

УДК 621.78.084:66.096.5

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.300824.33.1072

РОЗРОБКА ІННОВАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ГАРТІВНОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ЗМІЦНЮВАЛЬНОЇ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ МЕТАЛОВИРОБІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПСЕВДОЗРІДЖЕНИХ СИПУЧИХ МАТЕРІАЛІВ (частина 1)

ДЕЙНЕКО Л. М.¹, докт. техн. наук, проф.,

БУТЕНКО А. О.²,

КАБАК А. І.³,

ШПОРТЬКО Ю. В.^{4*}, асп.,

ПІНЧУК В. Л.⁵, асп.,

ГРЕБЬОНКІНА Л. Г.⁶

¹ Кафедра матеріалознавства і термічної обробки металів, ННІ «Інститут промислових та бізнес-технологій» Українського державного університету науки і технологій, пр. Гагаріна, 4, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 333-13-25, e-mail: leonid.deyneko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-1177-3055

² Товариство з обмеженою відповідальністю «ТЕРМАШ», пр. Богдана Хмельницького, 147, 49033, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 785-99-02, e-mail: 7859907@gmail.com

³ Товариство з обмеженою відповідальністю «ТЕРМАШ», пр. Богдана Хмельницького, 147, 49033, Дніпро, Україна, тел. +38 (056) 785-99-02, e-mail: 7859907@gmail.com

^{4*} Кафедра матеріалознавства і термічної обробки металів, ННІ «Інститут промислових та бізнес-технологій» Українського державного університету науки і технологій, пр. Гагаріна, 4, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (050) 448-14-65, e-mail: yurijshportko86@gmail.com, ORCID ID: 0009-0009-8644-9733

⁵ Кафедра матеріалознавства і термічної обробки металів, ННІ «Інститут промислових та бізнес-технологій» Українського державного університету науки і технологій, пр. Гагаріна, 4, 49005, Дніпро, Україна, тел. +38 (066) 044-17-39, e-mail: v.l.pinchuk9@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-8257-9252

⁶ Державне підприємство «Дніпропетровський регіональний науково-технічний центр стандартизації, метрології та сертифікації», вул. Барикадна, 23, 49044, Дніпро, Україна, тел. +38 (098) 419-42-34, e-mail: ligr@i.ua, ORCID ID: 0009-0002-9712-5557

Анотація. *Постановка проблеми.* Одна з основних проблем, з якими стикається сучасне підприємство – це пошук шляхів підвищення ефективності його діяльності. Для ефективного функціонування термічних підрозділів інструментальних виробництв потрібна одночасна наявність нагрівальних та гартувальних пристроїв із різними середовищами для нагрівання та охолодження. Цим пояснюється прагнення виробників і вчених до пошуку технологічних, дешевих, екологічно чистих середовищ для нагрівання та охолодження, які здатні забезпечити необхідні параметри термічної обробки і високу якість оброблюваних деталей. *Мета статті* – аналіз стану методів зміцнювальної термічної (комбінованої) обробки з використанням сипучих матеріалів як середовищ для об'ємного нагрівання і примусового охолодження металовиробів та конструктивно-технологічних особливостей гартівних пристроїв, які в змозі забезпечити раціональний структурний стан металу деталей складної геометричної форми за мінімального рівня їх жолоблення та деформації на прикладі використання віброзріджених сипучих матеріалів (в технічній літературі використовується термін «віброгравітаційні частки теплоносія»). **Висновок.** Досліджено використання у промисловості псевдозріджених сипучих матеріалів як середовищ для об'ємного нагрівання та гартування металовиробів і конструкцій пристроїв для їх використання. Визначено переваги способу охолодження в киплячому шарі для ефективного реалізації режимів зміцнювальної термічної обробки. Показано, що такий спосіб примусового об'ємного охолодження виробів інструментальних виробництв раціональний за різними показниками. Проаналізовано конструктивно-технологічні параметри пристроїв для його реалізації, які можуть стабільно забезпечити необхідний рівень властивостей легованих та високолегованих інструментальних сталей за мінімального рівня їх жолоблення і деформації.

Ключові слова: киплячий шар; псевдозрідження; псевдозріджені сипучі матеріали; інструментальні сталі; зміцнювальна термічна обробка; гартівний пристрій; охолоджувальне середовище

DEVELOPMENT OF INNOVATIVE TECHNOLOGY AND HARDENING EQUIPMENT FOR THE IMPLEMENTATION OF HARDENING HEAT TREATMENT OF METAL PRODUCTS USING FLUIDIZED BULK MATERIALS (part 1)

DEINEKO L.M.¹, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,
BUTENKO A.O.²,
KABAK A.I.³,
SHPORTKO Yu.V.^{4*}, *Postgrad. Stud.*,
PINCHUK V.L.⁵, *Postgrad. Stud.*,
HREBONKINA L.G.⁶

¹ Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, ESI “Institute of Industrial and Business Technologies” of the Ukrainian State University of Science and Technologies, 4, Haharin Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (095) 333-13-25, e-mail: leonid_deyneko@i.ua, ORCID ID: 0000-0002-1177-3055

² Termash Limited Liability Company, 147, Bohdan Khmelnytskyi Ave., Dnipro, 49033, Ukraine, tel. +38 (056) 785-99-02, e-mail: 7859907@gmail.com

³ Termash Limited Liability Company, 147, Bohdan Khmelnytskyi Ave., Dnipro, 49033, Ukraine, tel. +38 (056) 785-99-02, e-mail: 7859907@gmail.com

⁴ Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, ESI “Institute of Industrial and Business Technologies” of the Ukrainian State University of Science and Technologies, 4, Haharin Ave., 4, Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (050) 448-14-65, e-mail: yurijshportko86@gmail.com, ORCID ID: 0009-0009-8644-9733

⁵ Department of Materials Science and Heat Treatment of Metals, ESI “Institute of Industrial and Business Technologies” of the Ukrainian State University of Science and Technologies, 4, Haharin Ave., Dnipro, 49005, Ukraine, tel. +38 (066) 044-17-39, e-mail: v.l.pinchuk9@gmail.com, ORCID ID: 0000-0001-8257-9252

⁶ State Enterprise “Dnipro Regional Scientific and Technical Center for Standardization, Metrology and Certification”, 23, Barikadna St., Dnipro, 49044, Ukraine, tel. +38 (098) 419-42-34, e-mail: ligr@i.ua, ORCID ID: 0009-0002-9712-5557

Abstract. Statement of the problem. One of the main problems faced by a modern enterprise is the search for ways to improve the efficiency of its activities. For the effective functioning of the thermal units of toolmaking industries, the simultaneous availability of heating and quenching devices with different heating and cooling media is required. This explains the desire of manufacturers and scientists to find technological, cheap, environmentally friendly heating and cooling media that can provide the required heat treatment parameters and high quality of the processed parts. **The purpose of the article** is to analyze the state-of-the-art of hardening thermal (combined) treatment methods using bulk materials as media for volumetric heating and forced cooling of metal products and the design and technological features of hardening devices that can ensure a rational structural state of metal parts of complex geometric shapes with a minimum level of their warping and deformation on the example of using vibro-fluidized bulk materials (in the technical literature, the term vibro-gravity particles of heat is used). **Research results.** To analyze the results of tests of bulk materials as quenching media for high-alloy steel grades and their effect on the structure and properties of the metal in comparison with the traditional oil quenching regime. To consider the features of quenching devices that use mechanical vibration to produce vibro-s bulk material and the possibility of their use in the implementation of quenching modes (including isothermal) of steel products of complex geometric shapes. **Conclusion.** The use of fluidized bulk materials in industry as media for volumetric heating and hardening of metal products and the design of devices for their use has been investigated. The advantages of the fluidized bed cooling method for the effective implementation of hardening heat treatment regimes are determined. It is shown that this method of forced volumetric cooling of toolmaking products is rational in terms of various indicators. The structural and technological parameters of devices for its implementation are analyzed, which can consistently provide the required level of properties of alloyed and high-alloy tool steels with a minimum level of warping and deformation.

Keywords: *fluidized bed; fluidization; fluidized bulk materials; tool steels; hardening heat treatment; heating furnace for hardening; cooling environment*

Постановка проблеми. Відомо, що інструментальні виробництва піддають різним режимам термічної та хіміко-термічної обробки велику кількість деталей складної форми, різної товщини та з різних марок сталей, що потребує індивідуального

підходу до вибору параметрів обробки та виду середовища для гартування. Тому для ефективного функціонування термічних підрозділів інструментальних виробництв потрібна одночасна наявність гартувальних пристроїв із різними охолоджувальними

середовищами. Цим пояснюється прагнення виробників і вчених до пошуку технологічних, дешевих, екологічно чистих середовищ для нагрівання та охолодження, здатних забезпечити необхідні параметри гартувального охолодження і високу якість оброблених деталей.

Аналіз публікацій. Проведено аналіз технічної та патентної літератури [1–12] з метою ознайомлення зі станом питання – використання у промисловості псевдозріджених сипучих матеріалів як середовищ для нагрівання та гартування металовиробів і конструкцій пристроїв для їх використання. Установлено, що в різних галузях промисловості за останні роки досить широко використовують зріджені різними методами сипучі матеріали. Також визначено основні конструктивно-технологічні параметри пристроїв для нагрівання та гартування різноманітних металовиробів і види сипучих матеріалів, які використовуються як середовища для нагрівання та охолодження, і основні переваги й недоліки вказаних середовищ та методів реалізації процесу гартування металовиробів у псевдозріджених сипучих матеріалах.

Мета статті – аналіз методів зміцнювальної термічної (комбінованої) обробки з використанням сипучих матеріалів як середовищ для об'ємного нагрівання і примусового охолодження металовиробів та конструктивно-технологічних особливостей гартівних пристроїв, які в змозі забезпечити раціональний структурний стан металу деталей складної геометричної форми за мінімального рівня їх жолоблення та деформації на прикладі використання віброзріджених сипучих матеріалів (у технічній літературі використовується термін «віброгравітаційні частки теплоносія»).

Результати досліджень. Киплячий шар (використовують також термін «псевдокиплячий шар») являє собою гетерогенну систему, яка складається із шару дрібних частинок (0,6–1,5 мм) вогнетривкого сипучого матеріалу і потоку

газоповітряної суміші, що проходить крізь шар частинок і створює інтенсивне їх перемішування та нагадує в'язку киплячу рідину.

У промисловості киплячий шар використовується також як однорідне щільне середовище для поділу (збагачення, класифікації) мінеральної сировини, в печах із киплячим шаром проводять окисний випал сульфідних руд, відновлювальний випал концентратів і тощо. Є широкі перспективи та діючі пристрої, де киплячий шар застосовується як середовище для спалювання твердих палив, зокрема, низькосортних, у топках енергетичних котлів.

Такі середовища використовуються в різних галузях промисловості також для забезпечення інтенсивного тепло-масообміну під час термічної обробки металовиробів (як нагрівальні середовища у спеціальних конструкціях нагрівальних пристроїв (печей) або як охолоджувальні середовища в гартувальних пристроях). Пристрої з киплячим шаром використовуються, наприклад, для проведення цементації, нітроцементації сталевих заготовок.

У процесі використання таких середовищ для нагрівання деталі занурюють у псевдозріджений шар, який працює в інтервалі від 150 °С до 1 200 °С. За відповідних температур і газових складових киплячий або псевдозріджений шар імітує теплопровідні, ізотермічні та дифузійні властивості рідких середовищ, створюючи в пристроях шахтного типу умови для отримання рівномірного прогріву і, наприклад, насичення оброблених виробів вуглецем та/або азотом (для цементації та нітроцементації).

Основна особливість киплячого шару – це його велика теплоємність та теплопровідність. Інтенсивна циркуляція частинок, об'ємна теплоємність яких приблизно на три порядки перевищує об'ємну теплоємність газів, дозволяє отримати в печах однакову у всіх точках шару температуру з точністю до декількох градусів (від ± 2 до ± 5 °С) від номіналу. За

інтенсивністю теплообміну та умовами роботи піч із киплячим шаром аналогічна ваннам із розплавами солей.

В умовах дрібносерійного виробництва добре зарекомендували себе пристрої з киплячим шаром, які можна використовувати для нагрівання (до 1 200 °С) та охолодження різних деталей. У літературі описані конструкції подібних нагрівальних та охолоджувальних пристроїв дрібногабаритних деталей, інструменту, але вони можуть використовуватися і для гартування довговимірних виробів, наприклад, труб нафтового сортаменту, рейок тощо.

Спосіб обігрівання шару визначається, перш за все, його температурою і вимогами, що пред'являються до стану поверхні металу, який нагрівається. Печі та ванни з температурою менше 800–750 °С можна обігрівати або електричними нагрівачами через стінки, або за допомогою занурювальних пальників, або спалюючи газ у затопленій киплячим шаром насадці, або, нарешті, подаючи під решітку розведені продукти згоряння або нагріте повітря.

У всіх випадках гріюче середовище є окисним для сплавів заліза. В електротермічному шарі, який продувається повітрям, середовище за цих температур також виходить окиснювальним. Безокиснювальне середовище можна отримати лише використовуючи захисний газ як псевдозріджувальне середовище, що найчастіше є неекономічним через велику його витрату.

Практика показує, що нагрівання сталевих деталей до температур (≤ 750 °С) не потребує захисних атмосфер. Інтенсивне утворення оксидного шару на поверхні деталей з вуглецевих сталей починається з ~650–700 °С, швидкорізальних – з 850 °С, а високохромистих навіть з 950 °С. У цих умовах швидко нагрівання будь-яких сталей і кольорових металів (наприклад, на основі міді) до ~600–700 °С в окисному середовищі цілком допустиме, якщо не потрібна світла поверхня. Для отримання світлої поверхні слід застосовувати муфелі, що обігриваються киплячим шаром, з подачею в них захисного

газу. У літературі зазначається, що слід віддавати перевагу електричному обігріву перед газовим.

Установлено, що в разі нагрівання металу в киплячому шарі за нагрівальною здатністю він близький до соляних розплавів. При цьому в киплячому шарі можна створювати різні контрольовані атмосфери, в т. ч. для хіміко-термічної обробки деталей.

Матеріал псевдозріджуваних частинок вибирають виходячи з його доступності, міцності на стирання, вогнетривкості, здатності взаємодіяти з поверхнею металу, що нагрівається, вартості тощо. Перелік матеріалів для низькотемпературних печей і ванн досить широкий (корунд, пісок, шамот, окис магнію і т. п.). Матеріалом киплячого шару є частинки електрокорунду діаметром 0,12 мм (ДСТУ 3647-71). Зазвичай прагнуть вибирати більш важкі частинки, оскільки їх застосування гарантує отримання більш високих коефіцієнтів тепловіддачі, вимагаючи, щоправда, великих швидкостей псевдозрідження.

Для експлуатації у високотемпературних (> 1 100 °С) пристроях, коли суттєвими стають ефекти спікання частинок одна з одною і налипання їх на метал, частіше використовують два матеріали: чистий Al_2O_3 (електрокорунд білий або чорний) та кесонна маса (досить чистий MgO). Перший промисловість випускає у вигляді фракцій (від 0,04 до 1,6 мм), але його вартість досить висока (залежно від фракції). Другий матеріал приблизно в 10 разів дешевший, але випускається у нефракціонованому вигляді. Фракціонований окис магнію, що випускається промисловістю, дорожчий за корунд. Можливе застосування інших оксидів, проте вони не повинні містити помітної кількості домішок.

Розмір псевдозріджуваних частинок визначається необхідністю зв'язати швидкість нагрівання виробів та час витримки з питомою продуктивністю печі. Чим дрібніші частинки, тим більший коефіцієнт тепловіддачі, а значить, і швидкість нагрівання, але тим менша і швидкість псевдозріджувальної газо-

повітряної суміші (a_v), тобто менша кількість тепла, що виділяється під час її спалюванні.

З літературних даних випливає, якщо обраний розмір частинок виявиться меншим за оптимальний для даних умов, габарити печі будуть визначатися необхідністю введення в її простір потрібної кількості тепла з газоповітряною сумішшю: за умовами теплообміну між деталлю і киплячим шаром можна було б забезпечити прогрів деталі в печі із значно меншою площею поду. Навпаки, якщо розмір частинок занадто великий, то площа поду печі визначатиметься інтенсивністю прогріву деталей у шарі (тобто часом, необхідним для нагрівання, витримки деталей) та швидкістю їх руху.

У цьому випадку кількість тепла, що вводиться з газоповітряною сумішшю за оптимального її складу (тобто за сумарного $a_v = 1,05-1,2$) буде занадто великою для підтримки заданої температури в печі. При подачі під решітку всього необхідного для горіння повітря для зменшення кількості тепла, що виділяється, доводиться в таких випадках збільшувати a_v . Аналогічний прийом використовують і у двозонних печах. Зрозуміло, що при цьому відповідно зменшується ККД печі.

Слід зауважити, що в разі вибору занадто великих частинок збільшення ефективності роботи печі (наприклад, рекуперацією тепла газів, які йдуть) утруднене, тому що всяке зменшення витрати палива викликає необхідність підвищення a_v (для підтримання в шарі потрібної швидкості), тобто відносних втрат із газами, що йдуть. Тому прагнення створити високоефективну піч завжди зумовлює вибір дрібніших частинок.

Велика кількість розрахунків, виконаних у різних експериментальних роботах для печей різного призначення, показує, що в промислових с найбільше економічне застосування частинок діаметром не більше 0,32–0,4 (рідко 0,5) мм. Використовуючи такі частинки, легко отримати питому продуктивність 1–1,5 т/год. і більше з 1 м² поду печі. Чим дрібніші псевдозріджувані

частинки, тим коротша і ширша виходить піч за тієї ж швидкості руху деталей. Найчастіше оптимальними виявляються частинки діаметром 0,1–0,16 мм і навіть менші.

У ваннах з електричним обігрівом, де підведення тепла не пов'язане зі швидкістю псевдозріджувального агенту, вибір дрібніших частинок гарантує відповідне зменшення втрат тепла на нагрівання псевдозріджувального агенту з одночасним збільшенням інтенсивності теплообміну. На жаль, застосування частинок діаметром менше 0,1–0,16 мм, особливо в печах із високим шаром, пов'язане з необхідністю збільшувати висоту відстійної зони та з небезпекою віднесення частинок. З огляду на це слід рекомендувати частинки діаметром не менше 0,2 мм.

Якщо за розрахунком оптимальними є дрібніші частинки, бажано за допомогою конструктивних і технологічних прийомів або за рахунок зниження економічності процесу знайти шлях застосування частинок діаметром $\sim 0,2$ мм. В охолодних ваннах застосування дрібніших частинок гарантує збільшення швидкості охолодження. Іноді цей фактор стає вирішальним, якщо, наприклад, потрібні властивості можна отримати у киплячому шарі корунду з діаметром частинок 0,1 мм і не отримати за діаметра частинок 0,2 мм. Висоту відстійної зони можна в цьому випадку дещо зменшити упорскуванням води та встановленням відбійних сепараторів.

Швидкість руху псевдозріджувального середовища визначається, перш за все, розміром та матеріалом частинок. Насправді зазвичай вибирається швидкість у 2–5 разів більша критичної, причому менші цифри відносять до шару великих частинок, а великі – до дрібних. Зі збільшенням швидкості псевдозріджувального середовища понад вказані значення підвищується інтенсивність руху частинок, дещо зростає (наближаючись до оптимальної швидкості) коефіцієнт тепловіддачі, але збільшується й інтенсивність викиду частинок.

Це викликає необхідність збільшення

висоти відстійної зони. За дуже малих швидкостей руху частинок псевдозрідження стає нерівномірним (особливо в апаратах із великою площею решітки), коефіцієнт тепловіддачі знижується і може відрізнятись для різних ділянок печі. За малих швидкостей прийнятне псевдозрідження матеріалу можна отримати лише в разі великого відносного опору газорозподільної решітки.

Так, наприклад, у працях проф. Г. А. Околовича зазначаються головні переваги печей з киплячим шаром – висока швидкість і рівномірність нагріву, така ж, як у солоних та селітрових ваннах. Деталі, що пройшли термічну обробку в печах із киплячим шаром, мають незначне викривлення, чисту поверхню, а отвори в оброблюваних деталях не закупорюються.

Печам із киплячим шаром властива і технологічна гнучкість, оскільки одна й та сама піч може бути використана для роботи як зі звичайною, так і з будь-якою контрольованою атмосферою (тобто для ХТО – цементації, азотування, карбонітрації), а також для охолодження при гартуванні. Замість елементів опору за зовнішнього підведення тепла в киплячий шар може бути використане безпосереднє нагрівання стін реторти. Для створення псевдозрідженого шару використовуються частинки електрокорунду розміром 120–300 мкм. Висота шару ~ 600 мм, що забезпечує нагрівання деталей завдовжки ~ 400–500 мм. За робочого режиму 900–1 000 °С перепад температури за перерізом печі становить ± 7 °С.

Порівняння техніко-економічних показників процесу нагрівання деталей у печах із киплячим шаром і в електропечах показує, що за рівної продуктивності обладнання енерговитрати на тонну вироблених у киплячому шарі виробів утричі менші, ККД в 1,6 раза вищий, виробнича площа, займана піччю киплячому шарі, у 20 разів менша.

У технічній літературі наводяться дані, які показують, що використання печі з киплячим шаром як відпускної, дозволяє вдвічі скоротити тривалість операції (з

урахуванням часу нагрівання) порівняно з відпуском за використання конвективної печі. Як приклад, за низькотемпературного відпуску циліндричних виробів діаметром 42 мм і довжиною 380 мм (температура відпуску 180 °С) використання киплячого шару для обробки дозволило скоротити час відпуску порівняно з часом відпуску в маслі з 6 до 4 год.

До недоліків використання киплячого шару для нагрівання металовиробів у серійному виробництві належать невисокі техніко-економічні характеристики процесу. Насамперед це пов'язано з відносно невеликими садками, порівняно з газовими процесами нагрівання, додатковими, суттєвими витратами на каталізатор та носій, підвищеними (в 7–10 разів більшими) витратами газів на псевдозрідження та великими витратами електроенергії на обробку 1 кг садки.

До недоліків способу нагрівання металовиробів у киплячому шарі при продуванні його продуктами спалювання газових сумішей відносять також і фактор налипання частинок, що не задовольняє вимогам отримання світлої поверхні деталей, при цьому одержання температур у печі нижче ~600 °С за рахунок спалювання палива в киплячому шарі деякі автори вважають взагалі неможливим.

Під час досліджень автори ставили завдання створення раціонального способу примусового об'ємного охолодження виробів інструментальних виробництв та конструктивно-технологічних параметрів пристрою для його реалізації, які можуть стабільно забезпечити необхідний рівень властивостей металу за мінімального рівня його жолоблення і деформації.

Відносно процесів гартувального охолодження металовиробів можна зазначити, що для ефективної реалізації режимів зміцнювальної термічної обробки використовуються охолоджувальні середовища, кожне з яких має тільки йому притаманні властивості. Відомо, що для отримання в металі мартенситної структури у процесі примусового охолодження металовиробів необхідно забезпечити

швидкість охолодження $\geq V_{кр}$. Збільшення інтенсивності охолодження металу деталей у процесі гартового охолодження спричинює зростання рівня термічної та структурної напруги, і відповідно, підвищення ймовірності жолоблення, деформації та тріщиноутворення.

Пошук найбільш раціональних охолоджувальних середовищ і способів охолодження, які задовольняли б явно протилежні по суті вимоги (з одного боку – підвищення інтенсивності охолодження та забезпечення мартенситного прогартування, з іншого – зростання рівня термічних і структурних напружень, ймовірності жолоблення, деформації та тріщино утворення), ведеться безперервно протягом історії розвитку способів термічного зміцнення металовиробів.

Одним з таких напрямків стало використання киплячого шару як охолоджувального середовища. Такі середовища та способи організації гартувального охолодження мають свої переваги та недоліки перед традиційними способами об'ємного охолодження в рідких середовищах. Як приклад можна навести результати досліджень, опубліковані в працях проф. В. К. Заблоцького та ін. [6; 7].

Аналіз даних, які наводяться в технічній і патентній літературі, показав, що для розроблення конкурентоспроможних тепломасообмінних апаратів доцільно використовувати інший підхід (порівняно з апаратами з псевдозрідженим шаром, який одержують під час продування сипучого матеріалу повітряним або газовим середовищем) зі створенням умов взаємодії контактуючих фаз, які сприяють більш інтенсивному оновленню міжфазної поверхні.

Цей напрямок пов'язаний з освоєнням прогресивних процесів тепло- та масопереносу, для проведення яких найбільш перспективні апарати з циркуляційним шаром частинок сипучих матеріалів.

Результатами низки досліджень визначено, що характерну особливість апаратів із теплоносієм у вигляді частинок

твердих матеріалів становлять пристрої, в яких частинки сипучого матеріалу здійснюють циркуляційний рух по замкнутій траєкторії. У літературі такі пристрої, що використовують як охолоджувальне середовище частки сипких матеріалів, називають «віброгравітаційними».

Термін «віброгравітаційний» означає, що частинки теплоносія за рахунок вібрації елементів охолоджувальних пристроїв піднімаються до певного верхнього положення і за рахунок сил гравітації вільно зсипаються на дно ванни, звідки за рахунок вібраційних сил знову переміщуються вгору, і процес повторюється. Оброблювані деталі після їх нагрівання до заданої температури викидаються в таке віброзріджене середовище і охолоджуються в ньому в пригніченому або вільному стані.

Для перемішування сипких (а також пастоподібних та рідких) продуктів у промисловості застосовують в основному два способи – гравітаційний та примусовий (механічний). Перший здійснюється за дії сил тяжіння в барабанних, лоткових та бункерних змішувачах, другий – у шнекових та лопатевих. Практика показала, що у разі використання статичних способів перемішування не досягається однорідність середовища, не забезпечується підвищення активності компонентів, відбувається зміна гранулометричного складу суміші. Задовільна якість перемішування спостерігається лише за малих ступенів заповнення камери, що спричинює збільшення габаритів і маси змішувача, та для добре сипких, малозв'язкових матеріалів.

Вібраційний вплив на матеріали, що перемішуються, і на робочі органи змішувача значно збільшує продуктивність процесу, знижує енергоємність і поліпшує якість суміші. При цьому вібрація в одних випадках може лише інтенсифікувати основний процес (наприклад, вібрування шнека в у шнековому змішувачі), в інших – викликати специфічні вібраційні ефекти, які використовуються для перемішування (наприклад, циркуляційне вібро-

транспортування суміші всередині циліндричної або тороподібної судини).

Процес перемішування з накладенням вібрацій супроводжується, крім того, додатковими ефектами руйнування зерен, оголенням додаткових поверхонь, руйнуванням когуляційних структур, збільшенням диспергування твердих частинок та газу, тобто активізацією суміші.

Процес перемішування органічно властивий сипучому матеріалу, який піддається вібрації. Вібраційні імпульси викликають хаотичні зіткнення частинок матеріалу, поділ їх за формою, щільністю і розмірами, руйнування конгломератів, що склалися, зменшення тертя між частинками. Перемішування відбувається практично в будь-якому процесі, де використовується вібрація, проте якісне перемішування можливе тільки у спеціальних пристроях із цілеспрямованою вібрацією. Дослідження перемішування в судинах, що піддаються вертикальній вібрації, показали, що інтенсивний процес починається лише тоді, коли прискорення дна судини перевищує земне прискорення. Ступінь інтенсивності залежить від параметрів вібрації, розміру та щільності частинок, повітропроникності шару, висоти шару, вологості, коефіцієнта тертя, розмірів та форми робочої камери.

Створити інтенсивне перемішування тонкодисперсних порошоків із розміром частинок менше 10 мкм практично не вдається за всіх реально досяжних параметрів вібрації. Це пояснюється агрегуванням частинок та сильним проявом насосного ефекту, який перешкоджає відриву частинок від дна судини. Для більшості сипких матеріалів із частинками розміром 50–1 500 мкм існує певне поєднання частоти та амплітуди, за яких починається інтенсивне перемішування. Наприклад, для кварцового піску з частинками розміром 100 мкм за висоти шару 70 мм процес перемішування за частотою 50 Гц починає інтенсивно відбуватися, коли амплітуда досягає 1 мм.

Інтенсивність перемішування за вертикальних коливань різко знижується у вакуумі, оскільки не виникає насосного

ефекту. Для перемішування у вакуумі використовують установки, в яких процес відбувається в результаті вібро-транспортування (наприклад, по лотку зі східцями). Вакуум сприяє хорошему переміщенню та перемішуванню багатьох тонкодисперсних порошоків за значно менших прискорень, ніж за атмосферного тиску. Цей спосіб знаходить застосування для сушіння барвників, солей та інших матеріалів.

У рідкому середовищі сипкий матеріал перемішується значно гірше, ніж у повітрі. На рух частинок рідини істотно впливають їх розміри, в'язкість рідини і концентрація в ній твердої фази, при цьому інтенсивний рух спостерігається у верхній частині при відносно спокійній нижній. Частота коливань частинок значно (в 2–2,5 раза) менша, ніж частота коливань дна апарата. Активним переносником частинок стають потоки рідини, що виникають під час вібрації. Так, в умовах стисненого руху крупнодисперсних частинок при циркуляції води, навколо частинок створюється шар, який добре перемішується.

Інтенсивність перемішування сипучих матеріалів збільшується за додаткового продування шару газом (наприклад, для порошку поліпропілену розміром 0,1–0,15 мкм – удвічі), однак рівномірне перемішування можна отримати тільки в разі оптимального поєднання вібраційного впливу та швидкості газового потоку.

Перемішування в умовах вертикальної вібрації відбувається недостатньо інтенсивно і не знаходить промислового застосування. У промислових змішувачах робочий орган піддається круговим (у вертикальній площині) або просторовим (об'ємним) коливанням, а змішувальну камеру виконують циліндричною, коритоподібною або тороїдальною. У цьому випадку при вібрації камери виникає транспортувальний ефект, який, накладаючись на вібраційний, створює кращі умови для перемішування середовища.

Інтенсивність циркуляції суміші залежить від параметрів вібрації,

властивостей сипучого матеріалу, розмірів та форми камери, ступеня її заповнення, розташування віброзбудника та інших конструктивних особливостей пристроїв. При цьому основне, превалююче значення на теплоперенесення між сипучим матеріалом і матеріалом деталі мають відносний рух частинок суміші і мікротурбулентність шарів, що становить необхідну передумову швидкого перебігу процесу перемішування, та є основними особливостями, які відрізняють вібраційний спосіб від інших способів перемішування.

Одна з важливих властивостей киплячого та віброзрідженого шару – це високий коефіцієнт теплообміну (200–1 000 ккал/м²·ч·град. і більше), що дає можливість регулювання швидкості нагрівання та охолодження металовиробів (порівняно із гартуванням у маслі) в області високих температур металу деталі за відсутності стадії парової плівки на поверхні деталей, а також відсутність на кривій охолодження металу температурних інтервалів, у яких відбувається зміна криз кипіння (характерно для середовищ, що змінюють свій агрегатний стан на межі метал – холодоагент).

Наслідком таких теплотехнічних особливостей процесу гартового охолодження в киплячому шарі стало суттєве зменшення жолоблення, деформації та ймовірності розтріскування металовиробів під час гартування. Відомо, що максимальний перепад температур між центром і поверхнею деталей, що спостерігається в процесі гартування в киплячому шарі ($\Delta t = 130$ °C), виявляється значно меншим, ніж за гартування в маслі ($\Delta t = 250$ °C), а тим більше у воді ($\Delta t = 700$ °C). Це зменшує рівень напруги в металі деталі в процесі її охолодження, що є однією з причин зниження жолоблення та деформації.

У разі використання псевдорідких охолоджувальних середовищ існує реальна можливість забезпечити умови ізотермічного $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення переохолодженого аустеніту за бейнітним механізмом, у процесі якого рівень

термічної та структурної напруги в металі істотно нижчий порівняно із гартуванням на мартенситну структуру.

У термічних виробництвах різних галузей промисловості помічається поширене використання способів термічного зміцнення з реалізацією бейнітного перетворення (в т. ч. і різні види ізотермічного гартування) в металі інструменту в разі використання псевдозріджених сипучих середовищ (за рахунок продування ванни із сипучим матеріалом) або віброзріджених сипучих матеріалів (у технічній літературі використовується термін «віброгравітаційні частки теплоносія»).

Отримання віброзріджених обсягів сипучих матеріалів часто організується за рахунок вібрацій жорсткої конструкції бака для гартування, яка здійснює рух замкнутим контуром, часто знизу вгору.

До основних недоліків віброгравітаційних охолоджувальних середовищ можна віднести:

- складність досягнення критичної швидкості охолодження (для отримання мартенситного прогартування в сталях із низькою стійкістю аустеніту до розпаду) для багатьох марок сталей, що стримує широке використання їх у промисловості;

- складність використання віброгравітаційного принципу псевдозрідження сипучих середовищ у промислових умовах під час термічної обробки великогабаритних виробів.

Тому в дослідженнях основну увагу приділяли створенню умов для підвищення швидкості охолодження виробів інструментальних виробництв у ванні з віброгравітаційним шаром сипучого матеріалу і можливості організації ізотермічної витримки для $\gamma \rightarrow \alpha$ перетворення переохолодженого аустеніту в необхідному температурному інтервалі (наприклад, створення умов, характерних для Q-p-P технологій [8]).

Відомо, що швидкість охолодження виробів зростає за зниження температури киплячого охолоджувального шару. Таким чином, залежно від марки сталі та перерізу

(маси) виробів, які охолоджуються, для отримання в металі заданих механічних властивостей, які забезпечуються утворенням сорбітно-трооститної структури, може використовуватися як киплячий шар, що підігрівається, так і «холодний» (нижче 100 °С).

При цьому швидкість охолодження в «холодному» киплячому шарі (його температура нижче 100 °С) у всьому інтервалі температур металу деталі практично не змінюється, а розігріву середовища вище 100 °С (за рахунок внесення тепла від охолоджуваних виробів) можна уникнути, обладнавши охолоджувальний бак змійовиками з проточною водою або влаштувавши охолодження стінок пристрою, в якому міститься сипкий матеріал.

Можлива також організація більш високої швидкості охолодження за рахунок впорскування порцій води в киплячий шар, на випаровування яких буде використовуватися зайве тепло, або за рахунок попереднього охолодження до мінусових температур повітря для продування шару або переохолодження до низьких температур сипучого матеріалу в разі використання його у віброгравітаційному шарі.

У технічній літературі наголошується, що найбільш прийнятний матеріал для киплячого шару – це електрокорунд. Він має досить високу твердість і щільність, що визначає тривалий термін служби. За охолоджувальною здатністю він займає проміжне положення між повітрям і маслом, тому питання заміни масла на охолодження в киплячому шарі вирішується індивідуально, залежно від марки сталі, розмірів деталей та необхідного структурного стану металу деталі.

Аналіз літературних даних показує, що киплячий шар являє собою ефективне середовище для гартованого охолодження деталей з легованих інструментальних сталей, таких як 9ХС, ХВГ, ХБВФ, Х12Ф1, Х12М, Р9, Р18 і т. п. Цікаво більш детально розглянути результати дослідження охолоджувальної здатності киплячого шару

порівняно з водою, маслом та розплавленою селітрою (при 300 °С), наведені, наприклад, у працях В. П. Курбатова та В. І. Муравйова.

Досліди проводили на циліндричному зразку із сталі Х18Н9Г1. Температуру в центрі та на поверхні зразка вимірювали хромель-алюмелевою термопарою. З кривих охолодження зразка в різних середовищах (рис. 1, 2) видно, що інтенсивність охолодження в киплячому шарі наближається до інтенсивності охолодження у маслі.

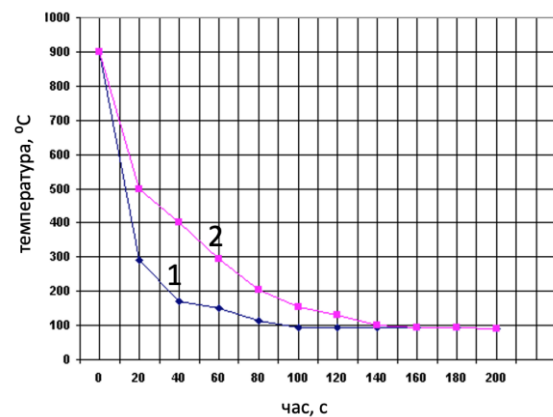


Рис. 1. Швидкість охолодження поверхні зразка діаметром 20 мм: 1 – у маслі; 2 – в киплячому шарі електрокорунду

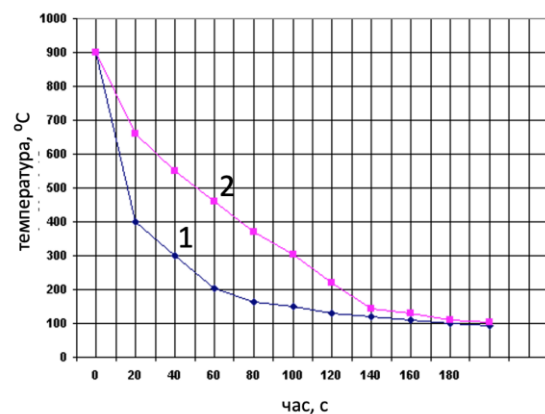


Рис. 2. Швидкість охолодження поверхні зразка діаметром 40 мм: графік 1 – у маслі; графік 2 – в киплячому шарі електрокорунду

Аналіз температурних перепадів за перерізом зразка, охолодженого в різних середовищах (рис. 3, 4), показав, що в разі використання киплячого шару за всіх температур охолодження перепад значно менший, ніж під час охолодження в холодних рідких середовищах.

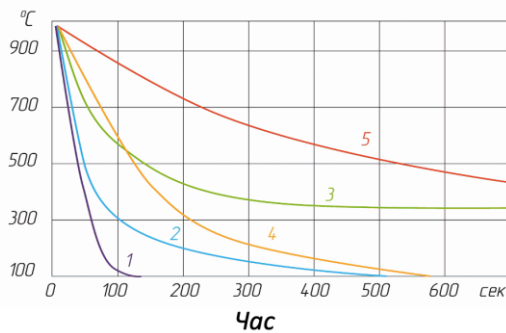


Рис. 3. Криві охолодження центра зразка: 1 – у воді; 2 – у трансформаторному маслі; 3 – у селітрі (300 °С); 4 – в киплячому шарі; 5 – на повітрі

Для прикладу наведено результати термічної обробки зразків діаметром 8 мм і довжиною 150 мм зі сталей P18 та X12M, які гартували в киплячому шарі, а також на повітрі, у маслі та розплавленій селітрі за 300 °С. Твердість, мікроструктуру та деформацію визначали після гартування та після відпуску. За деформацію зразків приймали прогин у середній частині, який заміряли індикатором під час установлення

зразків у центрах.

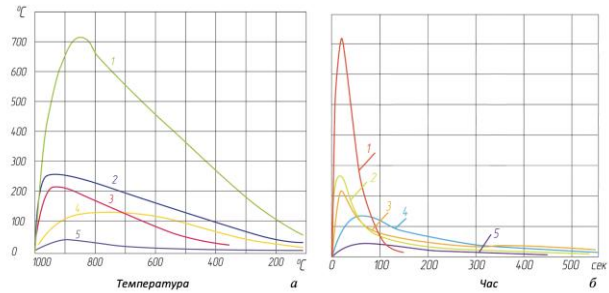


Рис. 4. Температурний перепад за перерізом зразка: а – залежно від температури центру зразка; б – залежно від часу охолодження зразка; 1 – охолодження у воді; 2 – у маслі; 3 – у селітрі (300 °С); 4 – в киплячому шарі; 5 – на повітрі

Результати вимірювань твердості та деформації показали, що твердість зразків, загартованих у киплячому шарі, не відрізняється від твердості зразків, загартованих в інших середовищах (табл. 1).

Таблиця 1

Результати вимірювань твердості та деформації зразків зі сталей P18 і X12M

Марка сталі	Гартування				Відпуск	
	Температура, °С	Охолоджувальне середовище	HRC	Деформація, мм	Температура, °С	HRC
P18	1270	Повітря	61–61,5	0,18–0,28	560 (триразовий)	61–62,5
		Масло	60–61	0,30–0,37		62–62,5
		Селітра за 300 °С	59,5–61	0,60–0,70		62–63,0
		Киплячий шар	61–61,5	0,20–0,28		62–63,5
X12M	1120	Повітря	46–48	0,06–0,13	500 (п'ятиразовий)	60–61,5
		Масло	46,5–48	0,15–0,20		61–61,5
		Селітра за 300 °С	45,5–47	0,05–0,12		61–61,5
		Киплячий шар	47–48	0,08–0,10		60–61,5
	1000	Масло	62–63,5	0,07–0,17	150	62–63,5
		Селітра за 300 °С	62,5–63	0,08–0,15		62,5–63,5
		Киплячий шар	62–63	0,03–0,07		62–63

Максимальна деформація зразків із сталі P18 спостерігається під час ізотермічного гартування в селітрі за 300 °С з отриманням бейнітної структури, що ймовірно пов'язано з перерозподілом вуглецю в залишковому аустеніті і його перетворенням на мартенсит. Зразки, загартовані в киплячому шарі та на повітрі, мають меншу деформацію, ніж після гартування в маслі. Зразки зі сталі X12M, загартовані з 1 120 °С і 1 000 °С, також мають меншу деформацію після охолодження в киплячому шарі та на

повітрі, ніж після гартування в маслі.

Експерименти з гартування різних інструментів у киплячому шарі показали, що вони піддаються жолобленню і деформації при цьому значно менше, ніж у разі гартування в маслі. Працездатність інструменту після гартування в киплячому шарі така, як і після гартування в маслі. Після відпуску загартованих зразків деформація у всіх випадках не змінювалася.

У мікроструктурі загартованих і відпущених зразків відмінності не виявили.

Результати випробувань зразків із сталі P18 на червоностійкість після нагрівання за 600, 625, 650 і 675 °С протягом 4 год. (табл. 2) показують, що червоностійкість зразків, загартованих у киплячому шарі, маслі та селітрі, однакова, а зразків, загартованих на повітрі нижча.

Аналіз літературних даних показує також, що в разі гартування в киплячому

шарі і з гартуванням у маслі та селітрі різних видів інструменту зі сталей P18, P9, P18K5Ф2, X12M і X12Ф1 (свердла, протяжки, фрези, мітчики, різці та ін.) деформація інструменту, загартованого в киплячому шарі, значно менша, ніж після гартування в інших середовищах за однакової твердості.

Таблиця 2

Дослідження червоностійкості сталі P18 після однакових обробок із використанням різних середовищ для гартування

Охолоджувальне середовище	Твердість після термічної обробки, HRC	HRC після нагрівання 4 ч за температури, °С			
		600	625	650	675
Киплячий шар	62...63,5	60...61	58,5...59	57...58	47,5...48
Масло	62...62,5	60...61	58...59	56...57	47...48
Селітра при 300 °С	62...63	60...61	58...59	57...58	46...48
Повітря	61,5...62	58...59	56...57	49...50	45,5...46

Випробування на прогартуваність сталей P18 і X12M на зразках перетином 25×25 мм і довжиною 150 мм за методом торцевого гартування [13] показали, що зразки прогартувалися на всю довжину за гартування в маслі і киплячому шарі.

У таблиці 3 наведено властивості киплячого шару за охолодження деталей залежно від властивостей зернистого

матеріалу, який використовується як теплоносії.

У таблиці 4 наведено порівняльні дані щодо охолоджувальної здатності різних охолоджувальних середовищ, у т. ч. і для киплячого шару (срібний термозонд – кулька) за температур поверхні кульки близько 600 та 200 °С.

Таблиця 3

Властивості киплячого шару залежно від властивостей твердого теплоносія (дослідні дані)

Характеристика зернистих матеріалів			Температура в апараті, °С	Швидкість повітря, м/с	Максимальний коефіцієнт тепловіддачі	
найменування	щільність, кг/м ³	середній діаметр, мк				
Феросиліцій	6 800	82,5	30	0,30	721	620
Карборунд	3 500	137	25	0,22	500	430
Кварцовий пісок	2 590	140	30	0,20	495	426
	2 600	428	30	0,36	361	310
	2 600	1 100	20	0,68	209	180

Таблиця 4

Швидкість охолодження срібної кульки діаметром 20 мм в різних середовищах

Охолоджувальне середовище	Швидкість охолодження град/с, за температур поверхні кульки °С	
	600	200
Киплячий шар	Від 2 до 60	Від 0,5 до 20
Розплавлена сіль за 250 °С за 550 °С	90	-
	18	-
Масло	60	15
Повітря	5	1,5

Грунтуючись на інформації, отриманій з технічних джерел, і використовуючи власні напрацювання, в умовах кафедри матеріалознавства та термічної обробки металів ННІ «ІПБТ» УДУНТ та ТОВ «ТЕХМАШ», автори ведуть дослідження з визначення конструктивно-технологічних параметрів вібраційного охолоджувального пристрою та способу термічної обробки сталевих виробів із використанням віброзрідженого сипучого матеріалу, як охолоджувального середовища [14; 15]. Дослідження показують, що за рахунок зміни температури, виду та розмірів частинок сипучого матеріалу, а також параметрів вібрації та режиму охолодження можна змінювати швидкість охолодження оброблюваного металу для отримання необхідного структурного стану та властивостей виробів.

На базі ТОВ «ТЕХМАШ» виготовлено дослідно-промисловий варіант установки для гартування деталей у віброгравітаційному шарі сипучого матеріалу та проводиться відпрацювання різних режимів охолодження деталей різноманітної форми, розмірів та різнотовщинності з вуглецевих та легованих сталей.

Висновки

До основних висновків, які можна зробити на підставі аналізу різних джерел

інформації, належать:

1. Охолоджувальна здатність киплячого шару для гартування металовиробів наближається до охолоджувальної здатності масла.

2. Температурний перепад по перерізу деталей, які охолоджуються в киплячому шарі, та їх деформація значно менші, ніж за використання традиційних рідких середовищ (вода, масло та ін.).

3. Киплячий шар може бути використаний як гартувальне середовище для легованих та високолегованих інструментальних сталей.

Переваги способу охолодження в киплячому шарі:

1. Можливість регулювання швидкості охолодження у процес гартування виробів без заміни середовища.

2. Можливість організації ізотермічної витримки деталі за певної температури (ізотермічний режим гартування) за рахунок конструктивно-технологічних параметрів охолоджувального пристрою.

3. Мінімальне викривлення (жолоблення) та деформація деталей під час гартування.

4. Відсутність шкідливих виділень під час гартування.

5. Стабільні властивості гартувального середовища у часі.

6. Пожежна безпека та екологічна безпека гартувального середовища.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Davidson J. F., Harrison D. Fluidization. Academic Press, 1971. 847 с.
2. Драгобецкий В. В., Коноваленко А. Д., Загорянский В. Г. Новые и высокоэффективные технологии в машиностроении : уч. пособ. Харьков : «Точка», 2012. 238 с.
3. Дорошенко В. С., Каложный П. Б. Концепции охлаждения отливок с помощью криотехнологии, новых сыпучих материалов и способов литья. *Металл и литье Украины*. 2019. № 5–6. С. 312–313.
4. Bed Material. *ScienceDirect*. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/bed-material> (дата звернення: 05.06.2024).
5. Fluidized Bed. *ScienceDirect*. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/fluidized-bed> (дата звернення: 05.06.2024).
6. Спосіб термічної обробки сталі : Пат. 43690 U 2009 03360 Україна : C21D9/22 ; заявл. 08.04.2009; опубл. 25.08.2009, Бюл. № 16.
7. Шимко В. И. Усовершенствование режимов термической обработки сталей и чугунов с применением охлаждения в сыпучем графите : автореф. дис. на соискание науч. ст. канд. техн. наук : 05.16.01 «Металловедение и термическая обработка металлов»; ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет». Мариуполь, 2013. 23 с.
8. Шпортько Ю. В., Дейнеко Л. М. Сучасна технологія ізотермічного гартування. Молоді вчені 2024 – від теорії до практики : матер. XIV Всеукр. наук.-практ. конф. здоб. вищ. осв. і мол. уч. Електронне видання. Дніпро : Журфонд, 2024. С. 88–90.

9. Спосіб виготовлення виливків : патент 131907 Україна : МПК B22D 7/00, B22D 23/00, B22D 27/04, C21D 1/20; опубл. 11.02.2019, Бюл. № 3.
10. Спосіб виготовлення виливків з бейнітного або аусферитного чавуну : патент 131968 Україна : МПК B22 D7/00, B22 D23/00, C21D 1/20, C21D 5/02; опубл. 11.02.2019, Бюл. № 3.
11. Спосіб виготовлення виливків з ізотермічно загартованого бейнітного чавуну : патент 133701 Україна : МПК B22D 7/00, B22D 23/00, B22D 27/04, C21D 5/02, C21D 1/20; опубл. 25.04.2019, Бюл. № 8.
12. Спосіб виготовлення виливків з ізотермічно загартованого чавуну : патент 133701 Україна : МПК B22D23/00, B22D 23/00, B22D27/04, C21D 5/02; опубл. 25.01.2019, Бюл. № 8.
13. ISO 642:1999. Steel – Hardenability test by end quenching (Jominy test). ULR: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/1228/aaaec2f19f6740c7b0aee0e75ecc9b59/ISO-642-1999.pdf> (дата звернення: 05.06.2024).
14. Спосіб термічної обробки сталевих виробів : патент України на корисну модель № 151859 від 22.09.2022. МПК (2006) C21D 9/00 (2006:01); C21D 9/22 (2006:01); заявка № u 2022 01529 від 12.05.2022 р.; опубл. 21.09.2022, Бюл. № 33.
15. Пристрій для загартування сталевих виробів : патент України на корисну модель UA 151425 U від 21.07.2022. C21D 1/62 (2006:01); C21D 1/60 (2006:01); заявка № u2022 00049 від 05.01.2022 р.; опубл. 20.07.2022, Бюл. № 29.

REFERENCES

1. Davidson J.F. and Harrison D. Fluidization. Academic Press Publ., 1971, 847 p.
2. Dragobetsky V.V., Konovalenko A.D. and Zagoryansky V.G. *Novye i vysokoeffektivnye tekhnologii v mashinostroenii : uch. posob.* [New and highly efficient technologies in mechanical engineering : textbook guide]. Kharjkiiv : “Tochka” Publ., 2012, 238 p. (in Russian).
3. Doroshenko V.S. and Kalyuzhny P.B. *Kontseptsii okhlazhdeniya otlivok s pomoshch'yu kriotekhnologii, novykh sypuchikh materialov i sposobov lit'ya* [Concepts for cooling castings using cryotechnology, new bulk materials and casting methods]. *Metall i lit'e Ukrainy* [Metal and Casting of Ukraine]. 2019, no. 5–6, pp. 312–313. (in Russian).
4. Bed Material. ScienceDirect. ULR: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/bed-material> (accessed : 05 June 2024).
5. Fluidized Bed. ScienceDirect. ULR: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/fluidized-bed> (accessed: 05 June2024).
6. Zablotsky V.C., Feldman V.Ye., Fesenko A.M., Fedorinov V.A., Shimko A.I. et al. *Sposib termichnoyi obrobki stali* [Method of heat treatment of steel]. Ukrainian patent no. 43690 U 2009 03360, C21D9/22; statement 04/08/2009; published 25.08.2009, Bull. no. 16, 2009. (in Ukrainian).
7. Shimko V.I. *Usovershenstvovanie rezhimov termicheskoy obrabotki staley i chugunov s primeneniem okhlazhdeniya v sypuchem grafite* : avtoref. dis. na soiskaniye nauch. st. kand. tekhn. nauk : 05.16.01 “Metallovedeniye i termicheskaya obrabotka metallov” [Improvement of heat treatment regimes for steels and cast irons using cooling in bulk graphite: abstract of a PhD dissertation in engineering : 05.16.01 “Metal Science and Heat Treatment of Metals”]. Mariupol' : Priazovsky State Technical University, 2013, 23 p. (in Russian).
8. Shportko Yu.V. and Deineko L.M. *Suchasna tekhnologhija izotermichnogo ghartuvannja* [Modern isothermal hardening technology]. *Molodi vcheni 2024 – vid teorii do praktyky : Materialy XIV Vseukraïnsjka naukovo-praktychna konferencija zdobuvachiv vyshhoï osvity i molodykh uchenykh* [Young Scientists 2024 – from Theory to Practice : Materials of the XIV All-Ukrainian scientific and practical conference of higher education graduates and young scientists]. 21 March 2024, Dnipro : Zhurfond Publ., 2024, pp. 88–90. (in Ukrainian).
9. Doroshenko V.S. and Shinsky V.O. *Sposib vyghotovlennja vylyvkiv* [Method of production of castings]. Patent 131907 Ukraine: IPC B22D 7/00, B22D 23/00, B22D 27/04, C21D 1/20; published 11.02.2019, Bul. no. 3. (in Ukrainian).
10. Doroshenko V.S. and Shinsky V.O. *Sposib vyghotovlennja vylyvkiv z bejnitnogo abo ausferytnogo chavunu* [The method of making castings from bainite or ausferite cast iron]. Patent 131968 Ukraine: IPC B22 D7/00, B22 D23/00, C21D 1/20, C21D 5/02; published 11.02.2019, Bul. no. 3. (in Ukrainian).
11. Doroshenko V.S., Kalyuzhny P.B. and Shinsky V.O. *Sposib vyghotovlennja vylyvkiv z izotermichno zaghartovanogo bejnitnogo chavunu* [The method of manufacturing castings from isothermally hardened bainite cast iron]. Patent 133701 Ukraine: IPC B22D 7/00, B22D 23/00, B22D 27/04, C21D 5/02, C21D 1/20; published 04/25/2019, Bul. no. 8. (in Ukrainian).
12. Doroshenko V.S., Kalyuzhny P.B. and Shinsky V.O. *Sposib vyghotovlennja vylyvkiv z izotermichno zaghartovanogo chavunu* [Method of manufacturing castings from isothermally hardened cast iron]. Patent 133701 Ukraine: IPC B22D23/00, B22D 23/00, B22D27/04, C21D 5/02; published 25.01.2019, Bul. no. 8. (in Ukrainian).
13. ISO 642:1999. Steel – Hardenability test by end quenching (Jominy test). ULR: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/1228/aaaec2f19f6740c7b0aee0e75ecc9b59/ISO-642-1999.pdf> (accessed: 05 June 2024).

14. Deineko L.M., Butenko A.A., Kabak A.I. et al. *Sposib termichnoji obrobky stalevykh vyrobiv* [Method of heat treatment of steel products]. Ukrainian utility model patent no. 151859 dated 09/22/2022. IPC (2006) C21D 9/00 (2006:01); C21D 9/22 (2006:01); application no. u 2022 01529 dated May 12, 2022; published 09/21/2022, Bul. no. 33. (in Ukrainian).

15. Deineko L.M., Butenko A.A., Kabak A.I. et al. *Prystrij dlja zaghartuvannja stalevykh vyrobiv* [The device for hardening steel products]. Patent of Ukraine for utility model UA 151425 U dated 07/21/2022. C21D 1/62 (2006:01); C21D 1/60 (2006:01); application no. u2022 00049 dated January 5, 2022; published 07/20/2022, Bul. no. 29. (in Ukrainian).

Надійшла до редакції: 12.04.2024.