування дослідних зразків**

Режим обробки	Температура відпуску, °С		Температура азотування, °С	Твердість, HV <sub>0,1</sub>
	I	II		
1 – за поширеною технологією	560–580	550–560	530–550	985–1 015

Таблиця 7

**Режими зміцнення трубопресового інструменту зі штампових сталей з проведенням іонного азотування дослідних зразків**

Марка сталі	Обробка	HV <sub>0,1</sub>
4Х4ВМФС	загартування з відпуском(1) + іонне азотування (2)	1 040, 1 050, 1 030
4Х4ВМФС	загартування з відпуском(1) + іонне азотування (2)	1 045, 1 055, 1 050

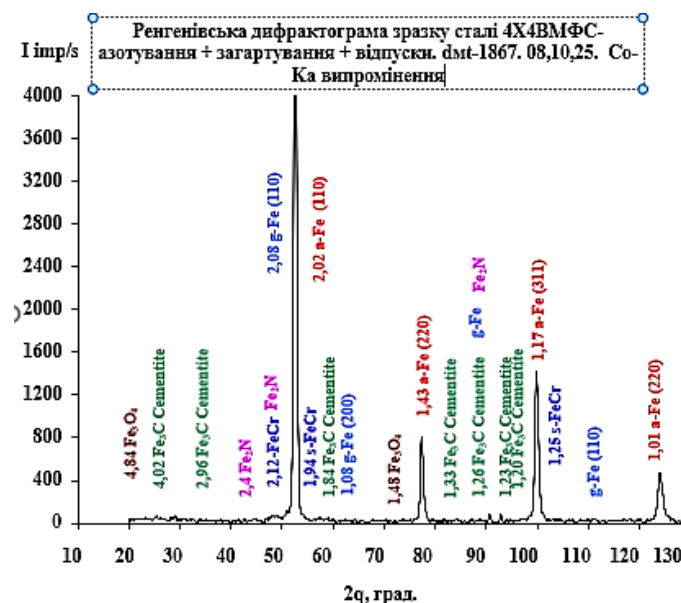


Рис. 10. Дифрактограма поверхні зразку зі сталі 4Х4ВМФС

Рентгенофазовий аналіз проводили на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3 у монохроматизованому Со – Ка випромінюванні ( $\lambda = 1,7902\text{Å}$ ). Ідентифікація сполук (фаз) проводили шляхом порівняння міжплощинних відстаней ( $d, \text{Å}$ ) та відносних інтенсивностей ( $I_{\text{отн}} - I_{110}$ ) експериментальної кривої з даними електронної картотеки PCPDFWIN. Зйомка

проводилась на кутах 10–90 град. Фазовий аналіз – крок 0,1 град. Тривалість 5 с. Структурний аналіз – крок 0,01 град. Тривалість 5 с [26].

Дифрактограма поверхні зразку після глибокого азотування, загартування і відпусків наведена на рисунку 10.

Аналіз фазового складу показав, що в початковому стані виявляється однофазний

структурний стан на основі фази  $\alpha$ -Fe, при іонно-плазмовому азотуванні відбувається формування тільки 2 фаз – Fe<sub>4</sub>N і Fe<sub>3</sub>N. Утворення більш крихкої фази Fe<sub>2</sub>N в

протилежність газового азотування в цьому випадку не відбувається. Фазовий склад сталі показаний на рисунку 11, елементарний склад на рисунку 12.

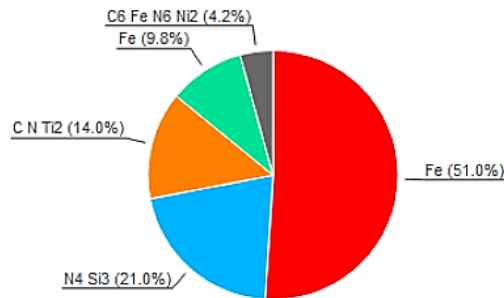


Рис. 11. Фазовий склад сталі 4X4BMFC після азотування і послідууючого термозміцнення

Elemental composition (Weight %) calc. by RIR method

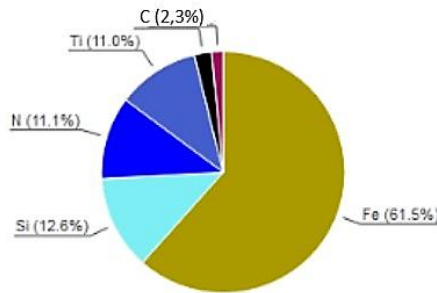


Рис. 12. Елементарний склад сталі 4X4BMFC після азотування і послідууючого термозміцнення

Таблиця 8

**Результати заміру мікротвердості зразків сталі 4X4BMFC після глибокого іонного азотування, загартування і відпуску**

№ 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 <sup>2</sup>
4	20	15	15,154	100	8 500		
5	20	15	15,014	100	8 400	8 450	845
9	40	16	16,046	100	7 500	7 500	750
10	50	17	17,664	100	6 900		
11	50	17	17,564	100	6 950	6 925	692,5
13	70	16	16,74	100	6 200	6 200	620
14	80	18	18,64	100	6 100	6 100	610
15	150	19	18,74	100	5 800	5 800	580

Результати вимірювання твердості експандерів по глибині наведені в таблиці 8.

В заводських умовах традиційна технологія термозміцнення експандерів представляє собою загартування з наступним

дво- або трикратним відпуском для отримання твердості 48–52 HRC. Запропоновані технології термозміцнення включають проведення іонно-плазмового азотування перед загартуванням з

відпусками (глибоке азотування на глибину 1,5–2 мм), після загартування з відпусками (на глибину 50–70 мкм). Це підвищує стійкість експандерів з 100 до 120–140 пресовок в залежності від технології. Це дозволить значно підвищити твердість поверхневого шару і тим самим збільшити

стійкість трубного інструменту на 25–30 % та знизити витрати по переробці виготовлення труб.

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



Рис. 13. Випробування трубного інструменту на ТОВ «ВО ОСКАР» (м. Дніпро)

Мета випробування: оцінити доцільність проведення різних технологій термозміцнення експандерів з використанням іонно-плазмового азотування з метою покращення їх експлуатаційної стійкості, твердості, теплостійкості, витривалості.

### Висновки

Запропоновані технології зміцнення трубопресового інструменту з використанням іонно-плазмового азотування дають можливість збільшити ресурс роботи трубопресового інструменту. Для експандерів трубопрофільного пресу з сталі 4Х4ВМФС після реалізації комплексної обробки з використанням глибокого ПА, комплексних обробок з використанням загартування, відпусків при різних температурах і наступного азотування значно на 25–30 % збільшує експлуатаційні властивості інструменту і термін його експлуатації, а також якість його поверхні,

що значно збільшує якість внутрішньої поверхні труб з високолегованих сталей.

Для експандерів з сталі 4Х4ВМФС після глибокого іонного азотування, загартування з багаторазовими відпусками, твердість поверхневого шару підвищилась до рівня 9500–10000 МПа, а експлуатаційна стійкість інструменту збільшилася в 1,5–2 рази, що забезпечується утворенням на поверхні інструменту зміцненого шару, який складається з нітридної зони Fe<sub>2</sub>-zN ( $\epsilon$ -фаза) і Fe<sub>4</sub>N ( $\gamma^1$ -фаза) і підшару азотистого фериту ( $\alpha$ -фаза), в якому при охолодженні виділяються нітриди хрому, молібдену, ванадію, що підтвердили результати досліджень та випробування механічних властивостей і результати промислової апробації інструменту.

*Результати досліджень отримані при фінансовій підтримці Національного фонду досліджень України у межах проєкту (реєстраційний номер 2025.06/0084)*

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Логинов Ю. Н., Игнатович Ю. В. Инструмент для прессования металлов : учеб. пос. 2014. 224 с.
2. Беляев С. В., Довженко И. Н., Соколов Р. Е., Рудницкий Э. А., Пещанский А. С. Конспект лекций по технологии прессования. 2007.
3. Гавриленко О. В. Основы технологии производства труб методом горячего пресования : навч. посіб. Харків: ХНАДУ, 2017. 144 с.

4. Кузьмич В. О., Косенко В. М., Бузенко Л. В. Технологія виробництва сталевих труб методом гарячого пресування : підруч. Київ : НТУУ «КПІ», 2011. 224 с.
5. Підкова О. В., Головня В. В., Лозицький В. М. Технологія виготовлення труб зі спеціальними властивостями : навч. посіб. Київ : Центр учбової літератури, 2008. 320 с.
6. Кузьмич В. О., Косенко В. М., Бузенко Л. В. Технологія виробництва сталевих труб методом гарячого пресування : підруч. Київ : НТУУ «КПІ», 2011. 224 с.
7. Петров В. О., Шинкаренко О. В. Виробництво труб шляхом гарячого пресування: підручник. Київ : Наукова думка, 2017. 320 с.
8. Головань В. В., Сергієнко А. О., Приходько І. О. Технологія виробництва труб методом гарячого пресування : навч. посіб. Кривий Ріг : КНТУ, 2014. 188 с.
9. Риженкова О. М., Чуйко В. С. Виробництво труб за технологією гарячого пресування : навч. посіб. Київ : Національний металургійний університет України, 2014. 200 с
10. Афтанділянц Є. Г., Зазимко Є. В., Лопатько К. Г. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство : підруч. Київ : НАУ, 2008. 234 с.
11. Косенко В. А., Кадомський С. В. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство : підруч. Київ : Університет «Україна», 2012. 267 с.
12. Більченко О. В., Дудка О. І., Лобода П. І. Матеріалознавство : навч. посіб. Київ : Кондор, 2009. 154 с.
13. Боброва Т. Б., Високок С. М., Глушко Ю. Ю., Пеховка М. В. та ін. Матеріалознавство : навч. посіб. Київ : Ресурсний центр «Гурт», 2019. 167 с.
14. Andrea Szilagyine Biro. Trends of nitriding processes. *Production Processes and Systems*. 2013. Vol. 6, № 1. Pp. 57–66.
15. Axinte Mihai, Nejeru Carmen, Perju Manuela Cristina, Cimpoeu Nicanor, Hopulele Ion. Research on hollow cathode effect and edge effect avoidance in plasma nitriding treatment. *Tehnomus New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies*. 2011. № 18. Suceava. Pp. 181–184.
16. Yao S. H. Evaluation of TiN/AlN nano-multilayer coatings on drills used for micro-drilling. *Surface and Coatings Technology*. 2005. Vol. 197. Pp. 351–357.
17. Куликов І. В. Вплив технологічних факторів на якість труб, отриманих методом гарячого пресування : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01. Харків : Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, 2011. 197 с.
18. Кривчик Л. С., Пінчук В. Л., Дейнеко Л. М., Панченко А. В., Тараненко А. О. Особливості хіміко-термічної обробки трубопресового інструменту з вітчизняних і зарубіжних сталей з метою їх зміцнення для роботи в важких умовах експлуатації. *Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід : VIII Міжнар. конф.* 2025. ISBN 978–617–8737–45–0.
19. Пінчук В. Л., Кривчик Л. С., Дейнеко Л. М., Столбовий В. О. Особливості глибокого іонно-плазмового азотування інструменту з штампових сталей для виробництва корозійностійких труб. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. Вип. 39. ISSN 2522-9117 (print), ISSN 2786-6149 (online). DOI: 10.52150/2522-9117-2025-39.
20. Кривчик Л. С., Пінчук В. Л., Дейнеко Л. М., Столбовий В. О., Князев С. А. Використання різноманітних режимів іонно-плазмового азотування штампових сталей для виготовлення трубопресового інструменту для пресування труб з високолегованих сталей. *Proceedings of III International Scientific and Practical Conference*. Vancouver, Canada, 2025. ISBN 978–1–4879–3796–6.
21. Кривчик Л. С., Пінчук В. Л., Хохлова Т. С. Шляхи зміцнення трубопресового інструменту для виробництва корозійностійких труб з метою покращення його експлуатаційних характеристик. *Theory and practice of science : key aspects*. Рим, Італія, 2021. С. 349–371.
22. Матвієнко І. І. Технологія хіміко-термічної обробки сталей. Київ : Вища школа, 2003. 416 с.
23. Павленко Р. М. Технологія хіміко-термічної обробки металів : навч. посіб. Київ : ВПЦ «Київський університет», 2014. 319 с.
24. Азаренков С. І., Бойко Л. В., Боровик В. В. та ін. Хіміко-термічна обробка сталей : навч. посіб. Київ : НТУУ «КПІ», 2015.
25. Пінчук В. Л., Кривчик Л. С., Дейнеко Л. М., Столбовий В. О. Комбіновані режими іонно-плазмового азотування трубного інструменту з метою покращення його експлуатаційних властивостей. *Science and technology : challenges, prospects and innovations*. Осака, Японія, 2024.
26. Пінчук В. Л., Дейнеко Л. М., Столбовий В. О., Кривчик Л. С., Панченко А. В. Сучасні тенденції у розвитку технологій термічної та хіміко-термічної обробки трубного інструменту. *Інноваційні технології в науці та освіті. Європейський досвід : VII міжнар. конф.* Дніпро, 2024.
27. Пінчук В. Л., Дейнеко Л. М., Столбовий В. О., Романова Н. С., Кривчик Л. С., Мачула Н. В. Формування азотованого шару сталі 5Х3В3МФС, отриманого в газоплазмовому двоступеневому вакуумно-дуговому розряді. *Теорія і практика металургії*. 2023. № 3. ISSN 1028-2335.
28. Andreyev A. O., Pavlenko V. M., Sisoyev Yu. O. Technology of mechanical engineering. Basics of vacuum-arc coatings : a textbook. Kharkiv : National Aerospace untitled M.Ye. Zhukovsky, Kharkiv. aviator in-t, 2018. 288 p.

29. Andreyev A. A., Sablev L. P., Grigorev S. N. Vacuum arc coating. Kharkiv : NNC HFTI, 2010. 318 p.
30. Андреев А. О., Жиров О. С., Соболев О. В., Столбовий В. О. та ін. Патент України 117008U C23C 14/32 на корисну модель. Спосіб хіміко-термічної обробки сталевих виробів. Бюл. № 11 від 12.06.2017.
31. Пінчук В. Л., Дейнеко Л. М., Столбовий В. О., Андреев А. О., Кривчик Л. С., Шпортько Ю. В. С21D 9/22 (2006.01) C23C 8/24 (2006.01). Патент на корисну модель № 162019. Спосіб хіміко-термічної обробки трубопресового інструмента зі штампових сталей (Україна).
32. Пінчук В. Л., Дейнеко Л. М., Столбовий В. О., Андреев А. О., Кривчик Л. С. С21D 9/22 (2006/01) C23C 8/24 (2006/01). Патент на корисну модель № 161979. Спосіб хіміко-термічної обробки трубопресового інструмента зі штампових сталей з проведенням глибокого іонного азотування (Україна).

## REFERENCES

1. Loginov Y.N. and Ignatovich Y.V. Tool for pressing metals : tutorial. 2014, 224 p. (in Russian).
2. Belyaev S.V., Dovzhenko I.N., Sokolov R.E., Rudnitsky E.A. and Peshchansky A.S. Lecture notes on pressing technology. 2007. (in Russian).
3. Gavrilenko O.V. *Osnovy tekhnolohiyi vyrobnystva trub metodom haryachoho presuvannya : navchal'nyy posibnyk* [Fundamentals of technology for producing pipes by hot pressing : a textbook]. Kharkiv : KhNADU, 2017, 144 p. (in Ukrainian).
4. Kuzmich V.O., Kosenko V.M. and Buzenko L.V. *Tekhnolohiya vyrobnystva stalevykh trub metodom haryachoho presuvannya : pidruchnyk* [Technology for producing steel pipes by hot pressing : a textbook]. Kyiv : NTUU "KPI", 2011, 224 p. (in Ukrainian).
5. Pidkova O.V., Golovnya V.V. and Lozytsky V.M. *Tekhnolohiya vyhotovlennya trub zi spetsial'nymy vlastyvostyamy : navchal'nyy posibnyk* [Technology of production of pipes with special properties : a textbook]. Kyiv : Center of Educational Literature, 2008, 320 p. (in Ukrainian).
6. Kuzmich V.O., Kosenko V.M. and Buzenko L.V. *Tekhnolohiya vyrobnystva stalevykh trub metodom haryachoho presuvannya : pidruchnyk* [Technology of production of steel pipes by hot pressing : a textbook]. Kyiv : NTUU "KPI", 2011, 224 p. (in Ukrainian).
7. Petrov V.O. and Shynkarenko O.V. *Vyrobnystvo trub shlyakhom haryachoho presuvannya : pidruchnyk* [Production of pipes by hot pressing : a textbook]. Kyiv : Naukova Dumka, 2017, 320 p. (in Ukrainian).
8. Golovan V.V., Sergienko A.O. and Prykhodko I.O. *Tekhnolohiya vyrobnystva trub metodom haryachoho presuvannya : navchal'nyy posibnyk* [Technology of production of pipes by hot pressing : a textbook]. Kryvyi Rih : KNTU, 2014, 188 p. (in Ukrainian).
9. Ryzhenkova O.M. and Chuyko V.S. *Vyrobnystvo trub za tekhnolohiyeyu haryachoho presuvannya : navch. posib.* [Pipe production using hot pressing technology : a textbook]. Kyiv : National Metallurgical University of Ukraine, 2014, 200 p. (in Ukrainian).
10. Aftandylyants E.G., Zazimko E.V. and Lopatko K.G. *Tekhnolohiya konstruktivnykh materialiv i materialoznavstvo : pidruchnyk* [Technology of structural materials and materials science : a textbook]. Kyiv : NAU, 2008, 234 p. (in Ukrainian).
11. Kosenko V.A. and Kadomsky S.V. *Tekhnolohiya konstruktivnykh materialiv ta materialoznavstvo : pidruchnyk* [Technology of structural materials and materials science : a textbook]. Kyiv : University "Ukraine", 2012, 267 p. (in Ukrainian).
12. Bilchenko O.V., Dudka O.I. and Loboda P.I. *Materialoznavstvo : navchal'nyy posibnyk* [Materials Science : a textbook]. Kyiv : Condor Publ., 2009, 154 p. (in Ukrainian).
13. Bobrova T.B., Vysokos S.M., Glushko Y.Yu., Pekhovka M.V. and oth. *Materialoznavstvo : navchal'nyy posibnyk* [Materials Science : a textbook]. Kyiv : Resource Center "Gurt", 2019, 167 p. (in Ukrainian).
14. Andrea Szilagyine Biro. Trends of nitriding processes. Production Processes and Systems. 2013, vol. 6, no. 1, pp. 57–66.
15. Axinte Mihai, Nejneru Carmen, Perju Manuela Cristina, Cimpoeu Nicanor and Hopulele Ion. Research on hollow cathode effect and edge effect avoidance in plasma nitriding treatment. Tehnomus New Technologies and Products in Machine Manufacturing Technologies. No.18, Suceava, 2011, pp. 181–184.
16. Yao S.H. Evaluation of TiN/AlN nano-multilayer coatings on drills used for micro-drilling. Surface and Coatings Technology. 2005, vol. 197, pp. 351–357.
17. Kulikov I.V. *Vplyv tekhnolohichnykh faktoriv na yakist' trub, otrymanykh metodom haryachoho presuvannya : dys. ... kand. tekhn. nauk : 05.16.01.* [The influence of technological factors on the quality of pipes obtained by hot pressing : dissertation ... candidate of technical sciences : 05.16.01.]. Kharkiv : Petro Vasylenko Kharkiv National Technical University of Agriculture, 2011, 197 p. (in Ukrainian).
18. Kryvchyk L.S., Pinchuk V.L., Deineko L.M., Panchenko A.V. and Taranenko A.O. *Osoblyvosti khimiko-termichnoyi obrobky trubopresovoho instrumentu z vitchyznyanykh i zarubizhnykh staley z metoyu yikh zmitsnennya dlya roboty v vazhkykh umovakh ekspluatatsiyi* [Features of chemical-thermal treatment of pipe-pressing tools from domestic and foreign steels for their strengthening for work in difficult operating conditions]. *Innovatsiyi tekhnolohiyi v nautsi ta*

osviti. *Yevropeys'kyi dosvid : VIII Mizhnarodna konferentsiya* [Innovative Technologies in Science and Education. European Experience : VIII International Conference]. 2025, ISBN 978-617-8737-45-0. (in Ukrainian).

19. Pinchuk V.L., Kryvchuk L.S., Deineko L.M. and Stolbovyi V.O. *Osoblyvosti hlybokoho ionno-plazmenoho azotuvannya instrumentu z shtampovykh staley dlya vyrobnytstva koroziiystykykh trub* [Features of deep ion-plasma nitriding of tools made of die steels for the production of corrosion-resistant pipes]. *Fundamental'ni ta prykladni problemy chornoyi metalurhiyi* [Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy]. Iss. 39, ISSN 2522-9117 (print), ISSN 2786-6149 (online). DOI: 10.52150/2522-9117-2025-39. (in Ukrainian).

20. Kryvchuk L.S., Pinchuk V.L., Deyneko L.M., Stolbovyi V.O. and Knyazev S.A. *Vykorystannya riznomanitnykh rezhymiv ionno-plazmenoho azotuvannya shtampovykh staley dlya vyhotovlennya trubopresovoho instrumentu dlya presuvannya trub z vysokolehovanykh staley* [Use of various modes of ion-plasma nitriding of die steels for the manufacture of pipe pressing tools for pressing pipes made of high-alloy steels]. Proceedings of III International Scientific and Practical Conference. Vancouver, Canada, 2025, ISBN 978-1-4879-3796-6. (in Ukrainian).

21. Kryvchuk L.S., Pinchuk V.L. and Khokhlova T.S. *Shlyakhy zmitsnennya trubopresovoho instrumentu dlya vyrobnytstva koroziiystykykh trub z metoyu pokrashchennya yoho ekspluatatsiynykh kharakterystyk* [Ways to strengthen the pipe pressing tool for the production of corrosion-resistant pipes in order to improve its operational characteristics]. Theory and Practice of Science : Key Aspects. Rome, Italy, 2021, pp. 349-371. (in Ukrainian).

22. Matvienko I.I. *Tekhnolohiya khimiko-termichnoyi obrobky staley* [Technology of chemical-thermal treatment of steels]. Kyiv : Higher School, 2003, 416 p. (in Ukrainian).

23. Pavlenko R.M. *Tekhnolohiya khimiko-termichnoyi obrobky metaliv : navchal'nyy posibnyk* [Technology of chemical-thermal treatment of metals : a textbook]. Kyiv : VPC "Kyiv University", 2014, 319 p. (in Ukrainian).

24. Azarenkov S.I., Boyko L.V., Borovik V.V. et al. *Khimiko-termichna obrobka staley : navchal'nyy posibnyk* [Chemical-thermal treatment of steels : a textbook]. Kyiv : NTUU "KPI", 2015. (in Ukrainian).

25. Pinchuk V.L., Kryvchuk L.S., Deineko L.M. and Stolbovyi V.O. *Kombinovani rezhymy ionno-plazmenoho azotuvannya trubnoho instrumentu z metoyu pokrashchennya yoho ekspluatatsiynykh vlastyvostry* [Combined modes of ion-plasma nitriding of tubular tools to improve their operational properties]. Science and Technology : Challenges, Prospects and Innovations. 2024, Osaka, Japan. (in Ukrainian).

26. Pinchuk V.L., Deineko L.M., Stolbovy V.O., Kryvchuk L.S. and Panchenko A.V. *Suchasni tendentsiyi u rozvytku tekhnolohiy termichnoyi ta khimiko-termichnoyi obrobky trubnoho instrumentu* [Modern trends in the development of technologies for thermal and chemical-thermal treatment of pipe instruments]. Innovative Technologies in Science and Education. European Experience. 2024, Dnipro, Ukraine. (in Ukrainian).

27. Pinchuk V.L., Deineko L.M., Stolbovy V.O., Romanova N.S., Kryvchuk L.S. and Machula N.V. *Formuvannya azotovanoho sharu stali 5KH3V3MFS, otrymano v hazoplazmovomu dvostupenevomu vakuumno-duhovomu rozryadi* [Formation of a nitrided layer of 5Kh3V3MFS steel obtained in a gas-plasma two-stage vacuum-arc discharge]. *Teoriya i praktyka metalurhiyi* [Theory and Practice of Metallurgy]. 2023, no. 3, ISSN 1028-2335. (in Ukrainian).

28. Andreyev A.O., Pavlenko V.M. and Sisoyev Yu.O. *Tehnologiya mashinobuduvannya. Osnovi otrimannya vakuumno-dugovih pokrytyy : pidruchnik* [Technology of mechanical engineering. Basics of vacuum-arc coatings : a textbook]. Kharkiv : National Aerospace untitled M.Ye. Zhukovsky, Kharkiv. aviator in-t, 2018, 288 p. (in Ukrainian).

29. Andreyev A.A., Sablev L.P. and Grigorev S.N. *Vakuumno-dugovye pokrytya* [Vacuum arc coating]. Kharkiv : NNC HFTI, 2010, 318 p. (in Russian).

30. Andreyev A.O., Jirov O.S., Sobol' O.V., Stolbovyi V.O. and oth. *Patent Ukraine 117008U C23C 1432 na korisnu model. Sposib khimiko-termichnoi obrobki stalev v virobiv* [Patent of Ukraine 117008U C23C 14\32 on the utility model. Method of chemical and thermal treatment of steel products]. Byul. no. 11 from 12.06.2017, 2017. (in Ukrainian).

31. Pinchuk V.L., Deineko L.M., Stolbovy V.O., Andreyev A.O., Kryvchuk L.S. and Shportko Y.V. *C21D 9/22 (2006.01) C23C 8/24 (2006.01). Patent na korysnu model' № 162019. Sposib khimiko-termichnoyi obrobky trubopresovoho instrumenta zi shtampovykh staley* [C21D 9/22 (2006.01) C23C 8/24 (2006.01). Utility model patent no. 162019. Method of chemical and thermal treatment of pipe pressing tools made of die steels]. Ukraine. (in Ukrainian).

32. Pinchuk V.L., Deineko L.M., Stolbovy V.O., Andreev A.O. and Kryvchuk L.S. *C21D 9/22 (2006/01) C23C 8/24 (2006/01). Patent na korysnu model' № 161979. Sposib khimiko-termichnoyi obrobky trubopresovoho instrumenta zi shtampovykh staley z provedennyam hlybokoho ionnoho azotuvannya* [C21D 9/22 (2006/01) C23C 8/24 (2006/01). Utility model patent no. 161979. Method of chemical-thermal treatment of pipe pressing tools made of die steels with deep ion nitriding]. Ukraine. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 18.03.2026.

Прийнято після рецензування: 15.05.2026.

Дата публікації: 29.05.2026.