

УДК 621.74.047

DOI: 10.31498/2225-6733.53.1.2026.359811

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИГОТОВЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ У МАШИНАХ
БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ЗАГОТОВОК

- Чубенко В.А.** канд. техн. наук, доцент, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3356-0285>, e-mail: chubenko_va@knu.edu.ua;
- Ярош Т.П.** канд. техн. наук, доцент, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3455-9630>, e-mail: varosh_tp@knu.edu.ua;
- Хіноцька А.А.** ст. викладач, Криворізький національний університет, м. Кривий Ріг, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0735-0583>, e-mail: khinotska_aa@knu.edu.ua

У статті запропоновано спосіб удосконалення процесу виготовлення безперервнолитого виробу за рахунок регульованої вібраційної дії на матеріал під час його кристалізації. Актуальність роботи зумовлена потребою в конструкційних матеріалах, що мають високу міцність, стійкість і надійність, які цілком визначаються внутрішньою будовою металовиробу. Метою роботи є покращення властивостей безперервнолитого заготовки шляхом застосування регульованого зовнішнього впливу на утворення внутрішньої будови виробу. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі: обґрунтувати спосіб поліпшення внутрішньої будови безперервнолитого заготовки з низьковуглецевої сталі за рахунок введення в зону кристалізації вібраційних коливань раціональної частоти; дослідити роботу пневмомеханічного генератора, що забезпечує стабільний вібраційний вплив заданої частоти на процес кристалізації в машині безперервного лиття заготовок. У роботі вдосконалено технологію безперервного лиття шляхом впровадження регульованого вібраційного впливу на процеси кристалізації та розроблено конструкцію обладнання для його практичного втілення. Для створення регульованих вібрацій безпосередньо під час розливки сталі запропоновано використовувати пневмомеханічні генератори, що дозволяють змінювати частоту коливань залежно від конкретних умов кристалізації та марки металу чи сплаву. Керування частотними характеристиками здійснюється шляхом варіювання тиску стисненого повітря на вході в генератор. Визначено, що для отримання високоякісних металовиробів із низьковуглецевої сталі марки Сталь 20 раціональний діапазон частот знаходиться в межах від 50 до 75 Гц. Пристрій пропонується розташовувати на відстані 0,3-0,35 м від торця кристалізатора. Запропонований спосіб забезпечує сприятливі умови формування металовиробів і дає змогу отримувати заготовки високої якості. Наукова новизна роботи полягає в теоретичному й експериментальному обґрунтуванні методу регулювання частоти коливань генератора за рахунок зміни тиску повітря. Обладнання для створення вібраційних хвиль відрізняється конструктивною простотою та надійністю в експлуатації. Його легко інтегрувати в діючі лінії безперервного лиття заготовок на металургійних підприємствах.

Ключові слова: кристалізація; вібраційна дія; пневмомеханічний генератор; регульована частота коливань; зона вторинного охолодження.

Постановка проблеми

В умовах розвитку металургійної та машинобудівної промисловості до металопродукції висувають високі вимоги щодо міцності та жорсткості, які безпосередньо зумовлюються її внутрішньою структурою. Тому дослідження способів поліпшення внутрішньої будови металів і сплавів та розробка заходів із покращення їхніх експлуатаційних властивостей є актуальним науково-практичним завданням.

Високу ефективність у галузі металургії та машинобудування продемонструвало застосування машин безперервного лиття заготовок [1]. Таке устаткування дозволяє отримувати значні обсяги металовиробів із різноманітних металів і сплавів. Безперервна розливка є однією з найбільш прогресивних технологій, оскільки забезпечує перехід рідкого матеріалу в кристалічний стан з одночасним наданням виробам заданої геометричної форми та розмірів [2]. Умови охолодження та затвердіння матеріалу в машинах безперервного лиття сталі значною мірою визначають високу якість

металопродукції порівняно з консервативною системою розливання металу та сплавів у зливки [3].

Для всіх типів машин, які здійснюють безперервне лиття металовиробів, провідними виробниками пропонуються комплексні технічні рішення, що поєднують високу продуктивність процесу з належною якістю отриманих виробів [4]. Модернізація обладнання триває безперервно, що обумовлено постійним зростанням вимог до фізико-механічних характеристик металопродукції та розширенням сортаменту і марочного складу сталей. Водночас недостатньо вивченим залишається питання поліпшення внутрішньої структури матеріалів шляхом введення регульованих вібрацій у зону кристалізації.

Але необхідно зазначити, що питання поліпшення внутрішньої будови металів і сплавів шляхом введення регульованих вібрацій у зону кристалізації досліджено в недостатньо повній мірі.

У роботі пропонується забезпечити спрямовану кристалізацію безперервнолитого заготовки за

допомогою хвиль певної частоти, що створюються пневмомеханічним генератором.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Технологія безперервної розливки металів і сплавів є прогресивним процесом виготовлення металовиробів, оскільки дозволяє суттєво скоротити капіталовкладення у зв'язку з виключенням витрат на виливниці й обтискне обладнання, що використовується під час дискретної розливки сталі [4]. Крім того, безперервна розливка матеріалу забезпечує збереження електричної енергії, що витрачається на підігрів зливків у нагрівному колодязі в умовах дискретної розливки, сприяє поліпшенню умов праці обслуговуючого персоналу через зменшення екологічного навантаження на атмосферу та підвищенню якості продукції завдяки отриманню більш однорідної внутрішньої структури матеріалу. Використання безперервної розливки сталі забезпечує зменшення часу на виробництво продукції та зниження маси обладнання, що використовується в цеху, приблизно в 1,5 раза [2-4]. Безперервна розливка сталі зменшує на 15% витрати металу через відсутність обрізу головної та донної частин зливка. Разом з тим відбувається прискорення затвердіння матеріалу, що дозволяє досягти високого ступеня однорідності металовиробів і покращення якісних характеристик.

Значний вплив на техніко-економічні показники металургійних підприємств має вибір способу розливки рідкого матеріалу та його основних технологічних параметрів, зокрема температури охолодження та швидкості надходження розплаву до кристалізатора, оптимальних об'ємів і конструктивних особливостей обладнання тощо [5, 6].

Аналіз літературних джерел [5-8] свідчить про постійне вдосконалення будови та принципу дії обладнання для розливання та конструкцій машин безперервної розливки металів і сплавів. Дослідники пропонують різноманітні рішення щодо модернізації сталерозливних і проміжних ковшів, а також застосування більш досконалих вогнетривких матеріалів.

У машині безперервної розливки кристалізація матеріалу відбувається поступово в процесі його руху в кристалізаторі-охолоджувачі [1, 8], де рідкий сплав переходить у твердий стан. Під час зміни агрегатного стану матеріалу система прагне перейти до термодинамічно стійкого за даних умов стану, що характеризується мінімальною вільною енергією. Зміни в структурі матеріалу аналізують за допомогою діаграм фазової рівноваги [9, 10]. При затвердінні метал набуває кристалічної будови [11-13]. У випадках, коли кристалізація здійснюється з високою швидкістю при малій тривалості процесу, формується дендритна структура, що складається з розгалужених (деревоподібних) кристалів [14]. Форма таких кристалів залежить від напрямку відведення теплоти [15].

Внутрішня мікроструктура матеріалів має визначальний вплив на якість отриманих металовиробів, а

також їхні фізичні та механічні властивості. Від процесу кристалізації залежить можливість появи в структурі металу таких дефектів, як тріщини, пори, усадочні раковини тощо [9, 10]. У разі налипання матеріалу до кристалізатора можливе «зависання» виробу, що кристалізується, та подальший розрив його кірки. Це матиме негативні наслідки, оскільки погіршуватиме стан поверхні продукції та створюватиме ризик аварійних ситуацій під час розливання. Для запобігання цим явищам кристалізатору надають зворотно-поступального руху, що створюється шляхом коливання пристрою [3].

Покращення якісних характеристик металовиробів і підвищення продуктивності машин безперервної розливки матеріалу можливе завдяки впровадженню нових принципів керування кристалізацією металів і сплавів [7]. Особливо ефективними в досягненні цієї мети є методи зовнішнього впливу на метал у процесі твердіння. Одним із них є вібраційна обробка розплаву (ультразвукова, низько- або високочастотна) [6-8, 16]. Для введення коливань у безперервнолитої зливки використовують різне устаткування: хвилеводи-випромінювачі, генератори хвиль, що діють на кристалізатор, тощо. Такі пристрої забезпечують формування ударних хвиль у металі.

При накладенні вібрації ультразвукового діапазону можна спостерігати підвищення ефективності обробки при збільшенні вмісту вуглецю в сталевих матеріалах, але у випадку, коли його вміст менший за 0,4%, не вдається отримати достатнього подрібнення зерен. Крім того, ультразвукові генератори не здатні забезпечити велику амплітуду коливань, що вимагає їх встановлення безпосередньо в розплав. Це зумовлює складні умови експлуатації обладнання та скорочує термін його служби. До того ж така технологія є енергоємною та дорогавартісною.

Застосування низькочастотних вібрацій частотою 50 Гц та амплітудою 0,2 мм дає позитивні результати щодо підвищення інтенсивності тепловіддачі на 25-30%. Така обробка сприяє видаленню ліквідаційних, оксидних і газових дефектів із поверхні кристала, що забезпечує поверхневу однорідність сплаву [16]. Однак недоліком методу є однобічне підведення вібрацій до кристалізатора-охолоджувача. Це перешкоджає рівномірному покращенню структури за всім поперечним перерізом злитка, що кристалізується.

Одним із найскладніших завдань під час вібраційної обробки металевих розплавів є вибір місця накладення коливань. Дослідження [16] засвідчують, що кращі результати забезпечує вібраційний вплив на безперервнолитої матеріал у зоні вторинного охолодження. У такому випадку під час кристалізації злитка покращення мікроструктури сталевих виробів досягається завдяки скороченню зони стовпчастих кристалів і руйнуванню межі дендритів при їх дробленні. Це сприяє утворенню додаткових центрів кристалізації, усуненню ліквідації та загальному підвищенню якості заготовок.

Для максимального покращення якості мікроструктури матеріалу необхідно забезпечити можливість регулювання частоти вібраційних коливань у процесі твердіння. Це пов'язано з тим, що кристалізація металів і сплавів певного хімічного складу має індивідуальні особливості, на які безпосередньо впливає частота вібрацій. Невідповідність параметрів вібраційних коливань хімічному складу матеріалу унеможливує отримання металовиробу з необхідними фізико-механічними характеристиками.

Для удосконалення процесу виготовлення металовиробу за рахунок інтенсифікації тепловідведення під час кристалізації в машині безперервного лиття заготовок у роботі пропонується використовувати пневмомеханічний генератор [17, 18].

Мета статті

Полягає в удосконаленні технології виготовлення безперервнолитих заготовок із низьковуглецевої сталі шляхом застосування регульованого вібраційного впливу в зоні кристалізації. Дослідження спрямоване на підвищення експлуатаційних характеристик металовиробів і аналіз ефективності роботи пневмомеханічного обладнання для створення вібраційних коливань в машинах безперервної розливки.

Виклад основного матеріалу

Процес безперервної розливки сталі здійснювали за схемою, наведеною на рис. 1. Машина безперервної розливки складається з таких основних вузлів [1, 4]: розливного та проміжного ковшів, мідного кристалізатора-охолоджувача, тягнучих роликів і повітря-крапельної системи охолодження.

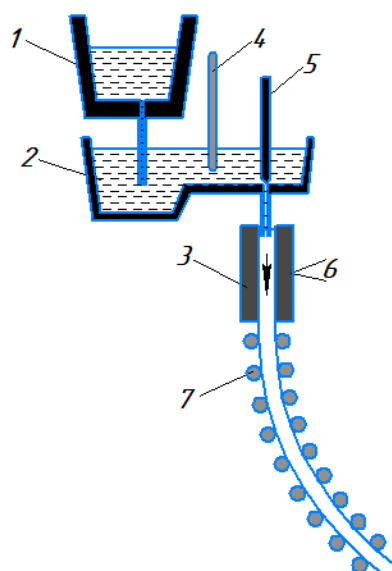


Рис. 1 – Схема машини безперервної розливки: 1 – розливний ківш; 2 – проміжний ківш; 3 – кристалізатор; 4 – нагрівний пристрій; 5 – стопор; 6 – зона первинного охолодження; 7 – тягнучі ролики

У процесі виготовлення сталевих виробів методом безперервної розливки рідку сталь, отриману в сталеплавильному агрегаті, подавали в розливний ківш. Останній встановлювали на стэнд і переміщували до машини безперервної розливки, де фіксували над проміжним ковшем у робочому положенні. Проміжний ківш забезпечував підтримку постійного рівня рідкого металу. Після досягнення робочого рівня розплаву в проміжному ковші відкривалися випускні отвори, що мають стакани-дозатори, крізь які рідкий сплав безперервно надходив до кристалізатора. У ньому відбувалося інтенсивне охолодження металу разом із наданням заготовці заданого профілю та формуванням її зовнішнього шару. Після виходу на роботу швидкість розливки та стабілізації рівня розплаву в кристалізаторі-охолоджувачі подальше регулювання рівня металу здійснювалось автоматично за допомогою стопора проміжного ковша.

Для зменшення сил тертя між стінками кристалізатора-охолоджувача та матеріалом, що кристалізується, подавали рідке мастило, що запобігало «зависанню» заготовки та утворенню на ній тріщин.

На виході з кристалізатора температура зливка, що кристалізується, зменшувалася до 1000°C. Контроль температурного режиму процесу кристалізації забезпечували за допомогою пірметра Flus IR-870.

Заготовку, що мала рідку серцевину й утворену тверду зовнішню кірку, витягали з кристалізатора-охолоджувача та спрямовували в зону вторинного охолодження, де матеріал заготовки остаточно тверднув за всім поперечним перерізом. Тепловідведення здійснювали охолоджувальним середовищем, що являло собою водоповітряну суміш. Температура кристалізації залежала від марки матеріалу, з якого виготовлявся виріб. Затверділа кірка, яка утворювалася в кристалізаторі-охолоджувачі, мала невелику товщину, що сприяло інтенсифікації відведення тепла від рідкої фази. Процес кристалізації відбувався зі швидкістю, що залежала від інтенсивності відведення теплоти охолоджувальним агентом [8, 9].

У дослідженнях використовувалася низьковуглецева сталь 20, хімічний склад якої наведено в табл. 1 [19].

З метою інтенсифікації процесу відведення тепла під час кристалізації металу та формування його однорідної мікроструктури в зоні вторинного охолодження було встановлено пневмомеханічний генератор. Він забезпечував створення вібраційних хвиль, спрямованих перпендикулярно до напрямку руху зливка, що виходив із машини безперервного лиття (рис. 2) [18, 19].

На рис. 2а показано горизонтальну проекцію вібраційного приладу, а на рис. 2б і 2в наведено його перерізи А-А та Б-Б відповідно.

Таблиця 1

Хімічний склад низьковуглецевої Сталі 20 [18]

Fe	C	Si	Mn	Ni	P	S	Cu	Cr
>98	0,17÷0,25	0,15÷0,35	0,30÷0,65	>0,3	>0,035	>0,03	>0,3	>0,3

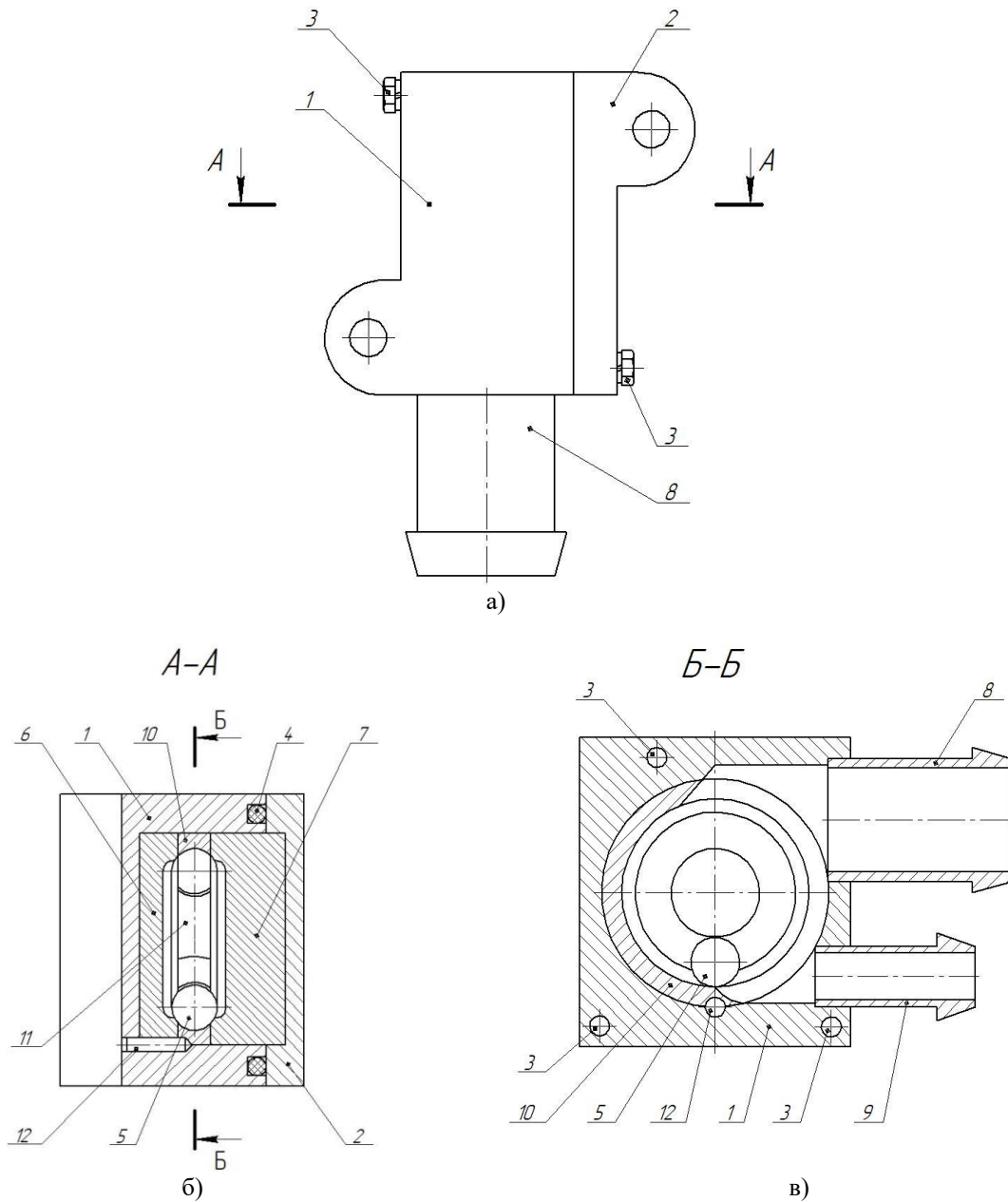


Рис. 2 – Пневмомеханічний генератор: а) горизонтальна проєкція; б) переріз А-А; в) переріз Б-Б; 1 – корпус; 2 – кришка; 3 – болтове з’єднання; 4 – ущільнення; 5 – кулька; 6 – ліва вкладка; 7 – права вкладка; 8 – вихлопний ніпель; 9 – напірний ніпель; 10 – середня вкладка; 11 – бігова доріжка; 12 – штифт

У корпус пневмомеханічного генератора вставлено вкладки, які фіксуються за допомогою штифта. Кришка кріпиться до корпусу за допомогою болтового з’єднання. Для роботи устаткування на вхід через напірний ніпель подається стиснене повітря під тиском P_1 . Такі дії приводять у рух кульку, яка починає

переміщатися по біговій доріжці. Через вихлопний ніпель під тиском P_2 повітря виходить із корпусу. Виникає динамічний дисбаланс маси, що спричиняє пружні коливання корпусу генератора. Таким чином пристрій створює гармонійні коливання з визначеною частотою, яка дорівнює частоті обертання кульки. Ці коливання

передаються оброблюваному матеріалу в зоні вторинного охолодження. Зміна тиску повітря на вході в генератор дозволяє регулювати швидкість руху кульки і, відповідно, частоту коливань пристрою.

Такі генератори вирізняються компактними габаритами (20×20×10 мм) і виготовляються з жароміцної сталі, що забезпечує їхню стабільну роботу в умовах високих температур. Відстань встановлення генератора варіювалася в межах від 0,2 до 0,35 м від торця кристалізатора.

Генератор працював під дією стисненого повітря, що подавалося на вхід. Під час тривалої експлуатації обладнання могло нагріватися, що негативно впливало на результати обробки. Для запобігання перегріву та підтримання стабільного температурного режиму на пристрій подавали змащувально-охолоджувальний засіб.

Дослідження підтвердило, що регулювання тиску на вході в генератор дозволяло точно керувати частотою коливань для оптимізації процесу затвердіння. Це забезпечувало усунення усадочних раковин, мінімізацію ліквідаційних процесів і запобігало формуванню грубозернистої структури, що підвищувало цілісність і однорідність заготовки.

Робота генератора була безперервною та узгодженою з технологічним циклом машини безперервного лиття. Результати впливу тиску на вході в генератор на частоту його коливань при обробці низьковуглецевої сталі марки Сталь 20 наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Результати дослідження впливу зміни тиску на вході в генератор на частоту його коливань при обробці сталі марки Сталь 20 [19]

Тиск повітря на вході P_1 , Па	Тиск повітря на виході P_2 , Па	Частота коливань f , Гц
80	65	55
90	68	53
100	70	50
150	95	58
170	100	60
250	140	68
300	160	71
320	172	72
400	205	77
500	260	83

Дослідженнями встановлено, що залежність показників міцності металовиробів від частоти вібраційних коливань мала параболічний характер. Раціональним визначено діапазон частот 50-75 Гц, який забезпечував максимальний приріст механічних характеристик. Застосування частот нижче 50 Гц не давало суттєвого ефекту: межа міцності зростала лише з 410 до 420 МПа. Водночас перевищення порогу 75 Гц призводило до поступового зниження міцності через виникнення надмірних внутрішніх напружень стиснення, що

спричиняло появу тріщин на етапі затвердіння заготовки. Оптимізація вібраційного режиму в межах 50–75 Гц дозволяла досягти найкращих результатів, підвищуючи межу міцності сталі до 10%.

Застосування вібраційного впливу в зоні вторинного охолодження машини безперервної розливки сталі забезпечувало сприятливі умови для затвердіння металу та дозволяло отримувати заготовки підвищеної якості. Крім того, генерування вібраційних хвиль у такий спосіб характеризувалося низькою енергомісткістю порівняно з іншими методами зовнішнього впливу.

Оптимальною визначено температуру зливка на виході з кристалізатора в межах 1100-1150°C. Такий температурний режим дозволяв сформувати металовиріб, який мав тверду зовнішню кірку та в'язку серцевину. За вищої температури утворена кристалічна оболонка була недостатньо міцною для утримання всередині внутрішньої фази. Натомість зниження температури (менше ніж 1100°C) призводило до інтенсивного зростання неоднорідних стовпчастих кристалів, що зумовлювало формування пористої та неякісної структури металовиробів.

Доцільним визнано встановлення генератора на відстані 0,3–0,35 м від торця кристалізатора. За меншої відстані (менше ніж 0,3 м) утворена зовнішня кірка була занадто тонкою та слабкою, що призводило до її руйнування під дією вібраційних навантажень. У випадку збільшення відстані встановлення генератора понад 0,35 м безперервнолитий зливочок уже мав повністю сформовану кристалічну мікроструктуру за всім поперечним перерізом, що унеможливило ефективне коригування будови металу шляхом вібраційного впливу.

Висновки

На підставі проведених досліджень удосконалено технологію виробництва безперервнолитих заготовок із низьковуглецевої сталі марки Сталь 20 шляхом застосування регульованого зовнішнього впливу на металевий розплав під час його затвердіння. Це забезпечило інтенсифікацію теплообмінних процесів у зоні кристалізації матеріалу та підвищення якості металовиробу завдяки досягненню високої щільності й однорідності матеріалу, що дозволило покращити його механічні характеристики. Такий вплив реалізовано за допомогою пневмомеханічного генератора, який забезпечував надійну вібраційну обробку матеріалу в процесі його затвердіння. Генерація вібраційних хвиль цим пристроєм і регулювання їхньої частоти потребує мінімальних енергетичних витрат порівняно з іншими типами генераторів.

Для забезпечення оптимальних умов кристалізації матеріалу пневмомеханічний пристрій було розташовано в зоні вторинного охолодження машини безперервного лиття заготовок на відстані 0,3–0,35 м від торця кристалізатора. Найкращі результати були

отримані при обробці металовиробів зі сталі 20 вібраційними коливаннями частотою 50–75 Гц, що забезпечувало приріст їх механічних властивостей до 10%.

У подальшому планується продовжити дослідження в умовах суміщення процесів лиття-прокатування для виготовлення широкого асортименту металовиробів.

Перелік використаних джерел

- [1] Смірнов О.М., Тімошенко С.М., Нарівський А.В. Відновлення та інноваційний розвиток виробництва сталі в Україні в контексті енергоефективності та європейського зеленого курсу. *Вісник Національної академії наук України*. 2023. № 4. С. 21-38. DOI: <https://doi.org/10.15407/vsn2023.04.021>.
- [2] Макуров С. Л., Ефременко Б. В. Метод дослідження процесу затвердіння неперервнолитої заготовки в кристалізаторі МНЛЗ. *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. 2015. № 30. Т.1. С. 74–80.
- [3] Воденнікова О. С., Воденнікова Л. В. Сучасний стан та проблеми безперервної розливки сталі в Україні. *Металургія та енергозбереження як основа сучасної промисловості*: матеріали XXII науково-технічної конференції студентів, магістрантів, аспірантів і викладачів ЗДІА, м. Запоріжжя, 23-27 жовтня 2017 р. Запоріжжя: ЗДІА, 2017. Том 1. С. 11.
- [4] Проектування ливарно-прокатних цехів: навч. посіб. / В. А. Чубенко та ін. Кривий Ріг: КНУ, 2025. 318 с.
- [5] Сталь України: відновлення та інновації: монографія / Смірнов О.М та ін. Київ: НВП «Видавництво «Наукова думка» НАН України», 2023. 268 с.
- [6] Деякі особливості розливання сортової заготовки відкритим та закритим струменем / О. М. Смірнов та ін. *Метал та лиття України*. 2023. Т. 2, № 31. С. 34-41. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.02.034>.
- [7] Могилатенко В. Г. Візуалізація твердіння лиття під впливом вібрації. *Теорія і практика металургії*. 2019. № 4. С. 31-37. DOI: <https://doi.org/10.34185/tpm.4.2019.05>.
- [8] Вплив технологічних параметрів розливання і кристалізації сталі на якісні показники безперервнолитої заготовки / Е. В. Парусов та ін. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2016. № 2. С. 8-16.
- [9] Вплив вібрації на формування безперервнолитої блюмінгової заготовки / Нурадінов А. С., Ельдарханов А. С., Ноговіцин О. В., Таранов Є. Д. *Металознавство та обробка металів*. Київ, 2013. Вип. 3. С. 15-23.
- [10] Матеріалознавство: навчальний посібник / Бузило В. І., Сердюк В. П., Яворський А. В., Гайдай О. А. Дніпро: НТУ ДП, 2021. 243 с.
- [11] Дослідження впливу внутрішнього діаметра та глибини розташування зануреного стакану у кристалізаторі радіальної сортової МБЛЗ 15 / О. П. Верзілов та ін. *Процеси лиття*. 2020. Вип 140, № 2. С. 15–21. DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2020.02.015>.
- [12] Research Thermal Fields in the Crystallization Process of Steel Cast Parts / R. Liutyi et al. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022. Article 7331866. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/7331866>.
- [13] Liao Q., Ge P., Lu G. Simulation study on the investment casting process of a low-cost titanium alloy gearbox based on ProCAST. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022. Vol. 3. Pp. 3-13. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/4484762>.
- [14] Micro-macro modeling of thermal evolution during solidification of binary equiaxed alloys with experimental verification / Egole K. P., Mgbemere G. E., Sobamowo G. M., Laval G. I. *Results in Engineering*. 2022. № 14. Article 100444. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100444>.
- [15] Зубко А. А., Койфман О. О. Застосування математичної моделі теплообміну для управління охолодженням злитку у кристалізаторі МБРЗ. *Наука та виробництво*. 2020. Вип. 23. С. 338-396. DOI: <https://doi.org/10.31498/2522-9990232020241215>.
- [16] Numerical simulation of temperature and fluid fields in the solidification process of ferritic stainless steel under vibration conditions / W. Wang et al. *Crystals*. 2019. № 9(3). Article 174. DOI: <https://doi.org/10.3390/cryst9030174>.
- [17] Спосіб виробництва безперервнолитої заготовки: пат. 55153 Україна: МПК В22ВD 11/00. № u201005520; заявл. 18.09.2009; опубл. 10.02.2010, Бюл. № 23.
- [18] Спосіб поліпшення мікроструктури безперервнолитої заготовки під час кристалізації низьковуглецевої сталі: пат. 156218 Україна: МПК В22В 11/00. № u202306102; заявл. 14.12.2023; опубл. 22.05.2024, Бюл. № 21.
- [19] Пристрій для поліпшення мікроструктури безперервно литих заготовок: пат. 160943 Україна: МПК (2025.01) В22D 11/00. № u202501554; заявл. 08.04.2025; опубл. 22.10.2025, Бюл. № 43. 6 с.

IMPROVEMENT OF THE PRODUCTION PROCESS OF METAL PRODUCTS IN CONTINUOUS CASTING MACHINES

- Chubenko V.A.** PhD (Engineering), associate professor, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3356-0285>, e-mail: chubenko_va@knu.edu.ua;
- Yarosh T.P.** PhD (Engineering), associate professor, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3455-9630>, e-mail: yarosh_tp@knu.edu.ua;
- Khinotska A.A.** senior lecturer, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0735-0583>, e-mail: khinotska_aa@knu.edu.ua

The article suggests a method for improving the microstructure of a continuously cast product by means of the application of controlled vibrational impact during solidification. The relevance of this study is driven by the increasing demand for structural materials with high strength, durability, and operational reliability - properties that are entirely determined by the internal structure of the metal product. The objective of this research is to improve the structural integrity and microstructural characteristics of continuously cast billet by applying a regulated external impact on the formation of the product's internal structure. To achieve this aim, the following tasks shall be pursued: to verify a method for improving the microstructure of a continuously cast low-carbon steel billet by introducing vibrational oscillations of a rational frequency into the solidification zone; to research the operation of a pneumomechanical generator that ensures a stable vibrational impact of a specified frequency on the structure formation process in a continuous casting machine. The study implements the improvement of the internal structure of the product through the application of controlled vibrational impact on solidification processes and develops a design of equipment for its practical implementation. To generate controlled vibrations directly during steel casting, pneumomechanical generators are proposed, which allow the oscillation frequency to be varied depending on the specific solidification conditions and the grade of the metal or alloy. Control of the frequency characteristics is achieved by varying the compressed air pressure at the generator inlet. It has been established that, for producing high-quality metal products from low-carbon steel grade St20, the rational frequency range lies between 50 and 75 Hz. The device is recommended to be installed at a distance of 0.3–0.35 m from continuous casting mold outlet. The proposed method ensures favorable conditions for metal formation and enables the production of high-quality billets. The scientific novelty of the work lies in the theoretical and experimental substantiation of a method for regulating the generator oscillation frequency by varying the air pressure. The equipment used to generate vibrational waves is characterized by structural simplicity and operational reliability. It can be easily integrated into existing continuous billet casting lines at steelmaking plants.

Keywords: solidification; vibrational impact; pneumomechanical generator; controlled oscillation frequency; secondary cooling zone.

References

- [1] O. M. Smirnov, S. M. Timoshenko, and A. V. Narivskiy, "Vidnovlennia ta innovatsiyni rozvytok vyrobnytstva stali v Ukraini v konteksti enerhoefektyvnosti ta yevropeiskoho zelenoho kursu" ["Renovation and innovative development of steel production in Ukraine in the context of energy efficiency and Green Deal"], *Visnyk Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy – Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine*, № 4, pp. 21-38, 2023. doi: [10.15407/visn2023.04.021](https://doi.org/10.15407/visn2023.04.021).
- [2] S. L. Makurov, B. V. Efremenko, "Metod yssledovaniya protsessa zatverdevaniya neprerivnolytoi zahotovky v krystallyzatore MNLZ" ["The method for research of solidification process of continuous casting blanks in the mold of CCM"], *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnogo Tekhnichnogo Universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskiy State Technical University. Section: Technical sciences*, № 30, vol. 1, pp. 74–80, 2015. (Rus.)
- [3] O. S. Vodennikova, and L. V. Vodennikova, "Suchasnyi stan ta problemy bezpererвної rozlyvky stali v Ukraini" ["Current status and problems of continuous steel casting in Ukraine"], in *Proc. of the XXII Sci.-Techn. Conf. of students, undergraduates, post-graduates and lectureks of ZSIA «Metallurgy and energy conservation as the basis of modern industry»*, Zaporizhzhia, Oct. 23-27, 2017, vol. 1, pp. 1. (Ukr.)
- [4] V. A. Chubenko, L. N. Saithareiev, T. P. Yarosh, I. E. Skidin, and A. A. Khinotska, *Proiektuvannia lyvarno-prokatnykh tsekhiv: navch. posib.* [Design of foundry and rolling mills: a training manual]. Kryvyi Rih, Ukraine: KNU Publ., 2025. (Ukr.)
- [5] O. M. Smirnov, S. M. Timoshenko, A. V. Narivskiy, S. V. Semirahin, V. V. Osypenko, and Yu. P. Skorobahatko, *Stal Ukrainy: vidnovlennia ta innovatsii: monohrafiia* [Steel of Ukraine: Restoration and Innovation: Monograph]. Kyiv, Ukraine: Scientific and Technological Enterprise «Publishing House «Scientific Thought» of the NAS of Ukraine», 2023. (Ukr.)
- [6] O. M. Smirnov et al., "Deiaki osoblyvosti rozlyvannia sortovoi zahotovky vidkrytym ta zakrytym strumenem" ["Some specifics of the billet open and

- submerged stream casting”], *Metal ta lyttia Ukrainy – Metal and Casting of Ukraine*, vol. 2, № 31, pp. 34–41, 2023. doi: [10.15407/steelcast2023.02.034](https://doi.org/10.15407/steelcast2023.02.034). (Ukr.)
- [7] V. G. Mogylatenko, “Vizualizatsiia tverdinnia lyttia pid vplyvom vibratsii” [“Visualization solidification casting under the influence of vibration”], *Teoriia i praktyka metalurhii – Theory and Practice of Metallurgy*, № 4, pp. 31–37, 2019. doi: [10.34185/tpm.4.2019.05](https://doi.org/10.34185/tpm.4.2019.05). (Ukr.)
- [8] E. V. Parusov, O. B. Sychkov, I. M. Chuiko, L. V. Sahura, A. I. Sivak, “Vplyv tekhnolohichnykh parametrov rozlyvannia i krystalizatsii stali na yakisni pokaznyky bezperervnolytoi zahotovky” [“The influence of technological parameters of steel casting and crystallization on the quality indicators of continuously cast billets”], *Naukovi pratsi Vinnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu – Scientific Works of Vinnytsia National Technical University*, № 2, pp. 8–16, 2016. (Ukr.)
- [9] A. S. Nuradinov, A. S. Eldarkhanov, O. V. Nohovitsyn, and Ye. D. Taranov, “Vplyv vibratsii na formuvannia bezperervnolytoi bliuminhovoi zahotovky” [“The influence of vibration on the formation of continuous-flow blanks”], *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv – Metal Science and Treatment of Metals*, vol. 3, pp. 15–23, 2013. (Ukr.)
- [10] V. I. Buzylko, V. P. Serdiuk, A. V. Yavorskyi, and O. A. Haidai, *Materialoznavstvo: navchalnyi posibnyk* [Materials Science: A Study Guide]. Dnipro, Ukraine: NTU DP Publ., 2021. (Ukr.)
- [11] O. P. Verzilov, A. Yu. Semenko, Yu. Yu. Kulish, L. I. Hoida, H. R. Verzilova, and D. S. Vasyliiev, “Doslidzhennia vplyvu vnutrishnoho diametra ta hlybyny roztashuvannia zanurenoho stakana u krystalizatori radialnoi sortovoi MBLZ 15” [“Investigation of the Influence of the Inner Diameter and the Depth of Placement of the Sen in the Mold of Radial Billet CCM”], *Protsesy lyttia – Casting processes*, vol. 140, № 2, pp. 15–21, 2020. doi: [10.15407/plit2020.02.015](https://doi.org/10.15407/plit2020.02.015). (Ukr.)
- [12] R. Liutyi, I. Petryk, V. Mogylatenko, V. Popovych, and H. Shatska, “Research Thermal Fields in the Crystallization Process of Steel Cast Parts,” *Advances in Materials Science and Engineering*, article 7331866, 2022. doi: [10.1155/2022/7331866](https://doi.org/10.1155/2022/7331866).
- [13] Q. Liao, P. Ge, and G. Lu, “Simulation study on the investment casting process of a low-cost titanium alloy gearbox based on ProCAST,” *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 3, pp. 3–13, 2022. doi: [10.1155/2022/4484762](https://doi.org/10.1155/2022/4484762).
- [14] K. P. Egole, G. E. Mgbemere, G. M. Sobamovo, and G. I. Laval, “Micro-macro modeling of thermal evolution during solidification of binary equiaxed alloys with experimental verification,” *Results in Engineering*, № 14, article 100444, 2022. doi: [10.1016/j.rineng.2022.100444](https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100444).
- [15] O. Koyfman, and A. Zubko, “Zastosuvannia matematychnoi modeli teploobminu dlia upravlinnia okholodzhenniam zlytku u krystalizatori MBRZ” [“Application of mathematical model of heat exchange for controlling the cooling of the ingot in the continuous-casting mold”], *Nauka ta vyrobnytstvo – Science and production*, vol. 23, pp. 338–396, 2020. doi: [10.31498/2522-9990232020241215](https://doi.org/10.31498/2522-9990232020241215). (Ukr.)
- [16] W. Wang, J. Chen, M. Li, A. Wang, and M. Su, “Numerical simulation of temperature and fluid fields in the solidification process of ferritic stainless steel under vibration conditions,” *Crystals*, № 9(3), article 174, 2019. doi: [10.3390/cryst9030174](https://doi.org/10.3390/cryst9030174).
- [17] I. D. Buha, “Sposib vyrobnytstva bezperervnolytoi zahotovky” [“Method of producing a continuously cast billet”], UA Patent 55153 Appl. u201005520, February 10, 2010. (Ukr.)
- [18] V. A. Chubenko, T. P. Yarosh, L. N. Saithareiev, I. E. Skidin, and A. A. Khinotska, “Sposib polipshennia mikrostruktury bezperervnolytykh zahotovok pid chas krystalizatsii nyzkovuhletsevoi stali” [“Method for improving the microstructure of continuously cast billets during crystallization of low-carbon steel”], UA Patent 156218 Appl. u202306102, May 02, 2024. (Ukr.)
- [19] V. A. Chubenko, A. A. Khinotska, and T. P. Yarosh, “Prystarii dlia polipshennia mikrostruktury bezperervno lytykh zahotovok” [“Device for improving the microstructure of continuously cast billets”], UA Patent 160943 Appl. u202501554, Oct. 22, 2025. (Ukr.)

Стаття надійшла 22.02.2026

Стаття прийнята 10.03.2026

Стаття опублікована 26.03.2026

Цитуйте цю статтю як: Чубенко В. А., Ярош Т. П., Хіноцька А. А. Удосконалення процесу виготовлення металевих виробів у машинах безперервного лиття заготовок. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2026. Вип. 53, том 1. С. 222–229. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.53.1.2026.359811>.