О.С. Воденнікова¹, канд. техн. наук, доц., e-mail: oksana_vodennikova@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0496-5435>

С.А. Воденніков², д-р техн. наук, проф., e-mail: s_vodennikov@i.ua, <https://orcid.org/0000-0002-5563-5244>

Є.А. Манідіна¹, канд. техн. наук, доц., e-mail: manidina_zgia@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4090-9991>

¹Запорізький національний університет (Запоріжжя, Україна)

²Національний університет «Запорізька політехніка» (Запоріжжя, Україна)

Застосування кріогенного бластингу як сучасного методу очищення від забруднень виливниць для розливки сталі

Запропоновано застосування нової ресурсозберігаючої технології – кріогенного бластингу як сучасного методу очищення від забруднень деталей та механізмів металургійного призначення. Зокрема, запропоновано використання гранул сухого льоду (твердої фази двоокису вуглецю) як сучасного методу очищення чавунних виливниць в процесі їх підготовки до розливки сталі. Наведено основні переваги технології кріогенного бластингу та показано, що ця технологія в порівнянні з іншими методами очищення деталей та механізмів металургійного призначення найменше впливає на навколишнє середовище та є екологічно безпечною для життя та здоров'я довкілля. Представлено схему процесу видалення забруднень (слідів нагару, хлоридів, сплесків та іншого) зі стінок виливниці за допомогою подачі гранул сухого льоду. Процес очищення металевої поверхні від забруднень відбувається в три етапи: механічний (коли гранули сухого льоду видувуються струменем стисненого повітря і вдаряються об забруднення на високій швидкості, видаляючи їх); термічний (за рахунок низької температури (-79°C) сухий лід робить забруднення більш крихкими, при цьому виникає так званий «термічний шок», сприяючи їх повному видаленню); сублімація (коли швидко перетворення твердого сухого льоду в газ провокує вибух на поверхні, що видаляє залишки забруднень та іржі). Запропоновано схему руху гранул сухого льоду при кріогенному бластингу, яка дозволяє розкрити суть процесу накоплення відцентрової енергії гранул льоду при обертанні спеціального диска у виливниці. За допомогою теоретичного розрахунку визначено інтервал зміни відцентрової сили частинок льоду залежно від впливу маси частинок льоду (в діапазоні 0,002–0,01 кг), радіуса диска, що обертається (в діапазоні 0,1–0,3 м), при фіксованих параметрах швидкості обертання диска (в діапазоні 1000–1600 об/хв). Показано, що залежно від зміни зазначених параметрів максимальне значення відцентрової сили досягає 84,14 Н.

Ключові слова: кріогенний бластинг, гранули сухого льоду, чавунна виливниця, підготовка виливниць для розливки сталі, очищення стінок виливниці від забруднень.

Вступ. Актуальність досліджень в металургійній галузі зумовлена необхідністю визначення проблем, особливостей і наслідків стратегічних перетворень у металургійній промисловості України в контексті сучасних глобальних техніко-технологічних і соціально-економічних трансформацій під впливом постійного вдосконалення та всеохоплюючого впровадження «розумних» рішень і технологій. Головною метою становлення металургійних смарт-виробництв є підвищення адаптивності галузі до динамічних змін у зовнішньому середовищі [1]. Адаптивність металургійних підприємств у майбутньому буде значною

мірою визначатися орієнтацією не на продукцію, а на комплексне рішення – комбінацію нових матеріалів з унікальними властивостями у конкретних виробках [2].

Серед сучасних проблем металургійної галузі є визначення довгострокових чинників розвитку української металургії та обґрунтування напрямів стратегічних перетворень у галузі в умовах переоцінки завдань і перспектив промислового розвитку в Україні та світі в контексті нових викликів четвертої промислової революції («Індустрія 4.0») [1]. При чому впровадження ключових чинників «Індустрії 4.0» здатне радикально змінити не лише процеси виробництва та функціону-

вання промисловості, а й структуру економіки країни, з масштабним розвитком високотехнологічних галузей виробництва та масовим упровадженням адитивних технологій та інтелектуалізацію виробничих процесів [3].

Постановка проблеми. На сьогодні проблема удосконалення технічних засобів і технології підготовки та експлуатації металургійного обладнання набуває особливої уваги у зв'язку з дефіцитом робочої сили, необхідністю підвищення продуктивності праці, «культури» виробництва і якості ремонту. Першочерговою стає проблема пошуку нових методів очищення деталей та механізмів металургійного призначення, які б відповідали сучасним вимогам з екологічності, трудомісткості та ефективності використання [4].

Надійний антикорозійний захист металу залежить від старанності підготовки поверхні металу, в тому числі від якості очищення від продуктів корозії. Найбільш використовуваними способами попередньої обробки металу є [5]:

- очищення ручним інструментом (проводять з використанням обрубочних молотків для сколювання іржі та інших забруднень, ручних дротяних щіток, шпателів, скребоків, абразивних шкур, наждаку);
- механічне очищення (проводять з використанням обертових дротяних щіток, машин для зачистки абразивними шкурками, дисків для зачистки абразивними шкурками, абразивних точильних каменів, зачисних молотків з електро- або пневмоприводом, голчастих пістолетів, шліфувальних кругів);
- абразивоструменеве очищення, яке поділяється на різновиди: сухе абразивоструменеве очищення, абразивне струменеве очищення стисненим повітрям, абразивне струменеве очищення з впорскуванням волого, струменеве очищення рідиною під тиском.

Так міжнародні стандарти ISO 8501 [6], ISO 8502 [7] та ISO 8503 [8] встановлюють методи оцінки стану поверхні сталевих конструкцій, стандарт ISO 8504 [9] дає керівництво по методам очищення сталевих поверхонь із зазначенням можливостей кожного методу в досягненні певних рівнів чистоти поверхні.

Слід зазначити, що особливістю роботи металургійного обладнання, яке працює в умовах термоциклічних та механічних навантажень (металургійні виливниці, кокілі, прес-форми, скло-форми та інше), є періодичні нагрівання та охолодження, які викликають формування в них градієнта температур і, як наслідок, виникають значні термічні напруження, окислювання, знеуглецювання, ерозія та деформація робочих поверхонь, а також утворення на них сітки розпалу та тріщин від термічної втоми [10]. Так у процесі експлуатації чавунні виливниці для розливки сталі приходять в непридатність внаслідок утворення в їх стінках переважно поздовжніх і рідше поперечних тріщин, а також сітки розпалу, розмивів стінок і дна, вигару, раковин, сколів, викривлення та інших дефектів [11].

На металургійних підприємствах здійснюється механізоване очищення та змачування виливниць, причому очищення здійснюють двома способами – гідравлічним та механічним. Гідравлічне очищення проводять струменями води, що подається на вну-

трішню поверхню виливниці через спеціальну форсунку під тиском до 6 МПа, механічну – металевими щітками [12].

Серед сучасних методів очищення від забруднень деталей та механізмів металургійного призначення слід виділити технологію криогенного бластингу (очищення гранулами сухого льоду), до основних переваг якої слід віднести [13–15]:

- дуже низька температура гранул сухого льоду ($t = -79\text{ }^{\circ}\text{C}$) призводить до «заморожування» забруднюючого шару, від чого він «стискається» і легко видаляється з поверхні;
- відсутність вторинних відходів у зв'язку з природним випарюванням гранул сухого льоду, які перетворюються на вуглекислий газ;
- високий рівень якості очищення – швидкість очищення гранулами сухого льоду більше ніж у 2 рази в порівнянні з традиційними способами очищення, при чому гранули проникають в кути, щілини та інші важкодоступні місця, куди зазвичай при ручному очищенні дуже важко дістатися ганчіркою або щіткою;
- відсутність абразивних та корозійних елементів – поверхня при очищенні не пошкоджується, що не стоншується і не іржавіє після контакту з сухим льодом;
- підвищення техногенної безпеки процесу для робітників та зниження забруднення навколишнього середовища (згідно з ГОСТ 12162-77 [16] сухий лід не є токсичним та не проводить електрику);
- економічність процесу та швидка окупність капітальних вкладень.

До складу субстанції гранул сухого льоду не входить абсолютно ніяких хімічних розчинників, що є повністю безпечним і не завдає шкоди ні матеріалу, що оброблюється, ні навколишньому середовищу. Після вивільнення струменя, він не залишає продуктів розпаду, позбавляючи тим самим виробництво від додаткової утилізації. Завдяки тому, що сухий лід не має переходу в рідку фазу, після себе він не залишає вологих відкладень на будь-яких поверхнях, у порівнянні з паровим та водяним методами абразивного очищення, не провокуючи тим самим подальшу корозію або появу іржі на готовому продукті.

При обробці металевих конструкцій гранули сухого льоду їх механічно не пошкоджують, зберігаючи початкову фізичну і хімічну структуру поверхонь.

Крім очищення від механічних забруднень, бластинг можна застосовувати і в якості дезінфектора поверхонь. Це досягається завдяки здатності низької температури гранульованого льоду знищувати будь-які мікроорганізми, які знаходяться в секторі впливу крижаного струменя. Це також знижує витрати на додаткову термічну або хімічну обробку для дезінфекції будь-яких поверхонь матеріалів після абразивного очищення [17].

Для технології криогенного бластингу найбільш підходять гранули сухого льоду діаметром 2–3 мм і довжиною 2,5–10,2 мм (рис. 1). Для роботи пристрою для технології криогенного бластингу (бластеру) необхідне підключення стислого повітря тиском 2–14 атм і витратою 4,5–12 м³/хв [18].

Рис. 1. Гранули сухого льоду

Гранули сухого льоду застосовуються як ефективне очищення поверхні від олійно-жирових забруднень, лакофарбових покриттів, нагару, полімерних покриттів та іншого [15].

Саме тому застосування технології криогенного бластингу при очищенні чавунних виливниць від забруднень виступає альтернативою «класичним» методам очищення – використанню металевих щіток та сталевих скребків і є досить актуальним напрямом досліджень в сталеплавильному виробництві.

Мета роботи. Мета роботи – огляд технології криогенного бластингу як сучасного методу очищення від забруднень виливниць для розливки сталі.

Об'єкт та методика дослідження. Об'єктом дослідження є технологія криогенного бластингу як ефективного, швидкого та екологічно безпечного методу очищення від забруднень виливниць для розливки сталі.

При узагальненні та аналізі науково-технічної літератури з напрямку удосконалення можливостей підвищення стійкості чавунних виливниць в процесі їх підготовки до розливки сталі використовувався комплексний підхід. Виконано обробку та аналіз аналітичних залежностей відцентрової сили частинок льоду від параметрів диска, що обертається, маси частинок льоду у вигляді кулі та швидкості обертання при застосуванні технології криогенного бластингу як ресурсозберігаючої технології очищення чавунних виливниць від слідів нагару, хлоридів, сплесків та інших забруднень.

Результати дослідження. При застосуванні технології криогенного бластингу використовується розпилення гранулами сухого льоду, що розганяються потоками стисненого повітря. Зіткнення гранул сухого льоду зі забрудненнями на стінках виливниці призводить до їх різкого охолодження (до -79°C). Внаслідок відмінностей температурних коефіцієнтів розширення шару забруднення, що став крихким, гранули, потрапляючи на поверхню, сублімуються, при цьому утворюючи ефект «вибуху» на поверхні очищення, тобто миттєво переходячи з твердого стану в газоподібний. Утворені при цьому «бульбашки» вуглекислого газу в 400 разів перевершують за

Рис. 2. Схема процесу видалення забруднення зі стінок виливниці за допомогою застосування технології криогенного бластингу: 1 – чавунна виливниця; 2 – забруднення на стінках виливниці (сліди нагару, хлоридів, сплесків та іншого); 3 – розпилення гранул сухого льоду; 4 – очищення та видалення забруднень зі стінок виливниці

об'ємом розміри самих гранул, відривають частинки забруднень від поверхні [4].

Схематично процес видалення забруднення зі стінок виливниці за допомогою технології криогенного бластингу представлено на рис. 2.

Інакше кажучи, фізична сутність криогенного бластингу полягає в наступному: гранули сухого льоду направляються із значною швидкістю до оброблюваної поверхні, і при зіткненні з нею вони вибухають, створюючи високошвидкісний потік, який видаляє шляхом відшарування забруднення з оброблюваної поверхні [19].

При використанні технології криогенного бластингу необхідно мати інформацію про питому витрату гранул сухого льоду, яка залежить від типу поверхні, що очищається, обладнання, конструкції, виду і ступеня їх забрудненості [20].

Слід зазначити, що устаткування для подачі гранул сухого льоду та ємності для їх зберігання можна встановити на рухомий візок. Джерелом стисненого повітря може бути компресор або заводська мережа стисненого повітря. Велике значення має процес підготовки повітря, тобто воно повинно бути очищено від твердих частинок (наприклад, окалини та іржі), води та масел [21].

Для тривалого зберігання CO_2 в рідкому стані, його консервують в спеціальних ізотермічних камерах, а для того, щоб утворити сухий лід, вуглець охолоджують до необхідної температури під відповідним тиском.

Обговорення результатів. У роботі при застосуванні технології криогенного бластингу для очищення виливниць від забруднень запропоновано проведення аналітичних досліджень залежності відцентрової сили частинок льоду (F_c) від параметрів диска, що обертається, маси частинок льоду у вигляді кулі (m) та дотичної окружної швидкості (V) (рис. 3).

Динамічна енергія гранул сухого льоду визначається за формулою [21, 22]:

Рис. 3. Схема руху гранул сухого льоду у вигляді кулі при криогенному бластингу

$$E = \frac{\rho(c_2^2 - c_1^2)}{2}, \quad (1)$$

де ρ – питома щільність льоду, яка дорівнює 916,7 кг/м³ при 0 °С.

Відцентрова сила частинок льоду визначається за формулою [21, 22]:

$$F_1 = \frac{mV^2}{r}, \quad (2)$$

де m – маса кулі, кг; r – радіус диска, м; V – дотична окружна швидкість, яка дорівнює $V = w \cdot r$, м/с; w – кутова швидкість, яка дорівнює $w = \pi n / 30$, м/с; n – число обертів диска за хвилину, об/хв.

Встановлено, що відцентрова сила суттєво впливає на ефективність очищення чавунної виливниці від

а

б

а

б

в

г

Рис. 4. Залежність відцентрової сили частинок льоду від маси частинок льоду у вигляді кулі: а – при 1000 об/хв диска; б – при 1200 об/хв диска; в – при 1400 об/хв диска; г – при 1600 об/хв диска

а

Рис. 5. Залежність відцентрової сили частинок льоду від радіуса диска, що обертається: а – при масі частинок льоду у вигляді кулі 0,004 кг; б – при масі частинок льоду у вигляді кулі 0,006 кг; в – при масі частинок льоду у вигляді кулі 0,008 кг

забруднень. Підтвердженням цього є представлення аналітичних залежностей відцентрової сили частинок льоду від маси частинок льоду у вигляді кулі, від радіуса диска, що обертається, та кількості обертів диска за хвилину.

Варіювання значеннями маси частинок льоду у вигляді кулі (в діапазоні 0,002–0,01 кг), радіуса диска, що обертається (в діапазоні 0,1–0,3 м), та кількості обертів диска за хвилину (в діапазоні 1000–1600 об/хв) показало, що максимальне значення відцентрової сили досягає значення 84,14 Н. Представляється доцільним використання раціональної зони з масою частинок льоду в діапазоні 0,004–0,008 кг, при цьому в даному діапазоні відцентрова сила частинок льоду збільшується до 2-х разів (рис. 4). Збільшення в 3 рази радіуса диска, що обертається, та кількості обертів диска в 1,6 разів також пропорційно збільшує значення відцентрової сили частинок льоду. При чому збільшення швидкості обертання з 1000 до 1600 об/хв призводить до збільшення відцентрової сили в 2,6 рази (рис. 5).

Висновки

У статті наведено теоретичні основи процесу видалення забруднень з поверхні деталей та механізмів металургійного призначення за допомогою технології криогенного бластингу. На прикладі очищення від забруднень (слідів нагару, хлоридів, сплесків та іншого) виливниць для розливки сталі розкрито механізм використання гранул сухого льоду як ресурсозберігаючої технології, яка дозволяє до чотирьох разів збільшити швидкість очищення в порівнянні з «класичним» методом очищення – використанням металевих щіток та сталевих скребоків. Запропоновано методику визначення величини відцентрової сили частинок льоду у вигляді кулі, які вилітають з диска, що обертається, залежно від варіювання значень маси частинок льоду (в діапазоні 0,002–0,10 кг), радіуса диска, що обертається (в діапазоні 0,1–0,3 м), та швидкості обертання (в діапазоні 1000–1600 об/хв). Розрахунковим шляхом визначено раціональну зону відцентрової сили частинок льоду з масою частинок льоду в діапазоні 0,004–0,008 кг.

ЛІТЕРАТУРА

1. Амоша О.І., Нікіфорова В.А. Розвиток металургійної start-промисловості в Україні: передумови, проблеми, особливості, наслідки: науково-аналітична доповідь; НАН України, Інститут економіки промисловості. Київ, 2019. 67 с.
2. Мельник О.В. Тенденції та перспективи розвитку металургійних підприємств України. *Електронний журнал «Ефективна економіка»*. 2017. № 8. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=7629>
3. Кириченко О.С. Визначальні тенденції та засади Четвертої промислової революції, їх сутність та вплив на промисловий розвиток. *Бізнес-навігатор: науково-виробничий журнал*. 2019. Вип. 3–1 (52). С. 39–43. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/bnav_2019_3-1_9
4. Чигирик Н.Д., Чвала О.М. Перспективи впровадження криобластингу у процесі ремонту ТРС. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2015. Вип. 158. Т 2. С. 115–119.
5. Способы очистки металла. URL: https://www.krasko.ru/articles/art_56/ (дата звернення: 05.08.2021).
6. ГОСТ Р ИСО 8501-1-2014. Подготовка стальной поверхности перед нанесением лакокрасочных материалов и относящихся к ним продуктов. Визуальная оценка чистоты поверхности. Часть 1. Степень окисления и степени подготовки непокрытой стальной поверхности и стальной поверхности после полного удаления прежних покрытий [Действительный от 2012-07-08]. М.: Стандартинформ, 2016. 8 с.
7. DIN EN ISO 8502-3-2017. Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Tests for the assessment of surface cleanliness – Part 3: Assessment of dust on steel surfaces prepared for painting (pressure-sensitive tape method) (ISO 8502-3:2017); German version EN ISO 8502-3:2017, 2017.
8. DIN EN ISO 8503-1-2013. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Surface roughness characteristics of blast-cleaned steel substrates. Part 1: Specifications and definitions for ISO surface profile comparators for the assessment of abrasive blast-cleaned surfaces, 2013.
9. ISO 8504-1:2019. Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Surface preparation methods – Part 1: General principles, 2019.
10. Яковлев О.Ю. Підвищення термостійкості графітованої сталі для виливниць відцентрового лиття: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: 05.02.01 / Зап. нац. техн. ун-т. Запоріжжя, 2011. 25 с.
11. Виды и причины разрушений, ремонт изложниц. URL: <http://steelcast.ru/defekty-izlozhnic> (дата звернення: 05.08.2021).
12. Отделение чистки и смазки изложниц. URL: http://emchezgia.ru/proektirovanie/80_Otdelenie_chistki_i_smazki_izlozhnits.php (дата звернення: 05.08.2021).
13. Криогенный бластинг. URL: <http://cryoblasting.ru/> (дата звернення: 05.08.2021).
14. Бластинг – очистка оборудования гранулами сухого льда. URL: <https://bizorg.su/peskostruynaya-obrabotka-metallicheskih-izdeliy-r/p13547643-blasting-ochistka-oborudovaniya-granulam-sukhogo-lda> (дата звернення: 05.08.2021).
15. Криогенный бластинг. URL: <https://blasting-service.ru/services/kriogenniy-blasting/> (дата звернення: 05.08.2021).

16. ГОСТ 12162-77. Двуокись углерода твердая. Технические условия [Действительный от 1978-01-01]. Москва: ИПК Издательство стандартов, 1995. 25 с.
17. Криогенный бластинг, что это и зачем. URL: <https://rostovprodukt.ru/2018/05/17/kriogennyj-blasting/> (дата звернення: 05.08.2021).
18. Криогенный бластинг. URL: <https://www.corrosio.ru/posts/kriogennyiy-blasting> (дата звернення: 05.08.2021).
19. Лягунцов С.С., Джемелінський В.В. Комбінований метод очистки технологічних пристроїв для виготовлення пластмасових виробів. Тези доповідей загально-університетської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів, присвяченої дню науки. Секція «Машинобудування», підсекція «Лазерна техніка та фізико-технічні технології». Київ: НТУУ «КПІ», 2014. С. 97–98.
20. Лавренченко Г.К., Копытин А.В., Дмитриев Н.М. Разработка норм расхода сухого льда при реализации технологии CO₂-бластинга. *Технические газы*. 2013. № 3. С. 47–54. DOI: <https://doi.org/10.18198/j.ind.gases.2013.0677>
21. Тарасов В.К., Воденнікова О.С., Воденніков С.А., Манідіна Є.А. Удосконалення методів підготовки виливниць до розливки сталі. *Метал та лиття України*. 2021. № 3 (326). С. 28–35. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.03.028>
22. Воденнікова О.С., Воденніков С.А., Манідіна Є.А. Сучасні способи підготовки виливниць для розливки сталі. *Актуальні проблеми, пріоритетні напрямки та стратегії розвитку України: тези доповідей II Міжнародної науково-практичної онлайн-конференції* (м. Київ, 16 червня 2021 р.). Київ: ІТТА, 2021. С. 362–366.

Надійшла 16.08.2021

REFERENCES

1. Amosha, O.I., Nikiforova, V.A. (2019). Development of metallurgical smart industry in Ukraine: preconditions, problems, features, consequences: scientific-analytical report; NAS of Ukraine, Institute of Industrial Economics. Kyiv, 67 p. [in Ukrainian].
2. Melnyk, O.V. (2017). Trends and prospects of development of metallurgical enterprises of Ukraine. *Journal «Efektyvna ekonomika»*, iss. 8. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=7629> [in Ukrainian].
3. Kyrychenko, O.S. (2019). Important trends and fundamentals of the fourth industrial revolution, their essence and impact on industrial development. *Business Navigator*, iss. 3–1 (52), pp. 39–43. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/bnav_2019_3-1_9 [in Ukrainian].
4. Chygyryk, N.D., Chvala, O.M. (2015). The prospects for implementation of the cryogenic blasting in repair of railway rolling stock. *Collected scientific works of Ukrainian State University of Railway Transport*, iss. 158, vol. 2, pp. 115–119 [in Ukrainian].
5. Methods of metal cleaning. URL: https://www.krasko.ru/articles/art_56/ (last accessed: 05.08.2021) [in Russian].
6. GOST R ISO 8501-1-2014. Preparation of steel surfaces prior to application of paints and varnishes and related products. Visual assessment of surface cleanliness. Part 1. Oxidation state and preparation grades of uncoated steel surface and steel surface after complete removal of previous coatings, Moscow: Standartinform, 2016, 8 p. [in Russian].
7. DIN EN ISO 8502-3-2017. Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Tests for the assessment of surface cleanliness – Part 3: Assessment of dust on steel surfaces prepared for painting (pressure-sensitive tape method) (ISO 8502-3:2017); German version EN ISO 8502-3:2017, 2017.
8. DIN EN ISO 8503-1-2013. Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Surface roughness characteristics of blast-cleaned steel substrates. Part 1: Specifications and definitions for ISO surface profile comparators for the assessment of abrasive blast-cleaned surfaces, 2013.
9. ISO 8504-1:2019. Preparation of steel substrates before application of paints and related products – Surface preparation methods – Part 1: General principles, 2019.
10. Yakovliev, O.Yu. (2011). Increasing the heat resistance of graphite steel for centrifugal casting molds (Extended abstract of Doctor's thesis). Zaporozhzhia National Technical University, Zaporizhzhia, 25 p. [in Ukrainian].
11. Types and causes of destruction, mold repair. URL: <http://steelcast.ru/defekty-izlozhnic> (last accessed: 05.08.2021) [in Russian].
12. Molds cleaning and lubrication department. URL: http://emchezgia.ru/proektirovanie/80_Otdelenie_chistki_i_smazki_izlozhnits.php (last accessed: 05.08.2021) [in Russian].
13. Cryogenic blasting. URL: <http://cryoblasting.ru/> (last accessed) [in Russian].
14. Blasting – cleaning equipment with dry ice pellets. URL: <https://bizorg.su/peskostruynaya-obrabotka-metallicheskih-izdeliy-r/p13547643-blasting-ochistka-oborudovaniya-granulami-sukhogo-lda> (last accessed: 05.08.2021) [in Russian].
15. Cryogenic blasting. URL: <https://blasting-service.ru/services/kriogennyi-blasting/> (last accessed: 05.08.2021) [in Russian].
16. GOST 12162-77. Carbon dioxide solid. Specification. Moscow: ИПК Standards Publishing House, 1995, 25 p. [in Russian].
17. Cryogenic blasting, what is it and why. URL: <https://rostovprodukt.ru/2018/05/17/kriogennyj-blasting/> (last accessed: 05.08.2021) [in Russian].
18. Cryogenic blasting. URL: <https://www.corrosio.ru/posts/kriogennyiy-blasting> (last accessed: 05.08.2021) [in Russian].

19. Liahuntsov, S.S., Dzhemelinskiy, V.V. (2014). Combined method of cleaning technological devices for the manufacture of plastic products. Abstracts of the general university scientific and technical conference of young scientists and students dedicated to the day of science. Section "Mechanical Engineering", subsection "Laser equipment and physical and technical technologies". Kyiv: NTUU "KPI", pp. 97–98 [in Ukrainian].
20. Lavrenchenko, G.K., Kopytin, A.V., Dmitriev, N.M. (2013). Working out the consumption rate of dry ice at realization of CO₂-blasting technology. *Industrial Gases*, no. 3, pp. 47–54, doi: <https://doi.org/10.18198/j.ind.gases.2013.0677> [in Russian].
21. Tarasov, V.K., Vodennikova, O.S., Vodennikov, S.A., Manidina, Ye.A. (2021). Molds preparation improving methods for steel casting. *Metal and Casting of Ukraine*, no. 3 (326), pp. 28–35, doi: <https://doi.org/10.15407/steelcast2021.03.028> [in Ukrainian].
22. Vodennikova, O.S., Vodennikov, S.A., Manidina, Ye.A. (2021, June). Modern methods of preparation of molds for steel casting. *Current issues, priority areas and development strategies of Ukraine: abstracts of the II International scientific-practical online conference*. Kyiv: ITTA, pp. 362–366 [in Ukrainian].

Received 16.08.2021

Summary

O.S. Vodennikova¹, PhD (Engin.), Associate Professor,
e-mail: oksana_vodennikova@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-0496-5435>
S.A. Vodennikov², Dr. Sci. (Engin.), Professor, e-mail: s_vodennikov@i.ua,
<https://orcid.org/0000-0002-5563-5244>
Ye.A. Manidina¹, PhD (Engin.), Associate Professor,
e-mail: manidina_zgia@ukr.net, <https://orcid.org/0000-0003-4090-9991>

¹Zaporizhzhia National University (Zaporizhzhia, Ukraine)²Zaporizhzhia Polytechnic National University (Zaporizhzhia, Ukraine)**Application of cryogenic blasting as a modern method of cleaning molds for steel casting**

The application of a new resource-saving technology – cryogenic blasting as a modern method of cleaning parts and mechanisms of metallurgical application is proposed. In particular, the use of dry ice granules (solid phase carbon dioxide) as a modern method of cleaning cast iron molds in the process of their preparation for steel casting is proposed. The main advantages of cryogenic blasting technology are given and it is shown that this technology, in comparison with other methods of cleaning parts and mechanisms of metallurgical use, has the least impact on the environment and is environmentally safe for life and health. The scheme of the process of removing contaminants (traces of scale, chlorides, splashes, etc.) from the walls of the mold by feeding granules of dry ice is presented. The process of cleaning the metal surface from contamination occurs in three stages: mechanical (when granules of dry ice are blown out by a stream of compressed air and hit the pollution at high speed, removing them); thermal (due to low temperature at -79 °C dry ice makes pollution more fragile, there is a so-called "thermal shock", contributing to their complete removal); sublimation (when the rapid conversion of solid dry ice into gas provokes an explosion on the surface, which removes the remnants of dirt and rust). The scheme of movement of dry ice granules at cryogenic blasting is offered, which allows to reveal the essence of the process of accumulation of centrifugal energy of ice granules during rotation of a special disk in the mold. Using the theoretical calculation, the interval of change of the centrifugal force of ice particles is defined depending on the influence of the mass of ice particles in the range of 0.002–0.01 kg, the radius of the rotating disk (in the range of 0.1–0.3 m), at fixed parameters disk rotation speed (in the range of 1000–1600 rpm). It is shown that, depending on the change of these parameters, the maximum value of the centrifugal force reaches 84.14 H.

Keywords

Cryogenic blasting, dry ice granules, cast iron mold, preparation of molds for steel casting, cleaning of mold walls from contamination.