

УДК 669.017:621.73

DOI: 10.30838/J.PMNTM.2413.270922.42.904

## ЗМІЦНЕННЯ ТРУБОПРЕСОВОГО ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА КОРОЗІЙНОСТІЙКИХ ТРУБ ЗА ДОПОМОГОЮ ХІМІКО-ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

КРИВЧИК Л. С.<sup>1\*</sup>, *аспір.*,РОМАНОВА Н. С.<sup>2</sup>, *канд. техн. наук, доц.*

<sup>1\*</sup> Кафедра матеріалознавства і термічної обробки металів, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49600, Дніпро, Україна, тел.+38 (056) 373-15-44, e-mail: [lcivchik@gmail.com](mailto:lcivchik@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-7769-3808

<sup>2</sup> Кафедра матеріалознавства і термічної обробки металів, Український державний університет науки і технологій, вул. Лазаряна, 2, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 373-15-44, e-mail: [udunt@diit.edu.ua](mailto:udunt@diit.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-3211-8009

**Анотація.** *Постановка проблеми.* У виробництві корозійностійких труб на трубопресових установках актуальною проблемою постає низька стійкість трубного інструменту. Високі механічні властивості інструменту і його теплостійкість (червоностійкість) досягаються спеціальним легуванням і термічною обробкою. Але «традиційні» способи підвищення зносостійкості (загартування з відпуском, термомеханічна обробка) майже вичерпали свої можливості. Тому певний інтерес становить розроблення і коректування методів термічної і хіміко-термічної обробки для підвищення зносостійкості інструменту. Ефективний спосіб зміни складу поверхневого шару штампового інструменту, що забезпечує необхідний комплекс властивостей його робочої поверхні, – це 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. Проведення карбонітрації в розплавах солей ціанатів і карбонатів матричних кілець складних матриць і голок-оправок для пресування труб на трубопрофільних пресах значно підвищує стійкість інструменту завдяки високим показникам поверхневої твердості, втомної міцності на 50...60 % за рахунок створення стискних напружень на поверхні; поліпшує якість поверхні самого інструменту і, як наслідок, якість внутрішньої поверхні корозійностійких труб. Іонне азотування (порівняно з пічним) має такі 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. **Мета статті** – показати доцільність використання сучасних технологій хіміко-термічної обробки (карбонітрація, іонне азотування), які підвищують твердість, зносостійкість інструменту, що забезпечує якість внутрішньої поверхні корозійностійких труб і знижує витрати на переробку і виготовлення труб, а також результативність побудови математичної моделі розподілу мікротвердості в поверхневих шарах інструменту після хіміко-термічної обробки за допомогою прикладних комп'ютерних програм «MatChad», «Echel». **Висновок.** У зв'язку з низькою стійкістю трубопресового інструменту виникла необхідність в удосконаленні зміцнювальних технологій трубного інструменту, оптимізації режимів таких технологій, розробленні нових методів зміцнення. Проведення хіміко-термічної обробки після загартування з відпуском інструментальної сталі 4X5MФ1С і 5X3B3MФС (карбонітрації, іонного азотування), значно (на 25–30 %) збільшує експлуатаційні властивості інструменту і термін його експлуатації, а також якість його поверхні, що поліпшує якість внутрішньої поверхні корозійностійких труб.

**Ключові слова:** *інструмент; матричне кільце; голка-оправка; мікротвердість; зносостійкість, пресування*

## STRENGTHENING OF PIPE-PRESSING TOOLS FOR THE PRODUCTION OF CORROSION-RESISTANT PIPES USING CHEMICAL AND THERMAL TREATMENT

KRIVCHIK L.S.<sup>1\*</sup>, *Postgraduate Student,*ROMANOVA N.S.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*

<sup>1\*</sup> Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, Ukrainian State University of Science and Technology, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-44, e-mail: [lcivchik@gmail.com](mailto:lcivchik@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-7769-3808

<sup>2</sup> Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, Ukrainian State University of Science and Technology, 2, Lazaryana St., Dnipro, 49600, Ukraine, tel. +38 (056) 373-15-44, e-mail: [udunt@diit.edu.ua](mailto:udunt@diit.edu.ua), ORCID ID: 0000-0002-3211-8009

**Abstract. Problem statement.** In the production of corrosion-resistant pipes at pipe-pressing plants, the low durability of the pipe tool is a burning issue. High mechanical properties of the tool and its heat resistance (redness resistance) are achieved due to alloying and heat treatment. However, the “traditional” means of increasing wear resistance (hardening with tempering, thermomechanical processing) are almost exhausted. Therefore it is of some interest to develop and correct thermal and chemical-thermal treatment methods in order to increase the wear resistance of the tool. Chemical and thermal treatment is an effective way of changing the surface layer composition for a stamping tool to provide the necessary set of properties for its working surface. This changes the structure and properties of the surface layer and increases the strength, wear and heat resistance of the steel through the formation of carbides, nitrides, borides, etc. that are stable during heating process. Conducting carbonitridation in melts of cyanate salts and carbonates for matrix rings of complex matrices and mandrel needles for pressing pipes on pipe profile presses significantly increases the durability of the tool due to high indicators of surface hardness, fatigue strength by 50...60 % due to the creation of compressive stresses on the surface; improves the surface quality of the tool itself and, as a result, the quality of corrosion-resistant pipes inner surface. Ionic nitriding (compared to furnace nitriding) has the following advantages: it accelerates diffusion processes by 1,5–2 times; allows to get a diffusion layer of adjustable composition and structure; characterized by slight deformations of products and a high class of surface cleanliness. *The purpose of the article* – to show the expediency of using modern chemical-thermal treatment technologies (carbonitridation, ionic nitriding), which increase the hardness and wear resistance of the tool, which ensures the quality of corrosion-resistant pipes inner surface and reduces the costs of processing the pipes manufacture, as well as the effectiveness of building a mathematical model of the distribution of microhardness in surface layers of the tool after chemical and thermal treatment with the help of applied computer programs “MathCad”, “Excel”. **Conclusions.** Due to the low durability of the pipe press tool, there was a need to improve the strengthening technologies of the pipe tool, optimize the modes of such technologies, and develop new strengthening methods. Conducting chemical-thermal treatment after hardening and tempering of tool steel X40CrMoV5-1-1 and 30WCrV17-2 (carbonitridation, ion nitriding) significantly increases the operational properties of the tool and its service life by 25...30 %, as well as the quality of its surface, which significantly increases the quality of corrosion-resistant pipes inner surface.

**Keywords:** *tool; matrix ring; mandrel needle; microhardness; wear resistance, pressing*

### Постановка проблеми

Виробництво труб – найбільша галузь промисловості України. Багато труб використовують нафтова та газова промисловість. Але важливими споживачами є автомобільна, тракторна, машинобудівна, суднобудівна, авіаційна, хімічна, харчова промисловості та інші галузі народного господарства. Виробництво труб із легованих та високолегованих марок сталей охоплює майже всі напрямки будівельної галузі.

Значного поширення набув процес виробництва сталевих труб методом пресування на гідравлічних пресах. Спосіб гарячого пресування дозволяє виготовляти труби з усіх сталей і сплавів, які важко деформуються. На відміну від трубопрокатних установок на пресах, можна одержати труби з більш тонкою стінкою й меншого діаметра, особливо коли на трубопресових установках застосовують редуційні, редуційно-розтяжні і калібрувальні стани [1].

Якість труб, отриманих пресуванням, визначається значною мірою стійкістю інструменту. Робочий інструмент працює в умовах високих температур, інтенсивних швидкостей ковзання і значного питомого тиску, що зумовлює необхідність використати як матеріал високолеговані теплостійкі інструментальні сталі, які володіють підвищеною в'язкістю і міцністю [2].

Головну роль у процесі пресування труби на горизонтальному трубопрофільному пресі відіграють матричні кільця складних матриць та голки-оправки.

Особливість виробництва труб пресуванням із нержавіючих і високолегованих сталей – це низька стійкість пресового інструменту (табл. 1).

Тому пошук раціональних шляхів зміцнення і підвищення триботехнічних характеристик трубного інструменту являє собою актуальну проблему у виробництві труб із високолегованих сталей [3].

Стійкість пресового інструменту [3]

Інструмент	Стійкість для труб із		
	вуглецевих сталей	нержавіючих сталей	сплавів і високолегованих сталей
Матричні кільця і вставки	300–500	До 5–7	До 5
Трубні оправки (голки)	300–500	50–80	20–50

Для рішення цієї проблеми автори провели реальні дослідження і випробування на діючих підприємствах. Розроблено параметри сучасних зміцнювальних технологій і запропоновано методи оптимізації режимів термічної і хіміко-термічної обробки.

### Аналіз публікацій

Матриця – найважливіший інструмент, у 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 [1].

Динамічне навантаження матриць забезпечує появу тріщин у місці концентрації напружень і температурних градієнтів, а також наступні крихкі руйнування.

У результаті дії температурних і структурних напружень на робочих поверхнях матриць з'являються сітки розгарних тріщин, які поступово розширюються і заповнюються пресованим металом, що в подальшому спричинює руйнування матриць (рис. 1).

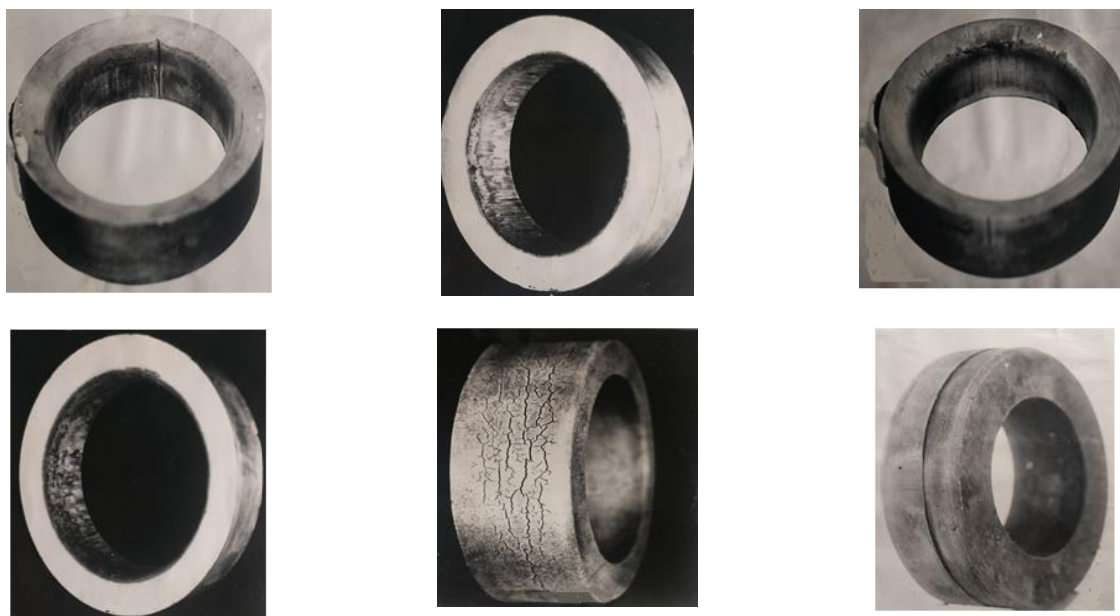


Рис. 1. Дефекти матричних кілець

Пресові голки, або трубні оправки, – це інструмент, який утворює внутрішню порожнину труби (рис. 2). Під час пресування голки працюють у найбільш важких умовах, тому що піддаються

розтягувальним та здавлювальним напругам за підвищеної температури поверхневого шару внаслідок тертя металу і теплового ефекту деформації.

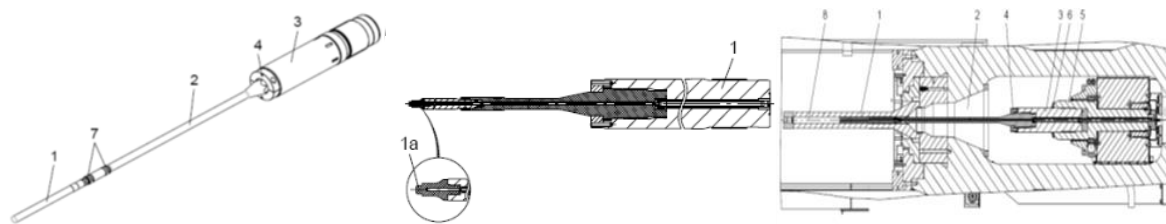


Рис. 2. Голка-оправка

У виготовлені голок-оправок для пресування труб та матричних кілець найчастіше використовують вторинно-твердні штампові сталі 4X5МФ1С і 5X3ВЗМФС, які піддають термічній обробці. Традиційна технологія термозміцнення інструменту із штампових сталей являє собою загартування з наступним відпуском. 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 [4].

При загартуванні важливим завданням є захист від знеуглецювання; оскільки температури загартування високі. Обов'язкове застосування заходів захисту; найбільш доцільне нагрівання в контрольованих атмосферах, у соляних ваннах або у вакуумі.

Після загартування такі сталі рекомендується підстужувати на повітрі до 950–900 °С, а потім охолоджувати в маслі або полімерних загартувальних середовищах для можливості регулювання процесу загартування. Aqua-Quench 400 – високоякісне полімерне гартівне середовище, розроблене на основі акрилату для обробки сталей як низького, так і високого загартування. Охолоджувальні властивості продукту можуть варіюватися від охолоджувальних властивостей води до властивостей масла для холодного загартування з нормальною швидкістю охолодження, залежно від концентрації розчину.

Низька швидкість охолодження, що забезпечується розчинами Aqua-Quench 400 на конвективній стадії процесу загартування, дозволяє обробляти сталеві

вироби широкого спектра, які не підходять для загартування в стандартних полімерних гартівних середовищах на основі поліалкіленгліколю (РАG). Aqua-Quench 400 усуває дим і газу, пару і небезпеку займання, що виникають під час загартування в маслі, і забезпечує найвищий ступінь варіювання швидкості охолодження.

До складу продукту входить комплекс інгібіторів корозії, що не містить нітрит і забезпечує чудовий захист пристосувань і приладдя гартівних ванн, труб та систем охолодження. Aqua-Quench 400 зазвичай використовується за концентрації 20–35 % і проявляє охолоджувальні властивості, подібні до властивостей масел. Aqua-Quench 400 можна використовувати в багатьох різних типах печей [5].

Операцію відпуску виконують негайно після загартування з метою попередження тріщин. Як правило, відпуск роблять на твердість 48–53 HRC. За більшої твердості швидше утворюються тріщини розпау, а за меншої знижується зносостійкість [5].

Наступний відпуск викликає додаткове зміцнення внаслідок дисперсійного твердіння. Для підвищення в'язкості його виконують найчастіше за більш високих температур на більш низьку твердість: 45–52 HRC і трооститну структуру (рис. 3).

Ефективний спосіб зміни складу поверхневого шару штампового інструменту, що забезпечує необхідний комплекс властивостей його робочої поверхні, – це хіміко-термічна обробка. Вона являє собою один із найбільш ефективних методів підвищення довговічності і надійності інструментів. Це в першу чергу визначається тим, що при ХТО змінюються хімічний склад, структура і властивості поверхневих шарів металу, саме тих, в яких під час експлуатації

концентруються максимальні напруги, зароджуються і розвиваються тріщини, відбуваються процеси зношування і корозійного розтріскування [6].

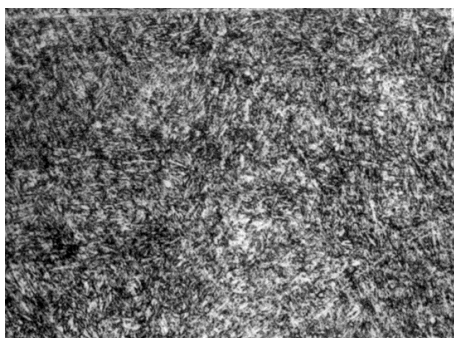


Рис. 3. Мікроструктура сталі 4X5MФ1С після загартування від 1 070 °С і відпущеної за 550–570 °С (1 відпуск), 530–550 °С (2 відпуск) (троостит відпуску),  $\times 500$

За допомогою хіміко-термічної обробки (ХТО) можна підвищити поверхневу твердість, зносостійкість, втомну міцність, корозійну стійкість, окалиностійкість деформівного інструменту.

### Мета статті

Показати доцільність використання сучасних технологій хіміко-термічної обробки (карбонітрація, іонне азотування), які підвищують твердість, зносостійкість інструменту, що забезпечує якість внутрішньої поверхні корозійностійких труб і знижує витрати на переробку виготовлення труб, а також результативність побудови математичної моделі розподілу мікротвердості в поверхневих шарах інструменту після хіміко-термічної обробки за допомогою прикладних комп'ютерних програм «Matchad», «Exel».

### Наукова новизна

Уперше науково обґрунтовано вибір більш ефективного режиму термозміцнення трубного інструменту (з проведенням мікроструктурних досліджень), що дозволяє його використовувати в реальних умовах виробництва корозійностійких труб на трубних підприємствах «ПрАТ Сентравіс Продакшн Юкрейн», «ТОВ ВО Оскар» та ін.

### Практична значущість

Удосконалення технології термічної обробки трубного інструменту (загартування з відпуском і наступним іонним азотуванням, карбонітрацією, замість звичайної технології – загартування з відпуском) дозволить збільшити стійкість інструменту на 30–40 % та знизити витрати на переробку виготовлення корозійностійких труб, а також поліпшити якість внутрішньої поверхні труб.

### Результати досліджень

Альтернативою газовому азотуванню, коли в поверхневому шарі утворюються карбонітридні фази, більш пластичні і менш крихкі, ніж при азотуванні, стала карбонітрація трубопресового інструменту

Перевага цієї технології полягає у високій швидкості насичення, рівномірності нагрівання і насичення в розплаві, збільшенні зносостійкості і корозійної стійкості поверхні, зниженні коефіцієнта тертя в 1,5–5 разів, екологічності і нетоксичності ціанатних солей. Процес ведуть за температури 540–600 °С, час витримки 4–6 годин, товщина шару 0,12–0,3 мм [7]. Процес розроблений в МВТУ ім. М. Баумана професором Д. Прокошкіним.

Процес являє собою дифузійне насичення поверхні азотом і вуглецем одночасно. Він відомий в усьому світі завдяки брендам: ARCOR, TENIFER, TUFFTRIDE, MELONITE, QPQ, DYNABLUE, BLACKNITRIDE та ін. Для надання корозійних властивостей карбонітрованим виробам рекомендується проводити процес оксидування в нітритно-лужному розплаві за 350–400 °С. Метод карбонітрації з наступним оксидуванням отримав назву «НОК-процес» (низькотемпературна оксикарбонітрація) [8].

Послідовність операцій при карбонітрації: попередня підготовка – очищення, промивання, знежирення; підігрівання деталей до температури 350–400 °С; потім проводять карбонітрацію в розплаві солей ціанатів і карбонатів

лужних металів, підстижування на повітрі до 350–400 °С, оксидування в лужному розплаві за 350–400 °С протягом 0,5 год., і наступне охолодження на повітрі до кімнатної температури [9].

Азот і вуглець, присутні в карбонітованому шарі, сповільнюють процеси перетворення твердих розчинів і коагуляцію карбонітридних фаз, унаслідок чого висока твердість карбонітованого шару зберігається до температур вище 650 °С, а інтенсивне охолодження голки після кожного циклу пресування сприяє зберіганню карбонітованого шару і його властивостей у подальшій експлуатації



інструменту [8].

Карбонітрація голок-оправок і матричних кілець для пресування корозійностійких труб проведена на «ТОВ КАРБАЗ» м. Суми (рис. 4). Голки-оправки трубопрофільного пресу зусиллям 16 МН у кількості трьох штук зі сталі 4Х5МФ1С діаметром 50 мм і довжиною 1 300 мм виготовлені на ТОВ «Метінсервіс Груп» (м. Нікополь) і піддані зміцнювальній термічній обробці (ступеневе загартування з 1 050–1 070 °С та двократному відпуску за 550–570 °С (1-й відпуск) та 530–550 °С (2-й відпуск).

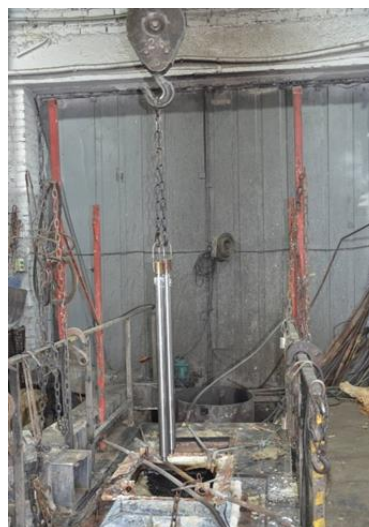


Рис. 4. Карбонітрація трубопресового інструменту

Матричні кільця трубопрофільного пресу у кількості восьми штук: зі сталі 5Х3В3МФС (ДИ-23) шість штук (1 штука діаметром 63,5 мм, 2 штуки діаметром 73,5 мм, 3 штуки діаметром 71,5 мм); зі сталі 4Х5МФ1С дві штуки діаметром 71,5 та 73,5 мм виготовлені на ТОВ «Метінсервіс Груп» (м. Нікополь) і піддані зміцнювальній термічній обробці (ступеневе загартування з 1 070–1 080 °С та двократному відпуску за 550–570 °С (1-й відпуск) та 530–550 °С (2-й відпуск).

Для дослідження також із поковок діаметром 250 мм вирізали зразки-свідки розміром 20×20×20 мм і піддали аналогічній дослідним зразкам інструменту термічній обробці.

Найбільш надійно оцінюють результати азотування, карбонітрації металографічні дослідження, які дають відомості про товщину і будову шару з'єднань і дифузійного шару.

Також проведено електронні дослідження металографічних шліфів. Вихідні шліфи були порізані на тонкі зразки по 5 мм, приготовлені і піддані вивченню на растровому електронному мікроскопі (РЕМ), висока дозвільна здатність (до 60 А) і виняткова глибина різкості якого роблять його майже незамінним для металографічних досліджень.

Замір твердості поверхні зразків після азотування, карбонітрації виконано за допомогою мікротвердоміра (мікроскопа) типу ПМТ-3 з навантаженням 100 гс HV<sub>0,1</sub>.

У процесі карбонітрації на поверхні сталей формується зміцнений шар, що складається з декількох зон. Верхній шар являє собою  $\epsilon$ -карбонітрид типу  $Fe_3(N, C)$ , під яким міститься дифузійна зона



Рис. 5. Мікроструктура голки-оправки зі сталі 4Х5МФ1С після загартування, відпуску і карбонітрації,  $\times 600$

Випробування трубопресового інструменту проведено на пресовій дільниці підприємства «ТОВ ВО Оскар» (м. Дніпро).

Якщо стійкість голок-оправок після звичайного термозміцнення складає 50–80 пресовок, то голки, додатково піддані хіміко-термічній обробці (карбонітрації), показали стійкість 100–130 пресовок завдяки більш високій твердості, зносостійкості, теплостійкості, утворенню особливої структури на поверхні внаслідок проведення карбонітрації в розплавах солей ціанатів і карбонатів. Якщо стійкість матричних кілець після звичайного термозміцнення складає 4–6 пресовок, то кільця, додатково піддані хіміко-термічній обробці (карбонітрації), показали стійкість 7–9 пресовок завдяки більш високій твердості, теплостійкості.

У лабораторії плазмових технологій навчально-наукового центру Харківського фізико-технічного інституту Національної академії наук України (м. Харків) розроблено новий вискоефективний спосіб іонного модифікування поверхонь інструментальних і конструкційних сталей і сплавів у плазмі двоступеневого дугового розряду низького тиску. Азотування в плазмі двоступеневого дугового розряду має

(гетерофазний шар), що складається з твердого розчину вуглецю і азоту в залізі із включеннями карбонітридних фаз, твердість якої значно вища твердості серцевини [7] (рис. 5, 6).



Рис. 6. Мікроструктура матричного кільця зі сталі 5Х3В3МФС після загартування, відпуску і карбонітрації,  $\times 600$

низку переваг і недоліків. Одна з важливих переваг полягає в тому, що процес відбувається за тисків азоту 0,01–0,1 Па, тобто за значень азотного потенціалу значно нижчих порогового. При цьому ймовірність утворення нітридних фаз, і особливо крихкої  $s$ -фази, значно знижується.

Дослідження показали, що відмінною рисою мікроструктури азотованого шару після іонно-плазмового азотування є наявність дрібнодисперсної дуже міцної  $\epsilon$ -фази. Завдяки наявності в шарі цієї фази поверхнева твердість азотованих деталей вища майже на HV 160–180, ніж за газового азотування [10]. Азотований шар при електронному дослідженні наведений на рисунку 7.

У досліді 3 кільця зі сталі 5Х3В3МФС діаметром 73,5 та 71,5 мм і 2 (два) кільця зі сталі 4Х5МФ1С діаметром 73,5 мм були піддані іонному азотуванню в плазмі двоступеневого дугового розряду в модифікованій установці «Булат-6» в ННЦ ХФТІ (м. Харків).

Кільця виготовлені на ТОВ «Метінсервіс Груп» (м. Нікополь) і піддані зміцнювальній термічній обробці (ступеневе загартування з 1 080–1 100 °С та

двократному відпуску за 550–570 °С (1-й відпуск) та 530–550 °С (2-й відпуск).

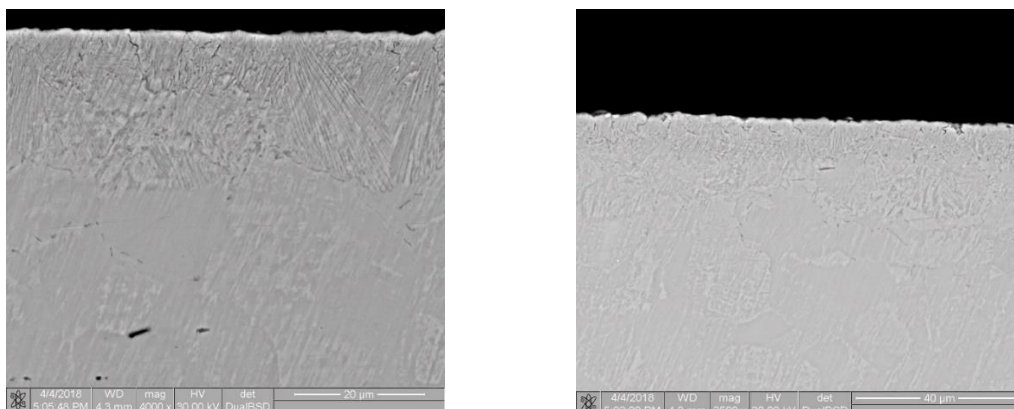


Рис. 7. Азотований шар при електронному дослідженні

Схема модернізованої установки «Булат» показана на рисунку 8. Камеру відкачували до  $1 \cdot 10^{-3}$  Па, напускали в неї азот до тиску 0,1...0,5 Па, включали випарник 2 і подавали на катод випарника 4 позитивної напруги від джерела 7 (положення II перемикача 9). При цьому між корпусом вакуумної камери і катодом випарника 4, в даному випадку анодом, запалюється дуговий газовий розряд, який підтримується джерелом 7. Струм газового розряду 200 А.

Матричні кільця (3 штуки) й експериментальні зразки з розмірами  $20 \times 20 \times 3$  мм попередньо промивали лужним розчином в ультразвуковій ванні, а потім нефрасом С2-80/120. Зразки завантажували в модернізовану установку типу «БУЛАТ-6». На інструменти подавали позитивну напругу перемикачем 10, регулюючи величину струму в джерелі 8 у межах декількох десятків ампер з метою підтримки температури інструментів на рівні 450–500 °С.

Електронне бомбардування забезпечувало нагрівання й азотування інструментів. Азотування при позитивному потенціалі дозволяє істотно зменшити ймовірність виникнення на інструментах мікродуг і уникнути іонного розтраплювання їх поверхні. Після досягнення необхідної товщини азотованого шару (~30 мкм) на інструмент подавали негативну напругу. Під час триваючого азотування одночасно відбувалася очистка поверхні іонами азоту [11; 12].

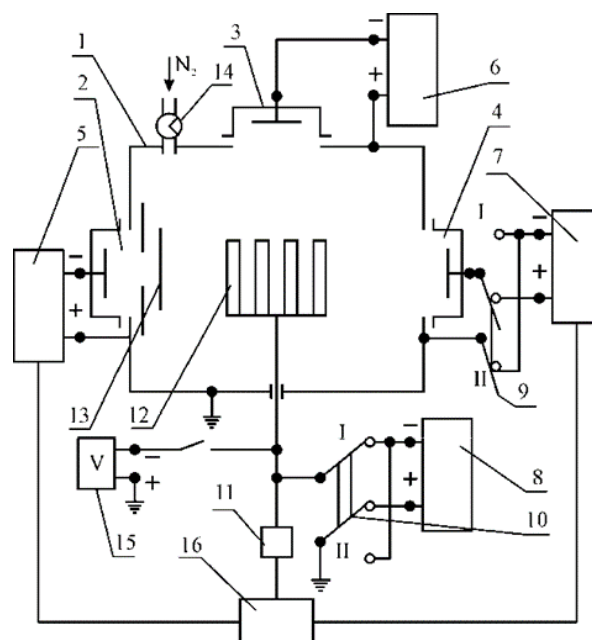


Рис. 8. Схема вакуумно-дугової установки для іонного азотування: 1 – корпус вакуумної камери; 2, 3, 4 – вакуумно-дугові випарники; 5, 6, 7 – джерела живлення випарників; 8 – джерело живлення підкладки; 9, 10 – перемикачі; 11 – поворотний пристрій; 12 – інструменти для оброблення; 13 – екран, прозорий для газу й електронів; 14 – система автоматичної підтримки тиску газу; 15 – генератор високовольтних імпульсів; 16 – блок автоматичного керування осадженням багатошарових покриттів

Іонна очистка з активацією поверхні підкладок проводилася прискореними іонами азоту в газовій плазмі дугового розряду за тиску азоту 0,66 Па. Для створення газового розряду в робочому об'ємі камери необхідно включити випарник 2 і при цьому створюється газо-металева



плазма, яка через екран (3) буде емітером електронів для газового розряду в об'ємі робочої камери (1) (рис. 8). При подачі на корпус вакуумно-дугового випарника 6 позитивного потенціалу перемикачем 8 від джерела живлення дуги за присутності азоту з тиском 0,05–0,5 Па в робочому об'ємі камери виникає газовий дуговий розряд.

При подачі на підкладку (4), а отже і на деталі високого негативного потенціалу – 1 000..1 300 В відбувається її розігрів за рахунок бомбардування іонами азоту до температури 480...540 °С, що забезпечує процеси азотування на поверхні зразків. Температура підкладок надалі підтримується зміною величини негативного постійного потенціалу 9. Тривалість процесу азотування залежить від необхідної товщини шару і температури підкладки, в даному випадку час азотування 1 година [13–15].

Випробування матричних кілець після іонного азотування виконано на трубопрофільному пресі м. Дніпро (ТОВ «ВО ОСКАР»).

Проведення іонного азотування матричних кілець із використанням ДВДР у вакуумно-дугових установках типу «Булат» (ННЦ ХФТІ) значно підвищує стійкість інструменту завдяки високим показникам поверхневої твердості. Якщо стійкість матричних кілець зі сталі 5Х3В3МФС (ДІ-23) після звичайного термозміцнення складає 4–6 пресовок, то кільця з більш економнолегованої безвольфрамкової сталі 4Х5МФ1С, додатково піддані хіміко-термічній обробці (іонному азотуванню в плазмі ДВДР), показали стійкість 12–13 пресовок завдяки більш високій твердості, теплостійкості, утворенню особливої структури на поверхні.

У роботі побудовано математичні моделі розподілу мікротвердості дифузійної зони в поверхневих шарах зразків після карбонітрації та іонного азотування.

Слід зазначити, що, згідно із сучасною теорією хіміко-термічної обробки сплавів, характер кривих розподілу мікротвердості по глибині дифузійного шару залежить насамперед:

– від закономірностей дифузії за температури насичення (тобто визначається першим законом Фіка в диференціальній формі й залежить від коефіцієнтів дифузії азоту, вуглецю та легуючих елементів);

– від швидкості охолодження після насичення (тобто визначається законом теплопровідності Фур'є в диференціальній формі та залежить від теплофізичних властивостей матеріалу та коефіцієнтів тепловіддачі між поверхнею та середовищем охолодження);

– і від кінетики фазових перетворень у сталях (тобто визначається рівнянням Колмогорова – Джонсона – Мела – Аврамі).

Розподіл мікротвердості дифузійного шару є наслідком адитивного накладання закономірностей кінетики температурних полів, дифузійних потоків та фазових перетворень.

Перший закон Фіка в диференціальній формі для хіміко-термічної обробки записується в такому вигляді з розрахунку на одиницю площі міжфазної межі:

$$dL\Delta C_{\beta/\alpha} = D_{\beta} \left( \frac{\partial C_{\beta}}{\partial x} \right) d\tau - D_{\alpha} \left( \frac{\partial C_{\alpha}}{\partial x} \right) d\tau, \quad (1)$$

де  $\Delta C_{\beta/\alpha}$  – стрибок концентрацій дифузійного елемента на межі двофазної області, що утворилася в результаті граничного насичення матричної фази елементом насичення поверхні;  $dL$  – збільшення товщини шару  $\beta$ -фази в результаті дифузійного насичення дифузійним елементом;  $C_{\beta}$  – концентрація дифузійного елемента в  $\beta$ -фазі (знов утвореній фазі в результаті дифузійного насичення);  $C_{\alpha}$  – концентрація дифузійного елемента в  $\alpha$ -фазі (материнській);  $D_{\beta}$  – коефіцієнт дифузії дифузійного елемента в  $\beta$ -фазі;  $D_{\alpha}$  – коефіцієнт дифузії дифузійного елемента в  $\alpha$ -фазі;

Звідси швидкість просування межі  $\beta$ -шару у бік  $\alpha$ -фази може бути визначена на основі такого виразу:

$$\frac{dL}{d\tau} = \frac{D_{\beta} \left( \frac{\partial C_{\beta}}{\partial x} \right) - D_{\alpha} \left( \frac{\partial C_{\alpha}}{\partial x} \right)}{\Delta C_{\beta/\alpha}}, \quad (2)$$

тобто залежить від коефіцієнтів дифузії азоту, вуглецю та легуючих елементів у залізі, а також від їх градієнтів в околиці міжфазної межі. Слід зауважити, що коефіцієнти дифузії залежать від природи сплаву, типу твердого розчину, розміру зерна і особливо від температури:

$$D = A e^{-Q/RT}, \quad (3)$$

де  $R$  – газова постійна;  $T$  – температура;  $Q$  – енергія активації дифузії;  $A$  – константа, яка практично не залежить від температури.

Розв'язком диференційного рівняння (1) є функція залежності глибини шару насичення дифузним елементом від часу (за умови підтримки постійної концентрації на поверхні елемента, який дифузує):

$$L = K\sqrt{\tau}. \quad (4)$$

Важливим наслідком аналізу рівняння першого закону Фіка стала параболічна залежність товщини дифузійної зони від часу проведення хіміко-термічної обробки,  $K$  – константа, яка залежить від дуже великої кількості чинників.

Зміна температурного поля виробу під час його хіміко-термічної обробки описується диференціальним рівнянням Фур'є, яке для нестационарної теплопровідності може бути наведене у вигляді:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial \tau} = \nabla(k\nabla T) + Q, \quad (5)$$

де  $\rho$  – щільність речовини в поточному стані,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $c$  – питома теплоємність,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;  $T$  – температура по абсолютній шкалі,  $\text{К}$ ;  $\nabla$  – оператор Гамільтона для поточної конфігурації;  $k$  – коефіцієнт теплопровідності,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;  $Q$  – потужність внутрішніх джерел тепловиділення (теплопоглинання),  $\text{Вт}/\text{м}^3$ ;  $t$  – поточний час,  $\text{с}$ .

Процес хіміко-термічної обробки відбувається в ізотермічних умовах і тільки після формування дифузного шару необхідної товщини контрольована зміна

температурного поля дозволяє сформувати необхідний фазовий склад поверхневого шару і, відповідно, його властивості. Фазовий склад поверхневого шару визначається насамперед кінетикою процесу охолодження після дифузійного насичення.

Відповідно до сучасних уявлень теорії термічної обробки кінетика фазових перетворень описується рівнянням Колмогорова – Джонсона – Мела – Аврамі [16–19]:

$$X = 1 - \exp[-\beta\tau^n], \quad (6)$$

де  $X$  – частка перетвореної речовини;  $\tau$  – час,  $\text{с}$ ;  $\beta$  і  $n$  – константи.

Спираючись на установлені загальнотеоретичні уявлення теорії фазових перетворень, у роботі провели розрахунок низки математичних моделей, що описують розподіл мікротвердості по глибині дифузійної зони. Розрахунки поліноміальних моделей розподілу мікротвердості дифузійної зони базувалися на основі стандартних методів кореляційно-регресійного аналізу та були виконані у табличному процесорі Microsoft Office Excel 2016.

Беручи до уваги той факт, що розподіл мікротвердості дифузійної зони залежить насамперед від фазового складу, розраховували модель на основі кінетичного рівняння рівнянням Колмогорова – Джонсона – Мела – Аврамі:

$$X = \exp[-\beta\tau^n]. \quad (7)$$

Зміни у виразі (7) порівняно з виразом (6) викликані тим, що дифузійне насичення йде з поверхні виробу з утворенням на ній фаз із максимальною твердістю. Розрахунок цієї моделі проведено емпірично за допомогою пакета MathCad.

Результати обробки експериментальних даних та побудова регресійних моделей наведені в таблицях 2–5 і на рисунках 9–12.

Таблиця 2

**Результати замірювання мікротвердості залежно від глибини дифузійного шару зразків сталі 4X5MФ1С після іонного азотування**

δ, мкм	10	10	10	20	20	30	30	40	40	50	50	60	70	80	150	150	250	250
Значення мікротвердості, МПа	9800	9900	9800	8400	8300	7800	7850	7300	7400	6800	6700	6500	6100	6000	5600	5700	5400	5400

Таблиця 3

**Результати замірювання мікротвердості залежно від глибини дифузійного шару на приладі ПМТ-3 зразків сталі 4X5MФ1С (карбонітрація)**

δ, мкм	30	30	30	30	50	50	50	50	150	150	150	150	250	250	250	250
Значення мікротвердості, МПа	8700	8600	8534	8345	7650	7600	7789	7650	6400	6327	6320	6150	5040	5000	4960	4970

Таблиця 4

**Результати замірювання мікротвердості залежно від глибини дифузійного шару для сталі 5X3В3МФС (ДІ-23) після іонного азотування**

δ, мкм	10	10	10	20	20	30	30	40	40	50	50	60	70	80	150	150	250	250	350	350
Значення мікротвердості, МПа	10500	10450	10400	10300	10350	10250	10260	8960	8670	7600	7700	7400	6250	6200	5900	5700	5600	5400	5350	5300

Таблиця 5

**Результати замірювання мікротвердості залежно від глибини дифузійного шару на приладі ПМТ-3 зразків сталі 5X3В3МФС (ДІ-23) (карбонітрація)**

δ, мкм	30	30	30	30	50	50	50	50	150	150	150	150	250	250	250
Значення мікротвердості, МПа	9910	10376	9910	11413	8327	9474	8327	9067	6118	5703	5511	5511	3915	4541	4404

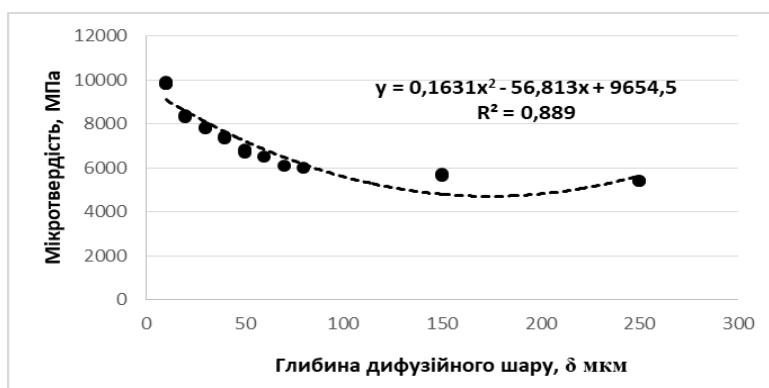


Рис. 9. Регресійна модель розподілу мікротвердості поверхневої дифузійної зони для сталі 4X5MФ1С після іонного азотування

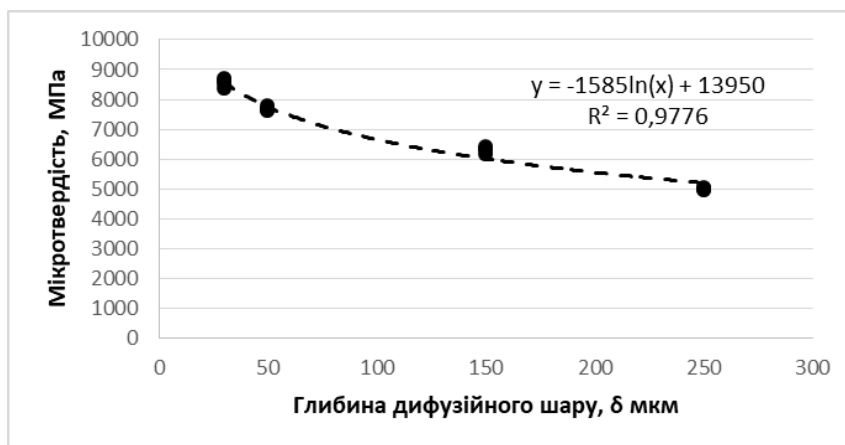


Рис. 10. Регресійна модель розподілу мікротвердості поверхневої дифузійної зони для сталі 4Х5МФ1С після карбонітрації

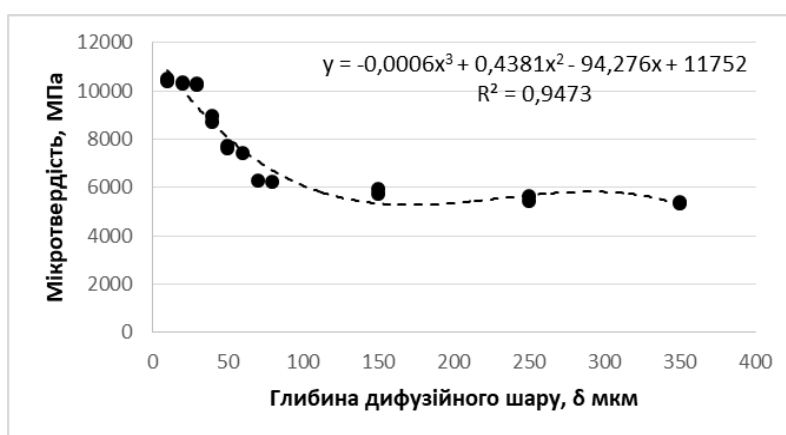


Рис. 11. Регресійна модель розподілу мікротвердості поверхневої дифузійної зони для сталі 5Х3В3МФС (ДІ-23) після іонного азотування

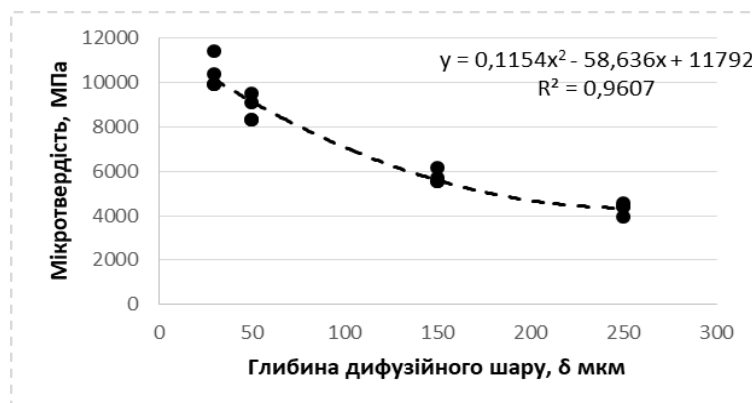


Рис. 12. Регресійна модель розподілу мікротвердості поверхневої дифузійної зони для сталі 5Х3В3МФС (ДІ-23) після карбонітрації

Усі розраховані в Excel залежності перевірені на адекватність за коефіцієнтом детермінації  $R^2$ :

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (\hat{y}_t - \bar{y})^2}{\sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2}, \quad (8)$$

де  $\hat{y}_t$  – значення мікротвердості, одержані на основі побудованої моделі;  $\bar{y}$  – середнє значення, розраховане на основі моделі;  $y_t$  – експериментальні значення мікротвердості;  $\bar{y}$  – середнє по експериментальних значеннях.

Для всіх наведених моделей коефіцієнти детермінації  $R^2$  мають високі значення 0,9448, 0,9607, 0,9776 та 0,9473, що свідчить про їх досить хорошу адекватність. Слід зазначити, що наведені регресійні моделі на основі експериментальних даних є формальними, оскільки у їх розробленні не враховується фізична природа досліджуваних процесів, хоча для розрахунків у межах експериментальних даних ці моделі можуть бути успішно використані.

Для розроблення математичної моделі, яка б урахувала фізичні процеси, виходили з того, що мікротвердість поверхневого шару залежить від кількості твердої фази у вигляді карбідів та/або нітридів легуючих елементів. Тому за основу математичної моделі розподілу мікротвердості у поверхневому шарі було доцільно взяти кінетичне рівняння фазового перетворення Колмогорова – Джонсона – Мела – Аврамі (7). Цілком очевидно, що чим більше у структурі твердої фазової складової, тим вища мікротвердість шару на заданій глибині.

Лістинги побудови моделей у математичному процесорі MathCad наведені на рисунках 13–16.

Усі результати моделювання мікротвердості по глибині дифузійної зони зведені в таблицю 6.

Всі представлені моделі можуть бути використані для розрахункової оцінки мікротвердості на глибині заданого дифузійного шару з певним ступенем похибки. Моделі, побудовані на основі кореляційно-регресійного аналізу, досить формальні та слабо відображають фізико-хімічні процеси, що лежать в основі хіміко-термічної обробки. Моделі ж, побудовані на основі рівняння Колмогорова – Джонсона – Мела – Аврамі, можуть бути корисні для інтерпретації кінетики фазових перетворень у дифузійній зоні поверхні, що насичується.

Зокрема, з рівняння (6) наприклад, видно, що для процесу іонного азотування величина  $19,8 \cdot 10^{-5}$  може бути інтерпретована як оцінка константи швидкості фазового перетворення [20], яка для іонного азотування на 2–3 порядки вища проти аналогічних констант для карбонітрації як сталі 4X5MФ1С, так і сталі 5X3В3МФС (ДІ-23).

Таблиця 6

Результати моделювання розподілу мікротвердості (HV) за глибиною дифузійної зони ( $\delta$ )

Карбонітрація		
4X5MФ1С	$HV(\delta) = -15\,851 \ln(\delta) + 13\,950$	$HV(\delta) = 4000 + 4290 \cdot e^{-9,6 \cdot 10^{-8} \delta^{3,08}}$
5X3В3МФС (ДІ-23)	$HV(\delta) = 0,1154\delta^2 - 58,636\delta + 1\,1792$	$HV(\delta) = 6000 + 5800 \cdot e^{-9,8 \cdot 10^{-7} \delta^{3,4}}$
Іонне азотування		
4X5MФ1С	$HV(\delta) = -1437 \ln(\delta) + 12748$	$HV(\delta) = 5390 + 4770 \cdot e^{-1,98 \cdot 10^{-5} \delta^{2,877}}$
5X3В3МФС (ДІ-23)	$HV(\delta) = -0,0006\delta^3 + 0,4381\delta^2 - 94,276\delta + 11752$	$HV(\delta) = 6000 + 4600 \cdot e^{-8,8 \cdot 10^{-6} \delta^3}$

Результати заміру мікротвердості на приборі ПМТ-3 зразків сталі 4X5MΦ1C після іонного азотування

Матриця вихідних даних по розподілу мікротвердості (Y) по глибині дифузійної зони (d)

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \end{matrix} & \begin{matrix} 10 & 10 & 20 & 20 & 30 & 30 & 40 & 40 & 50 & 50 & 60 & 60 \\ 9.8 \cdot 10^3 & 9.9 \cdot 10^3 & 8.4 \cdot 10^3 & 8.3 \cdot 10^3 & 7.8 \cdot 10^3 & 8.5 \cdot 10^3 & 7.3 \cdot 10^3 & 7.4 \cdot 10^3 & 8.8 \cdot 10^3 & 6.7 \cdot 10^3 & 6.5 \cdot 10^3 \end{matrix} \end{matrix}$$

Вектор значень глибини дифузійної зони іонного азотування, d

$$\delta = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \end{matrix} & \begin{matrix} 10 & 10 & 20 & 20 & 30 & 30 & 40 & 40 & 50 & 50 & 60 & 70 & 80 & 150 & 150 & 250 & 250 \end{matrix} \end{matrix}$$

Вектор значень розподілу мікротвердості по глибині зони іонного азотування, Y

$$Y = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \end{matrix} & \begin{matrix} 9.8 \cdot 10^3 & 9.9 \cdot 10^3 & 8.4 \cdot 10^3 & 8.3 \cdot 10^3 & 7.8 \cdot 10^3 & 7.8 \cdot 10^3 & 7.85 \cdot 10^3 & 7.3 \cdot 10^3 \end{matrix} \end{matrix}$$

Емпірично підібране рівняння розподілу мікротвердості (Y1) по глибині дифузійного шару (d1) на основі рівняння Колмагорова-Джонсона-Мейла-Аврамі

$$Y1(\delta1) := 5390 + 4770 \cdot \exp(-0.0000198 \delta1^{2.8777})$$

Графік з експериментальними точками розподілу мікротвердості по глибині дифузійного шару і з розрахунковими значеннями мікротвердості на основі запропонованої моделі

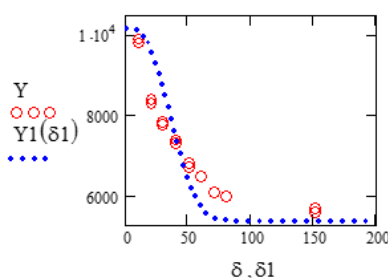


Рис. 13. Лістинг документа MathCad побудови моделі розподілу мікротвердості по глибині дифузійного шару для сталі 4X5MΦ1C після іонного азотування

Результати заміру мікротвердості на приборі ПМТ-3 зразків сталі 4X5MΦ1C після карбонітрації

Матриця вихідних даних по розподілу мікротвердості (Y) по глибині дифузійної зони (d)

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \end{matrix} & \begin{matrix} 30 & 30 & 30 & 30 & 50 & 50 & 50 & 50 & 150 \\ 8.7 \cdot 10^3 & 8.6 \cdot 10^3 & 8.534 \cdot 10^3 & 8.345 \cdot 10^3 & 7.65 \cdot 10^3 & 7.6 \cdot 10^3 & 7.789 \cdot 10^3 & 7.65 \cdot 10^3 & 6.4 \cdot 10^3 \end{matrix} \end{matrix}$$

Вектор значень глибини дифузійної зони карбонітрації, d

Вектор значень розподілу мікротвердості по глибині зони карбонітрації, Y

$$\delta^T = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \end{matrix} & \begin{matrix} 30 & 30 & 30 & 30 & 50 & 50 & 50 & 50 & 150 & 150 & 150 & 150 & 250 & 250 & 250 & 250 \end{matrix} \end{matrix}$$

$$Y^T = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \end{matrix} & \begin{matrix} 8.7 \cdot 10^3 & 8.6 \cdot 10^3 & 8.534 \cdot 10^3 & 8.345 \cdot 10^3 & 7.65 \cdot 10^3 & 7.6 \cdot 10^3 & 7.789 \cdot 10^3 & 7.65 \cdot 10^3 & 6.4 \cdot 10^3 \end{matrix} \end{matrix}$$

Емпірично підібране рівняння розподілу мікротвердості (Y1) по глибині дифузійного шару (d1) на основі рівняння Колмагорова-Джонсона-Мейла-Аврамі

$$Y1(\delta1) := 4000 + 4290 \cdot \exp(-0.000000096 \delta1^{3.088})$$

Графік з експериментальними точками розподілу мікротвердості по глибині дифузійного шару і з розрахунковими значеннями мікротвердості на основі запропонованої моделі

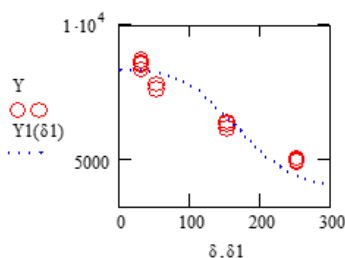


Рис. 14. Лістинг документа MathCad побудови моделі розподілу мікротвердості по глибині дифузійного шару для сталі 4X5MΦ1C після карбонітрації

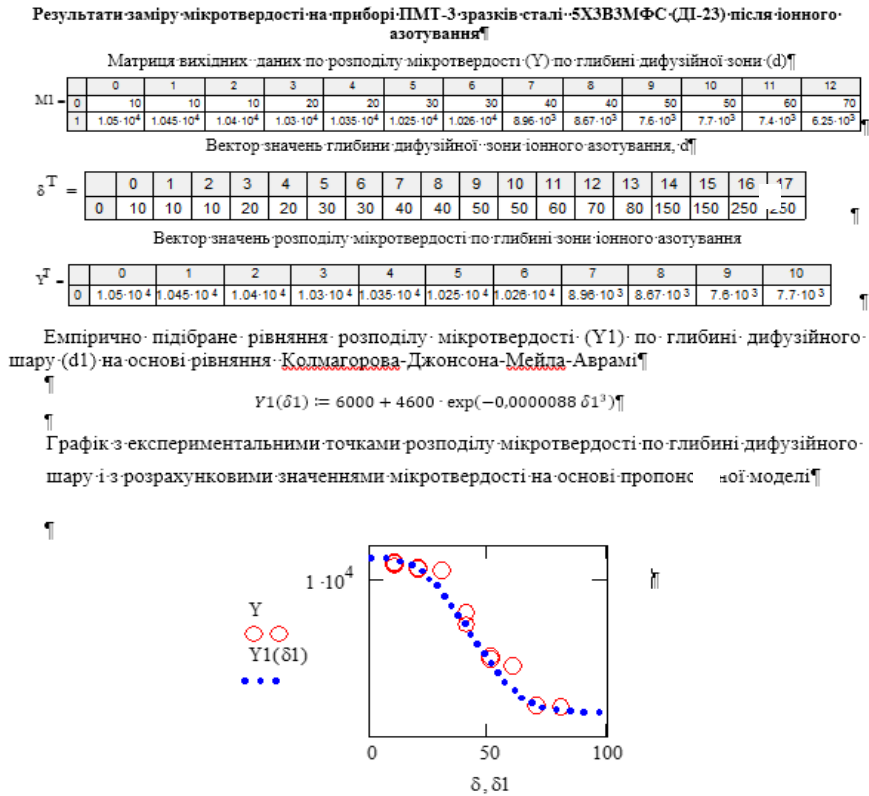


Рис. 15. Лістинг документа MathCad побудови моделі розподілу мікротвердості по глибині дифузійного шару для сталі 5ХЗВЗМФС після іонного азотування

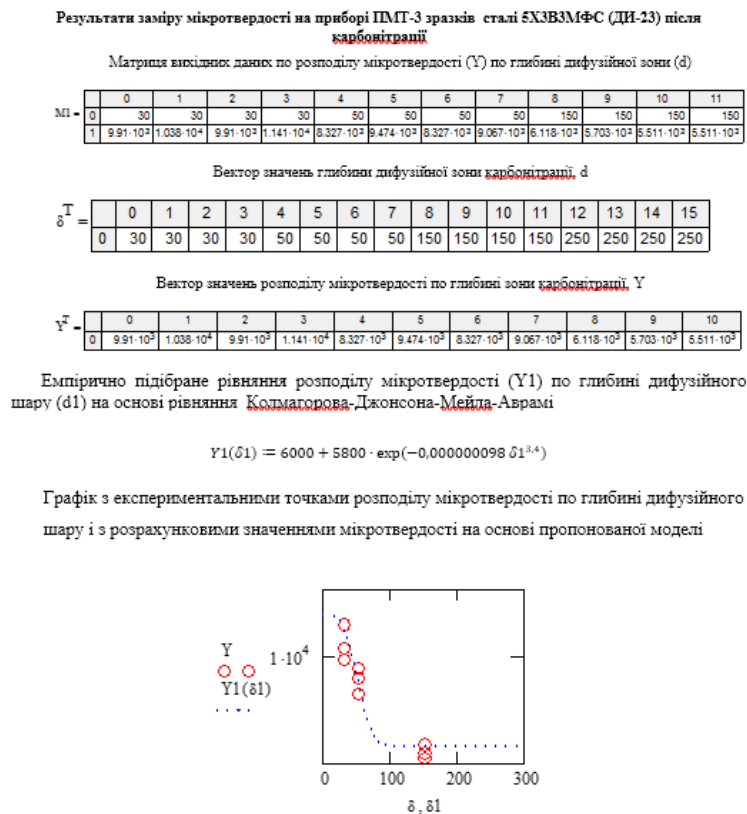


Рис. 16. Лістинг документа MathCad побудови моделі розподілу мікротвердості по глибині дифузійного шару для сталі 5ХЗВЗМФС після карбонітрації

## Висновки

Удосконалення технології термічної обробки пресового інструменту (загартування з відпуском і наступною хіміко-термічною обробкою замість звичайної технології – загартування з відпуском) дозволить збільшити стійкість пресового інструменту на 30 % та знизити витрати на переробку виготовлення труб, а також поліпшити якість внутрішньої поверхні труб (відсутність плівок, порізів та інших дефектів неіржавіючих труб).

У результаті проведених досліджень, експериментів і промислових випробувань виявлено таке:

1. У зв'язку з низькою стійкістю трубного інструменту (інструменту для гарячого пресування корозійностійких труб) виникла необхідність в удосконаленні зміцнювальних технологій трубного інструменту, оптимізації режимів таких технологій, розробленні нових методів зміцнення з використанням нових матеріалів і нанотехнологій.

2. Проведення іонного азотування в плазмі ДВДР трубопресового інструменту (матричних кілець і голок-оправок) в 1,5–2 рази збільшує твердість поверхневого шару, що підтвердили результати металографічних, електронних досліджень. Причиною цього стало утворення на поверхні азотованого шару, який

складається з нітридної зони  $\text{Fe}_2\text{-3N}$  ( $\epsilon$ -фаза) і  $\text{Fe}_4\text{N}$  ( $\gamma$ '-фаза) і підшару азотистого фериту ( $\alpha$ -фаза), в якому під час охолодження виділяються нітриди хрому, молібдену, алюмінію.

3. Проведення карбонітрації трубопресового інструменту (матричних кілець і голок-оправок) у розплавах солей ціанатів і карбонатів збільшує зносостійкість, поверхневу твердість і корозійну стійкість поверхні, знижує коефіцієнт тертя в 1,5–5 раз.

4. Побудовано і досліджено графіки зміни мікротвердості від поверхні до центру зразків після хіміко-термічної обробки, запропоновано оптимальний режим іонного азотування, карбонітрації (що підтверджено результатами замірів мікротвердості) для отримання високих експлуатаційних властивостей трубопресового інструменту, проведено дослідження структури азотованого, карбонітрованого шару (мікроструктурне і електронне).

Результатом роботи стала розробка оптимальних режимів термозміцнення трубного інструменту, які забезпечують його високі експлуатаційні характеристики. В результаті сталь набуває високу твердість на поверхні  $\text{HV}_{0,1}$  860–1150, що не змінюється при нагріванні до 600–650 °С, високу опірність зношуванню, високі межі витривалості, корозійну стійкість.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Логинов Ю. Н., Игнатович Ю. В. Инструмент для прессования металлов : учеб. пос. Екатеринбург : Уральский университет, 2014. 224 с.
2. Беляев С. В., Довженко И. Н., Соколов Р. Е., Рудницкий Э. А., Пещанский А. С. Конспект лекций по технологии прессования. Красноярск, 2007.
3. Технологии производства нержавеющей труб: сборник лекций. Под общ. ред. Е. Я. Лезинской, К. М. Бильдин. Никополь : Сентравис, 2019. 89 с.
4. Лахтин Ю. М., Леонтьева В. П. Материаловедение : учеб. для вузов. Москва : Машиностроение, 2010. 528 с.
5. Фетисова Г. П. Металловедение и технология металлов. Москва : Высшая школа, 2008. 640 с.
6. Арзамасов Б. Н., Братухин А. Г., Елисеев Ю. С., Панайоти Т. А. Ионная химико-термическая обработка сплавов в газовых средах : учеб. пос. Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1999. 400 с.
7. Chatterjee–Fisher R. Nitriding and carbonitriding: textbook edited by A.V.Supova. Moscow : Metallurgy, 1990.
8. Mogilenets M. V. Karnonitratsiya v rasplavesoley (Carbonitration in salt melt). *Equipment and tools for professionals : International information and technical journal*. 2018.
9. Могиленець М. В., Кривчик Л. С., Думенко К. О., Пінчук В. Л., Хохлова Т. С. Спосіб хіміко-термічної обробки трубопресового інструменту з інструментальної сталі: пат. на корисну модель № 146692. 10.03.2021.
10. Андреев А. А., Саблев Л. П., Шулаев В. М., Григорьев С. Н. Вакуумно-дуговые устройства и покрытия : учеб. пособ. Харьков : ННЦ ХФТИ, 2005. 236 с.



11. Лахтин Ю. М. Современное состояние процесса азотирования : учеб. пособ. Москва : Metallurgiya, 1993. 172 с.
12. Андреев А. А., Саблев Л. П., Шулаев В. М. О роли атомарного азота при химико-термической обработке сталей в газовом вакуумнодуговом разряде. Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов : сб. докл. 5-й межд. конф. Ч. 1. Харьков : ННЦ ХФТИ, 2005. С. 246–250.
13. Большаков В. И. Оборудование термических цехов, технологии термической обработки металлопродукции : учеб. Днепропетровск : Днепр-VAL, 2010. 378 с.
14. Александров В. А., Богданов К. В. Азотирование инструмента из высокохромистых и быстрорежущих сталей. *Техносфера*. 2005. № 5. С. 14–20.
15. Думенко К. О., Пінчук В. Л., Кривчик Л. С., Столбовий В. О., Дейнеко Л. М., Перчун Г. І. Спосіб термічної обробки виробів з легованих інструментальних сталей : пат. на корисну модель № 151611. 17.08.2022.
16. Johnson W. A., Mehl R. T. Reaction kinetics in processes of nucleation and growth. *Trans AIME*. 1939. Vol. 185. Pp. 416–442.
17. Avrami M. Kinetics of phase change. II Transformation-time relations for random distribution of nuclei. *J. Chem. Phys.* 1940. Vol. 8. Pp. 212–224.
18. Kolmogorov A. N. On the Statistical Theory of Crystallization of Metals. *Izv. Akad. Nauk SSSR. Ser. Mat.* 1937. Vol. 3. Pp. 355–359.
19. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов : учеб. Москва : Metallurgiya, 1974. 175 с.
20. Кристиан Дж. Теория превращений в металлах и сплавах : учеб. пособ. Ч. 1. Москва : Мир, 1978. 96 с.

## REFERENCES

1. Loginov Yu.N. and Ignatovich Yu.V. *Instrument dlya pressovaniya metallov : ucheb. pos.* [Tool for pressing metals : textbook]. Yekaterinburh : Ural University, 2014, 224 p. (in Russian).
2. Belyaev S.V., Dovzhenko I.N., Sokolov R.E., Rudnitsky E.A. and Peshchansky A.S. *Konspekt lektsiy po tekhnologii pressovaniya* [Abstract of lectures on pressing technology]. Krasnoyarsk, 2007.
3. *Tekhnologii proizvodstva nerzhavayushchikh trub : sbornik lektsiy* [Technologies for the production of stainless pipes : a collection of lectures]. Edited by Lezinskaya Ye.Ya. and Bildin K.M. Nikol' : CentraVis, 2019, 89 p. (in Russian).
4. Lakhtin Yu.M. and Leontieva V.P. *Materialovedeniye : uchebnik dlya vuzov* [Materials Science : a textbook for universities]. Moscow : Mashinostroyeniye Publ., 2010, 528 p. (in Russian).
5. Fetisova G.P. *Metallovedeniye i tekhnologiya metallov* [Metallurgy and technology of metals]. Moscow : Vysshaya Shkola Publ., 2008, 640 p. (in Russian).
6. Arzamasov B.N., Bratukhin A.G., Eliseev Y.S. and Panayoti T.A. *Ionnaya khimiko-termicheskaya obrabotka splavov v gazovykh sredakh : ucheb. pos.* [Ionic chemical-thermal treatment of alloys in gaseous media : textbook allowance]. Moscow : Izd. MGТУ im. N.E. Bauman, 1999, 400 p. (in Russian).
7. Chatterjee–Fisher R. Nitriding and carbonitriding : textbook edited by A.V. Supova. Moscow : Metallurgy, 1990.
8. Mogilenets M.V. Karnonitratsiya v rasplavesoley (Carbonitration in salt melt). *Equipment and Tools for Professionals : International information and technical Journal*. 2018.
9. Mogilenets M.V., Kryvchik L.S., Dumenko K.O., Pinchuk V.L. and Khokhlova T.S. *Sposib khimiko-termichnoyi obrobky trubopresovoho instrumentu z instrumental'noyi stali : pat. na korysnu model' № 146692, 10.03.2021 r.* [Method of chemical and thermal treatment of a pipe press tool made of tool steel : pat. for utility model no. 146692, 10.03.2021]. (in Ukrainian).
10. Andreev A.A., Sablev L.P., Shulaev V.M. and Grigoriev S.N. *Vakuumno-dugovyie ustroystva i pokrytiya : uchebnoye posobiye* [Vacuum-arc devices and coatings : textbook allowance]. Kharkov : NNTs KIPT, 2005, 236 p. (in Russian).
11. Lakhtin Yu.M. *Sovremennoye sostoyaniye protsessy azotirovaniya : uchebnoye posobiye* [The current state of the nitriding process : textbook allowance]. Moscow : Metallurgy, 1993, 172 p. (in Russian).
12. Andreev A.A., Sablev L.P. and Shulaev V.M. *O roli atomarnogo azota pri khimiko-termicheskoy obrabotke staley v gazovom vakuumnodugovom razryade* [On the role of atomic nitrogen in the chemical-thermal treatment of steels in a gas vacuum-arc discharge]. *Oborudovaniye i tekhnologii termicheskoy obrabotki metallov i splavov : sb. dokl. 5-y Mezhd. konf.* [Equipment and technologies for heat treatment of metals and alloys : Sat. report 5th Int. conf.]. Part 1, Kharkov : NSC KIPT, 2005, pp. 246–250. (in Russian).
13. Bolshakov V.I. *Oborudovaniye termicheskikh tsekhov, tekhnologii termicheskoy obrabotki metalloproduksii : uchebnik* [Equipment for thermal shops, technologies for heat treatment of metal products : textbook]. Dnepropetrovsk : Dnepr-VAL, 2010, 378 p. (in Russian).
14. Aleksandrov V.A. and Bogdanov K.V. *Azotirovaniye instrumenta iz vysokokhromistykh i bystrorazhushchikh staley* [Nitriding of tools from high-chromium and high-speed steels]. *Tekhnosfera* [Technosphere]. 2005, no. 5, pp. 14–20. (in Russian).
15. Dumenko K.O., Pinchuk V.L., Kryvchik L.S., Stolbovyi V.O., Deineko L.M. and Perchun G.I. *Sposib termichnoyi obrobky vyrobiv z lehovanykh instrumental'nykh staley : pat. na korysnu model' № 151611, 17.08.2022 r.*

[Method of heat treatment of products from alloyed tool steels : pat. for utility model no. 151611, 08/17/2022]. (in Ukrainian).

16. Johnson W.A. and Mehl R.T. Reaction kinetics in processes of nucleation and growth. Trans AIME, 1939, vol. 185, pp. 416–442.

17. Avrami M. Kinetics of phase change. II Transformation-time relations for random distribution of nuclei. J. Chem. Phys., 1940, vol. 8, pp. 212–224.

18. Kolmogorov A.N. On the Statistical Theory of Crystallization of Metals. Izv. Akad. Nauk SSSR, Ser. Mat., 1937, vol. 3, pp. 355–359.

19. Novikov I.I. *Teoriya termicheskoy obrabotki metallov : uchebnyk* [Theory of thermal processing of metals : textbook]. Moscow : Metallurgy, 1974, 175 p. (in Russian).

20. Christian J. *Teoriya prevrashcheniy v metallakh i splavakh : uchebnoye posobiye* [Theory transformed in metals and alloys : textbook]. Part 1, Moscow : Mir Publ., 1978, 96 p. (in Russian).

Надійшла до редакції: 15.07.2022.