

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Гірничо-металургійний факультет
Кафедра металургії чорних металів і ливарного виробництва

Пояснювальна записка
до випускної атестаційної роботи магістра

зі спеціальності 136 – Металургія
ОП «Ливарне виробництво чорних та кольорових металів і сплавів»

на тему:

**Розробка та дослідження технології вібраційної
обробки розплавів з метою підвищення якості
ЛИТИХ ВИРОБІВ**

Виконав: студент групи ЛВ-23-м

Керівник випускної роботи

Нормоконтролер

Завідувач кафедри

Ващенко В.О.

Саїтгарєєв Л.Н.

Саїтгарєєв Л.Н.

Савельєв С.Г.

Кривий Ріг
2024 р.

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до магістерської роботи на тему «Розробка та дослідження технології вібраційної обробки розплавів з метою підвищення якості литих виробів» містить с., рис., табл., 27 джерел.

Робота присвячена вирішенню завдання підвищення якості литих виробів за рахунок розробки технології вібраційної обробки розплавів.

У першому розділі ми розглянемо основні елементи теорії кристалізації, а також явища, що мають місце в розплавах у разі прикладання до них динамічних впливів і способи їх введення в рідкий метал.

Другий розділ розповідає нам про матеріали, прилади, оснащення, конструкцію пневматичного кулькового вібратора та методику проведення досліджень фізико-механічних властивостей і структури металу.

Третій розділ це експериментальна частина роботи. Проводяться дослідження впливу технологічних факторів низькочастотної вібрації на фізико-механічні властивості та структуру металів і сплавів: на кристалізацію чавуну, алюмінію та силуміну. Оцінка якості металу дослідних виливків показала, що отримано істотне ущільнення чавуну (щільність до обробки в середньому $7,084 \text{ г/см}^3$, після обробки $7,210 \text{ г/см}^2$), підвищення міцності на 26 % і твердості на 21%.

Четвертий розділ це економічна частина у якій впровадження обґрунтування вибору технології вібраційної обробки розплавів з метою підвищення якості литих виробів та визначено собівартість технології вібраційної обробки на прикладі чавунного розплаву. Лиття з вібраційною обробкою має вищу продуктивність і коефіцієнт використання матеріалів, що знижує витрати. Зменшення дефектності до 3% дозволяє економити на виправленні браку. Незначне збільшення енерговитрат компенсується зниженням собівартості. Термін окупності вібраційної технології менший, що робить її економічно доцільною.

П'ятий розділ це оцінка стану умов праці і безпеки виробничих процесів після впровадження результатів дослідження.

ЧАВУН, СИЛУМІН, АЛЮМІНІЙ, РОЗПЛАВ, УЛЬТРАЗВУК, ВІБРАЦІЯ, ЧАСТОТА, ВИЛИВКИ, ЩІЛЬНІСТЬ, КРИСТАЛІЗАЦІЯ, ТЕХНОЛОГІЯ ВІБРАЦІЙНОГО ОБРОБЛЕННЯ.

ЗМІСТ

ВСТУП

1. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВІБРАЦІЇ НА РІДКІ ТА КРИСТАЛІЗОВАНІ МЕТАЛИ І СПЛАВИ

- 1.1. Методи і технологія дії пружних коливань на розплави металів
- 1.2. Елементи теорії твердіння і методи поліпшення структури і властивості чавуну і алюмінієвих сплавів
- 1.3. Кристалізація металів і сплавів під дією вібрації різних частот
- 1.4. Висновки, мета і завдання дослідження

2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

- 2.1. Обґрунтування вибору матеріалів і загальні особливості проведення експерименту
- 2.2. Експериментальні установки, оснащення і пристосування
- 2.3. Дослідження фізико-механічних властивостей і структури металу

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

- 3.1 Дослідження впливу технологічних факторів низькочастотної вібрації на фізико-механічні властивості та структуру металів і сплавів
 - 3.1.1 Вплив вібрації на кристалізацію чавуну
 - 3.1.2 Вплив вібрації на кристалізацію алюмінію та силуміну
- 3.2 Дослідження впливу технологічних чинників і параметрів високочастотної вібрації на фізико-механічні властивості та структуру алюмінію і силуміну
- 3.3 Обговорення результатів експериментів
- 3.4 Випробування технології лиття чавуну в умовах вібраційної обробки розплаву
- 3.5 Дослідно – промислове випробування технології ультразвукової обробки силуміну АК7

Висновки до розділу

4. ЕКОНОМІКА ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВІБРАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ РОЗПЛАВІВ

- 4.1 Теоретичне обґрунтування вибору технології вібраційної обробки розплавів з метою підвищення якості литих виробів
- 4.2 Визначення собівартості технології вібраційної обробки на прикладі чавунного розплаву
- 4.3 Визначення техніко-економічних показників порівнювання технологій

Висновки до розділу

5. ОЦІНКА СТАНУ УМОВ ПРАЦІ І БЕЗПЕКИ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

ПІСЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ВСТУП

У ливарному виробництві підвищення ефективності та якості продукції пов'язане з отриманням оптимальних показників за структурою, механічними та іншими службовими властивостями виливків, які забезпечують підвищення працездатності та експлуатаційної надійності деталей і машин. Водночас прогрес у розвитку техніки вимагає отримання виробів з металу, що мають високі технологічні та фізико-механічні властивості.

Одним зі шляхів розв'язання цього завдання є вдосконалення технології ливарних процесів, зокрема, застосування фізичних методів впливу на структуру і властивості металів і сплавів. Вібраційна обробка є перспективним способом управління процесом кристалізації з метою отримання виливків із заданими технологічними властивостями.

Нині знання в галузі обробки металу вібрацією різних частот певною мірою обмежені і не дають змоги досить ефективно і технологічно просто застосовувати її в ливарному виробництві. Різні не тільки методи проведення досліджень і обладнання, на якому вони проводяться. Нині не створено єдиної методики застосування пружних коливань. Крім того, відсутність потужних засобів впливу на великі обсяги металу не дає змоги широко використовувати методи вібраційної обробки.

У практиці знайшли застосування установки з ультразвукового і низькочастотного впливу на розплави, більша частина яких використовується для обробки легкоплавких металів і сплавів, зокрема для алюмінієво-крем'янистих. Водночас питання про обробку вібрацією гами кольорових сплавів вивчено ще недостатньо.

Важко пояснити наявність буквально поодиноких відомостей щодо вібраційної обробки чавуну, тоді як частка чавунних виливків становить понад 75% загального випуску литва в країні.

Метою роботи стали розробка і дослідження технології віброобробки різними частотами металів і сплавів, різних за питомою вагою, підвищення ефекту від впливу пружними коливаннями завдяки створенню вібраторів підвищеної потужності та, в остаточному підсумку, підвищення якості виливків із кольорових і чорних металів.

1. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ВІБРАЦІЇ НА РІДКІ ТА КРИСТАЛІЗОВАНІ МЕТАЛИ І СПЛАВИ

Авторами роботи [1] запропоновано розбивку режимів динамічної обробки на три групи за величиною застосовуваних частот і амплітуд: частота 1,5-3 Гц і амплітуда до 100 мм (струшування); частота від 3 до 8000 Гц і амплітуда 0,01-5 мм (механічна вібрація); частота понад 15000 Гц (ультразвук). Така розбивка не є достатньо точною, проте до деякої міри виправдовується технологічними міркуваннями.

Для об'єктивної оцінки наукових даних щодо вібраційного впливу на метали необхідно розглянути основні елементи теорії кристалізації, а також явища, що мають місце в розплавах у разі прикладання до них динамічних впливів і способи їх введення в рідкий метал.

1.1. Методи і технологія впливу коливань на розплави металів

Вібраційна обробка рідкого металу може бути ефективною тільки в тому разі, якщо передається достатньо енергії для здійснення його структурних перетворень. Для виконання цієї умови необхідні потужні вібратори й ультразвукові генератори та досконалі методи підведення енергії до розплаву. Під час передачі енергії коливань високої та низької частоти розплаву існують певні відмінності, які зумовлені специфікою високочастотних і низькочастотних коливань.

Вплив коливаннями ультразвукової частоти здійснюється, як правило, введенням безпосередньо в розплав концентратора коливань, дотримуючись умови, щоб форма або кристалізатор не входили в коливальну систему. Безпосереднє введення ультразвуку в розплав може здійснюватися різними способами. Дослідники [2, 3] вводили ультразвук зверху у виливницю, інші вважали за краще навпаки, в дно виливниці. Найперспективнішим способом введення ультразвуку, на думку авторів багатьох робіт, є обробка розплаву в проміжному об'ємі, наприклад, у водоохолоджуваній лійці або жолобі. Кожен із цих способів не позбавлений

певних недоліків. Так, при введенні ультразвуку зверху подрібнення зерна відбувається нерівномірно по висоті злитка, часті випадки наморожування металу на хвилевід.

При введенні коливань знизу прискорюється теплообмін і створюються хороші умови для об'ємної кристалізації, проте верхня частина злитка обробляється слабкіше, а в разі приварювання злитка до випромінювача енергія коливань використовується неефективно.

Введення коливань через проміжний об'єм можна розглядати як окремих варіант обробки розплаву в потоці. Цей спосіб дає змогу обробляти весь розплав до початку кристалізації, з подальшим природним

охладженням у формі.

Крім перерахованих варіантів введення пружних коливань у розплав знаходить застосування спосіб введення хвилеводу в лунку рідкого металу під час безперервного лиття.

Для способів, заснованих на введенні хвилеводу в розплав, характерний один істотний недолік - мала стійкість хвилеводів. Нині не створено універсальних за стійкістю хвилеводів, які могли б бути застосовані для обробки різних металів і сплавів.

Способи низькочастотної обробки у відомому сенсі більш доступні для їх застосування у виробничих умовах. Деякі з них практично ідентичні тим, що застосовують під час ультразвукової обробки. Так, одні дослідники занурювали в розшив вабруючий ступінь, а інші, обробляючи рідкий метал через вібруючі заливальні пристрої. У деяких роботах застосовували спосіб вібрації виливниці, який виявився вельми трудомістким і енергетично не вигідним, тому що доводилося накладати вібрацію, крім виливниці, і на масивні деталі вібростолів. Є відомості про застосування зворотно-поступального кругового переміщення в горизонтальній площині виливниці з металом, що твердне.

У Німеччині та Франції дослідники обробляють вібрацією не форму з металом, а вводять пружні коливання через хвилевід безпосередньо в серцевину рідкого металу у вигляді високочастотних імпульсів. Частота і потужність імпульсів такі, що вони протидіють процесу транскристалізації.

Автори роботи [6] здійснили вібраційний вплив на метал одночасно від трьох джерел коливань з різною частотою й амплітудою. Щоб уникнути втрат енергії, вібрацію форми замінювали введенням коливань у порожнину форми і струмки за допомогою вібронаконечників. Останній спосіб, незважаючи на отримані позитивні результати, вимагає роботи з кожною формою окремо, що робить його застосування в масовому виробництві скрутним. Струшування і вібрація масивних виливниць і кокілів дає можливість обробляти великі маси металу, проте застосування його для обробки фасонних виливків, одержуваних у піщаних формах, обмежується їх недостатньою міцністю.

Більшість дослідників намагаються застосовувати для розв'язання проблем ливарного виробництва, як правило, електричні та механічні вібробуджувачі. Одним із перспективних напрямів у дослідженнях є створення компактних і водночас досить потужних вібраційних пристроїв, здатних у широкому діапазоні змінювати технологічні характеристики та таких, що не потребують великих енергетичних витрат.

1.2. Елементи теорії затвердіння та методи поліпшення структури і властивостей чавуну та алюмінієвих сплавів

Нині досить широко і глибоко розроблено загальні питання теорії лінійних і нелінійних коливань, а також закони поширення пружних хвиль

у різних середовищах. Тому немає необхідності детально зупинятися на описі класичних закономірностей. Розглянемо стан питання про застосування вібраційних впливів на метали і сплави, що кристалізуються. В оглядовій статті Г.І. Погодіна-Алексєєва і В.М. Гаврилова [1] викладено історію застосування вібраційних впливів у металургії та ливарному виробництві з часу Д.К. Чернова до середини 60-х років минулого століття. Багато вчених зробили істотний внесок у дослідження і застосування вібрації в ливарному виробництві для підвищення службових властивостей і поліпшення якості виливків.

Спочатку Д.К. Чернов, а потім В.В. Лермонтов і В.І. Тижнов розпочали практичну реалізацію застосування методу динамічної обробки сталевих злитків. Спочатку зусилля дослідників були спрямовані на здійснення струшування виливниці з металом, згодом струшування стало замінюватися механічною вібрацією, а потім ультразвуком. Останнім часом, з появою досить потужних джерел коливань з'явилася можливість детальнішого вивчення закономірностей впливу вібрації на рідкі розплави та розплави, що кристалізуються, з метою управління структурою і властивостями литих металів і сплавів.

У працях Д.К. Чернова [6] кристалізація розглядається як процес виникнення і зростання в рідині зародків твердої фази. Розвиток теорії кристалізації наближає час, коли вибір параметрів технологічного процесу з'явиться однозначною функцією фізичних і фізико-хімічних параметрів сплаву і технічних вимог, які висуваються до виливки. Наразі завдання зводиться до того, щоб з позицій усталених положень теорії кристалізації пояснити явища, що відбуваються в металах в умовах вібраційного впливу.

Процес кристалізації починається з моменту виникнення в рідкому металі центрів кристалізації. Кількість зерен твердої фази залежить від параметрів кристалізації та виражається формулою

$$Z = a n^{3/2} u^{-3/2} v_0$$

де a - коефіцієнт пропорційності; n - кількість центрів кристалізації; u - лінійна швидкість росту кристалів; v_0 - початковий об'єм рідкої фази.

З виразу видно, що чим більшою є швидкість зародження центрів кристалізації і чим меншою є швидкість їхнього зростання, тим дрібнішими виходять зерна.

Численні дослідження показують, що вирішальний вплив на процес кристалізації чинять сторонні центри кристалізації у вигляді продуктів розкислення і чужорідних включень, які завжди є в рідкому металі. Поверхня затравок повинна

задовольняти принципу структурної та розмірної відповідності по відношенню до решітки основи сплаву.

Число центрів кристалізації, які виникають за одиницю часу в одиниці об'єму рідини, виражається таким чином:

$$n = C * \exp\left(-\frac{\Delta A k}{kT} - \frac{U}{kT}\right)$$

де C - коефіцієнт пропорційності; A_k - робота утворення зародка критичного розміру; U - енергія активації, необхідна для переходу атома з рідкої фази в тверду; k - постійна Больцмана; T - абсолютна температура.

З цього виразу видно, що зменшення роботи утворення зародка і зниження енергії активації призводить до збільшення швидкості зародження центрів кристалізації і, тим самим, сприяє утворенню більш дрібної структури.

Існує гіпотеза про зменшення роботи утворення зародка кристалізації та його критичних розмірів у полі пружних коливань. Її автори вважають, що під час впливу вібрації створюються сприятливі умови для мимовільного зародження центрів кристалізації, а також розвитку інтенсивного і рівномірного за об'ємом переохолодження розплаву, в результаті якого відбувається об'ємна кристалізація.

Відомо, що робота утворення зародка може бути записана у вигляді :

$$A = B\sigma^3 \Delta T^{-2}$$

де B - величина, що залежить від властивостей речовини, яка кристалізується; σ - питома поверхнева енергія; ΔT - переохолодження розплаву.

Аналіз наведеної залежності показує, що зменшення поверхневого натягу призведе до зменшення роботи утворення зародка.

Під час заливання металу у форму біля її стінок утворюється велика кількість центрів кристалізації завдяки великому ступеню переохолодження. У зовнішньому шарі виливки починає формуватися зона дрібних, рівноосних кристалів. Слідом за

формуванням першої зони виникає зона стовпчастих кристалів, які витягуються в напрямку руху фронту кристалізації. Причинами зростання зони стовпчастих кристалів можуть бути: великий градієнт температур у напрямку, зворотному до напрямку теплового потоку; безпосередня близькість передніх кінців кристалів до маткової рідкої фази; зростання кристалів у глиб розплаву, який не містить кристалів, збільшення яких відбувалося б одночасно з їхнім зростанням. Зона стовпчастих кристалів буде тим меншою, чим інтенсивнішим буде перемішування розплаву, наприклад, за допомогою вібрації, однак це відбуватиметься тільки в тому разі, якщо вібруючий розплав руйнуватиме фронт кристалів, що зростають, тобто якщо режим вібрації (частота, амплітуда, потужність) буде узгоджений із міцністю цього сплаву за температури поблизу солідуса.

Останньою формується зона рівновісних кристалів у центрі злитка, причиною утворення яких є переохолодження, що стало достатнім для гетерогенного зародження значної кількості кристалів перед просувним фронтом твердої фази.

Злитки, в структурі яких є зони стовпчастих кристалів, як правило, бувають неоднорідні, з центральною частиною, збагаченою різними домішками. Така структура дуже небажана і шкідлива для більшості експлуатаційних властивостей виробів. З цього погляду рівновісна структура в переважній більшості випадків є найприйнятнішою, оскільки сприяє утворенню макроскопічно ізотропного й однорідного за хімічним складом матеріалу.

Впливаючи пружними коливаннями на такі параметри, як перемішування і дифузія, швидкість кристалізації, градієнт температур і ступінь переохолодження перед фронтом кристалізації, можна отримати бажану рівноосну і дрібнозернисту структуру. Обробка розплаву вібрацією якраз і дає можливість ефективно впливати на ці параметри.

Існує думка, що під час впливу вібрації високої частоти та інтенсивності (що перевищує $1,0 \text{ Вт/см}^2$) на розплави металів виникає таке явище, як кавітація, що полягає в утворенні в рідині найдрібніших розривів або порожнин із подальшим їхнім закриттям і пульсацією. Ці розриви виникають під дією розтягувальних напружень, створюваних звуковою хвилею під час фази розрядження. У період

захлопування кавітаційних порожнин виникає ударна хвиля, здатна зруйнувати тверді частинки, що знаходяться в рідині. Багато дослідників відзначають, що за відсутності кавітації структурні зміни в оброблених злитках були незначні, а макрозерно подрібнювалося лише в донній частині злитка. Автори робіт [25] зафіксували помітне подрібнення структури в разі виникнення в розплаві кавітації, причому кавітація сильною мірою сприяє цьому подрібненню.

Вплив кавітації проявляється у вигляді поліпшення акустичного контакту між випромінювачем і розплавом, диспергування зростаючих кристалів, зміни параметрів кристалізації. У роботах [26] встановлено значно більше подрібнення структури в присутності домішки за тієї ж потужності вібраційних впливів. Автори цих робіт зазначають, що введення домішок в оброблюваний розплав призвело до зниження порогової потужності і що ефект обробки в цьому випадку виразився в ефекті активації цих домішок. Аналізуючи можливі причини впливу кавітації на швидкість зародження центрів кристалізації, О.В.Абрамов [2] висунув такі припущення.

Під час напівперіоду розтягування відбувається різке збільшення об'єму кавітаційної бульбашки. Випаровування і розширення призводять до зниження температури розплаву на поверхні бульбашки, що може призвести до утворення зародка. Під час стиснення кристали, що утворюються, мають відірватися від поверхні бульбашки внаслідок різниці швидкостей руху твердої та рідкої фаз, а ударна хвиля, що виникає під час закривання бульбашки, сприятиме виносу зародка в об'єм розплаву.

Тиск, що виникає в ударній хвилі під час захлопування кавітаційної бульбашки, може сприяти підвищенню температури плавлення. Підвищення температури плавлення в переохоложеному розплаві навіть

на кілька градусів може призвести до істотного збільшення числа центрів кристалізації.

Значний інтерес для дослідника становить вивчення механізму кристалізації такого сплаву як чавун.

Графітизація чавуну (як окремий випадок кристалізації) є, мабуть, дифузійним процесом, інакше важко уявити, як атоми вуглецю в розчині або

цементиті збираються і об'єднуються в окремі включення графіту. Роль зародків під час графітизації відіграє сам вуглець, утворенню якого сприяють різні неметалеві включення, зокрема, оксиди кремнію.

Зменшення кількості графіту, особливо пластинчастого, підвищує модуль нормальної пружності чавуну і сприяє зростанню його характеристик міцності. Так само діє заміна пластинчастої форми графіту на компактну або кулясту. У сірому чавуні модуль пружності залежить також від розмірів графітових включень, причому цей вплив перевищує навіть роль кількості графіту. Вплив на структуру матриці незначний. Водночас вплив включень графіту практично на всі властивості чавуну великий. Впливаючи на металеву основу металу, графітові включення чинять сильний вплив на характеристики міцності чавуну, причому цей вплив тим значніший, чим більше включень графіту і більші їхні розміри.

Літературні джерела повідомляють, що подрібнення пластинчастого графіту веде до підвищення не тільки міцності, а й пластичності сірого чавуну.

Однак, не всілякими зовнішніми впливами можна вплинути на форму і кількість графітових включень. Так, під час термічної обробки змінюється тільки структура основної металевої матриці чавуну (ферито-перлітна), форма графітових включень при цьому залишається незмінною. Застосування таких модифікаторів, як феросиліцій і силікокальцій, впливає, в основному, тільки на ступінь графітизації, графіт при цьому зберігає пластинчасту форму.

Велике значення подрібненню пластинчастої форми графіту надають під час виготовлення виливків, що працюють у контакті з окисними розплавами, зокрема скляної маси при температурі 1273-1473 К.

Під впливом розплавленого скла відбувається ерозійне руйнування поверхні чавунних деталей, причому тріщини виникають, як правило, уздовж графітових включень, а швидкість ерозії залежить в основному від форми і величини графітових включень. Скло маса містить оксиди лужних металів, які під час нагрівання вище 973 К починають випаровуватися і конденсуватися на робочій поверхні, негативно впливаючи на властивості матеріалу склоформ.

Для підвищення експлуатаційних властивостей чавунних склоформ застосовують легування сірого чавуну молібденом (0,4 %) і алюмінієм (0,5 %), замінюють дешевий сірий чавун СЧ20 ковким чавуном КЧ35-10. Крім цього, розроблено низку способів для відновлення деталей склоформ, які полягають у наплавленні газополум'яним або електродуговим методом

нікелевих сплавів на пошкоджені ділянки склоформ.

Застосування досить дорогих і трудомістких способів поліпшення структури, механічних і експлуатаційних властивостей деталей із сірого чавуну робить нагальними й актуальними дослідження щодо поліпшення якості чавуну за допомогою методу вібраційної обробки.

Застосування в промисловості таких вторинних алюмінієвих сплавів, як АК7, АК9, АК5М2 та ін., є економічно вигідним і доцільним. Однак, вміст у цих сплавах домішок заліза ставить перед дослідниками завдання підвищення їхньої якості та експлуатаційної надійності. Крім традиційних методів рафінування і модифікування силумінів, нині розробляють і застосовують способи компенсації негативного впливу домішок заліза на механічні властивості силумінів. Зокрема, для найбільшого подрібнення залізовмісних фаз застосовують легування розплаву марганцем, хромом, молібденом і додаткову обробку елементами У1 групи: сіркою, селеном і телуrom. Науковці проводили також досліди з комплексного модифікування розплаву стронцієм (0,05 %) і сіркою (0,05 %), що дали позитивні результати. Однак, високі механічні властивості розплавів при цьому зберігаються тільки протягом 30-45 хв.

Механічні властивості вторинних силумінів, рафінованих гексахлоретаном, практично не поліпшуються через схильність сплавів до інтенсивного повторного насичення газами, а їхня корозійна стійкість знижується. Причиною цього є наявність у розплаві дисперсних бульбашок пароподібних тетрахлоретилену і хлориду алюмінію, що залишилися в розплаві продуктів рафінування. Для компенсації цього шкідливого явища розроблено метод дехлорування розплавів, рафінованих гексахлоретаном, який полягає у позапічній обробці розплаву рідким флюсом під час переливів.

Як бачимо, поліпшення властивостей вторинних силумінів досягається шляхом модифікування, повторного рафінування і легування, часом дорогими елементами. Досвід обробки вібрацією розплавів алюмінієвих сплавів дає змогу сподіватися на те, що застосування ультразвукової обробки вторинних силумінів істотно поліпшить їхню структуру і властивості, дасть можливість їхнього використання для отримання виливків відповідального призначення.

1.3 Кристалізація металів і сплавів під дією вібрації різних частот

Щодо ультразвукової обробки металів опубліковано значну кількість робіт, у яких викладено результати практичного застосування ультразвукових коливань для ефективного поліпшення якості металу. Більшість отриманих результатів, опублікованих у періодичній літературі, являє собою інформацію про окремі питання щодо механізму впливу ультразвуку і технології процесу ультразвукової обробки. У монографії [3] розглянуто теоретичні та практичні положення в галузі ультразвукової обробки.

Діапазон застосування ультразвуку навіть в одній такій вузькій галузі, як металургія, досить широкий, і отримані результати, чи то дослідження на твердому, чи то на рідкому металі, розширюють наші знання в цій галузі. Так, на перший погляд здавалося б далекі від галузі металургії роботи з дегазації рідини в ультразвуковому полі допомогли з'ясувати механізм газовиділення в металах під час виникнення кавітації залежно від різних частот і акустичної потужності. У роботах [7,9] наведені експериментальні дані щодо впливу ультразвуку на дислокаційну структуру алюмінію і підкреслено, що обробка викликає підвищення щільності дефектів кристалічної будови. Відомості, отримані під час вивчення пластичної деформації під впливом ультразвуку, дали змогу з'ясувати механізм структурних процесів і змін у металах під час прискорення дифузії під дією ультразвуку. Під час вивчення кінетики затвердіння сплавів в ультразвуковому полі було виявлено істотну зміну форми кривих охолодження, пов'язану зі зміною внутрішньої структури металу, а автор роботи [8] припускає, що механізм впливу ультразвуку на процеси кристалізації металів має глибшу основу, пов'язану з атомно-молекулярною та електронною будовою речовини. Аналогічні припущення висловлюються дослідниками [8], які вивчали вплив ультразвуку на метали у твердому стані і, крім того, ними рекомендовано матеріали, придатні для виготовлення потужного ультразвукового обладнання: концентраторів, хвилеводів та інших елементів коливальних систем.

Наразі найповніше вивчено і теоретично обґрунтовано вплив ультразвуку на механічні властивості металів і сплавів, причому і тут наголошується, що, незважаючи на істотні структурні зміни, механічні властивості часом змінюються незначною мірою, що пов'язано з впливом технологічних чинників обробки, а можливо, і з недостатньою інтенсивністю обробки.

Вплив ультразвукового оброблення на дегазацію відзначається багатьма дослідниками, але є й такі роботи, в яких не виявлено такого впливу.

Поліпшення властивостей литого металу, як правило, пов'язують з подрібненням мікроструктури і макрозерна і пояснюють це такими явищами, що відбуваються під час кристалізації, як створення додаткових центрів кристалізації та активація домішок, які перебувають у металі. За даними автора [11], якщо потужність, що вводиться в метал, менша за порогову, характерну для кожного сплаву, то подрібнення структури не матиме місця; збільшення потужності, що вища за цю величину, веде до появи низки дефектів: неоднорідності макроструктури, газової пористості, поверхневих тріщин. Виявлене в роботі [10] різке зростання швидкості звуку в металах безпосередньо перед кристалізацією пов'язують з утворенням зародків кристалізації та збільшенням взаємодії між ними. Вплив порогової потужності та інтенсивності озвучування було виявлено й іншими дослідниками, причому виявлено збільшення змочуваності пластин твердого металу зі збільшенням інтенсивності обробки. Зменшення

крайового кута змочування відзначається і в роботі [12]. Ці дані є поодинокими і далеко не повними, до того ж є і протилежні думки з цього приводу, а саме, що поверхневий натяг і в'язкість не мають істотного впливу на оброблюваність сплавів ультразвуком.

Лише обмежена кількість дослідників пов'язують процеси, що відбуваються під час ультразвукової обробки, з дифузією і перемішуванням у рідкому стані. Мало зустрічається в літературі робіт, у яких повідомляється про ущільнення металу в процесі обробки ультразвуком, у той час як щільність є однією з важливих характеристик, що визначають механічні властивості виробів.

Впливу частоти й амплітуди ультразвукового впливу дослідники також приділяють мало уваги. У більшості випадків під час обробки застосовували частоти 18; 19,5 і 22 кГц з амплітудами 10, 18, 23 мкм. Можливо, обмеження амплітудно- частотних діапазонів залежить від конструкції ультразвукових генераторів і перетворювачів, які застосовуються, але безумовно, що це не дає можливості виявити оптимальні режими ультразвукової обробки.

Також не вдалося виявити в жодній роботі відомостей щодо впливу кратності обробки, а також тривалості ультразвукового впливу на властивості литого металу. Мало відомостей щодо обробки розплавів на жолобі або в потоці, хоча цей спосіб має низку переваг порівняно з введенням хвилеводу безпосередньо в розплавлений метал.

Дослідники явно обходять своєю увагою застосування методів ультразвукової обробки у виробництві чавунних виливків. Однак навіть поодинокі відомості показують ефективність такого впливу.

Багато дослідників, вивчаючи вплив вібрації на розплави чорних і кольорових металів, знаходять багато спільного в ефекті обробки і в його механізмі. Так, підвищення механічних властивостей під час обробки кольорових металів і сплавів зафіксовано в роботах [1,4], у сталях і в чавуні [13]. Низка дослідників пов'язують поліпшення механічних характеристик із дегазацією металу та зменшенням кількості неметалевих включень. Більшість авторів поліпшення властивостей металу пояснюють змінами, що відбуваються в структурі, а саме, подрібненням зерна і скороченням або повною ліквідацією зони стовпчастих кристалів. Однак є поодинокі відомості, що вібрація не дала позитивних результатів, хоча це пояснюється, мабуть, неправильно обраними режимами обробки.

Крім вищевказаних властивостей металу, низькочастотна вібрація призводить до скорочення об'єму усадочної раковини, збільшення товщини здорової скоринки в зливках і поліпшення ливарних властивостей. Але й тут думки не однозначні, зокрема, Н.Г. Касумзаде [15] спостерігав збільшення об'єму усадочної раковини на 40-80 % порівняно зі злитками без вібрації.

Вкрай обмежені відомості про вплив вібрації на таку важливу фізичну характеристику як густина металу, хоча від неї значною мірою

залежать механічні властивості сплавів. Дослідники [4] повідомляють про "ущільнення" і "підвищення густини" виливків, не наводячи цифрових значень, що не дає повного уявлення про міру впливу вібрації, в той час як є прямо протилежні відомості про збільшення пористості під час віброобробки.

Різні точки зору і на механізм впливу вібрації низьких частот на кристалізацію металів і сплавів. Нині досить докладно описано особливість пружних коливань впливати на утворення додаткових центрів кристалізації.

Японський дослідник Оно А [17] вважає перспективним застосування вібрації під час лиття злитків малих розмірів, оскільки основна частина енергії коливань поглинається формою. З його точки зору інтерес представляє модифікуюча дія вібрації внаслідок руйнування покривної плівки і полегшення зародження кристалів. Періодом найбільш ефективною дії вібрації А.Оно вважає початковий період затвердіння.

Вібрувати розплав протягом часу, необхідного для повного зникнення перегріву або до повного затвердіння виливки, пропонує Г.Ф.Баландін [18].

І.А. Лернишев [19] у своїй роботі показав, що неправильно вибраний режим вібрації може призвести до утворення дрібнозернистої структури і одночасно підвищити міжкристалітну пористість і в результаті погіршити механічні властивості виливки. Механічну вібрацію він розглядає як більш перспективний спосіб обробки сплавів у рідкому і затвердіваючому стані порівняно з ультразвуковою обробкою.

Автори наведених вище досліджень розглядають здебільшого загальну характеристику ефектів, що виникають під час вібраційної обробки металів. Всі

перераховані особливості певною мірою полегшують завдання оцінки впливу вібрації, але різноманітність застосовуваних в експериментах технологічних особливостей і режимів вібрації не дають можливість оцінити конкретний вплив того чи іншого фактора. Мається на увазі різноманітність не тільки режимів обробки (частоти, амплітуди, прискорення тощо), технологічних факторів обробки розплаву (температури металу, тривалості обробки, кратності обробки), а й номенклатури досліджуваних металів і сплавів. Практично ніде не повідомляється, чи перебувала система "метал - вібрувальний пристрій" у резонансі в період обробки, тобто чи збігалася частота примусової сили з власною частотою оброблюваної системи.

Крім того, маса оброблюваного розплаву і потужність вібраційних пристроїв також були різні в більшості проведених експериментів.

Ефективність впливу вібрації визначається інтенсивністю введених пружних коливань. І в цьому питанні думки дослідників суперечливі. Так автори роботи [16] стверджують, що для алюмінієво-кремнієвих сплавів зі збільшенням прискорення вібрації збільшується пористість. Вібруючи зливки з киплячою сталлю, В.М. Серветник [14] одержав найкращі

результати при прискоренні від 7,4 до 8,1 м/с² і дійшов висновку, що перевантаження не має перевищувати 9,8 м/с². А.А.Іванов [4] в експериментах із силуміном встановив оптимальні параметри вібрації з перевантаженням у 2,17g.

Питання визначення раціональних режимів обробки за інтенсивністю прикладених коливань також потребує подальшого поглибленого вивчення.

Аналіз даних за застосовуваними діапазонами частот і амплітуд дав змогу встановити, що для оброблення великих сталевих злитків або кокілів, як правило, застосовували струшування з частотою до 25 Гц і амплітудою від 1 до 10 мм, отримуючи при цьому позитивні результати.

Вібрацію легких сплавів на основі алюмінію проводили з частотами або від 3 до 30 Гц, або від 90 до 500 Гц, причому властивості міцності підвищували вже за частот від 3 до 20 Гц, а за частоти 500 Гц удалося ліквідувати брак із недоливів і холодних спаїв у виливках зі складним обрисом.

З наведених частотних діапазонів видно, що найменше вивчена область частот від 30 до 90 Гц. Вплив такої фізичної характеристики як частота пружних коливань на кристалізацію металів і сплавів дотепер не з'ясовано повністю. Більшість дослідників дотримується гіпотези, що частота є одним із визначальних параметрів у процесі обробки рідкого розплаву. Є і прямо протилежна думка про те, що механізм впливу вібрації незалежний від частоти в області від 20 до 20000 Гц. З цією думкою важко погодитися, оскільки частота є одним з основних параметрів для гармонійних коливань, якими є пружні коливання, а те, наскільки ефективно цей параметр проявляється в процесі впливу на рідкий метал, що кристалізуються, в кінцевому підсумку позначається на якості литих виробів.

Частота впливає і на ступінь відбудови вимушених коливань від власних частот оброблюваної системи. А цей показник, як відомо, визначає ККД передавання енергії від джерела коливань до системи, що коливається.

Інша картина спостерігається під час аналізу діапазону застосовуваних амплітуд, які іноді відіграють істотнішу роль у формуванні литої структури, ніж частота коливань. При вібраційній обробці низькими частотами дослідники застосовували амплітуду коливань у діапазоні від 0,1 до 4,5 мм. Відсутність даних щодо застосування обробки з амплітудами коливань менш як 0,1 мм під час низькочастотної вібрації, очевидно, пояснюється конструктивними особливостями застосовуваних вібраційних пристроїв, які виключають можливість створювати пружні коливання таких малих амплітуд, хоча, можливо, саме амплітуди менш як 0,1 мм і будуть найефективнішими під час обробки розплавів, що кристалізуються. У літературних джерелах інформація про оптимальні параметри вібрації, а також про способи їх вибору та розрахунку вкрай обмежена. Дослідники наводять різні аналітичні залежності між

параметрами пружних коливань. Так, у І.А. Лернишева та А.А. Романова [5] залежності частоти від амплітуди низькочастотної вібрації для сталі та чавуну схожі одна на іншу $f=5/(0.1A)^{-1/2}$ та $f=8.8/(0.1A)^{-1/2}$, а у Бузіашвілі Б.І. [20] істотно відрізняється $f=(10..20)/A$, хоча теж передбачається використовувати для обробки чавуну. У А.А.Іванова [4] аналітичне відношення для вібрації та ультразвуку має вигляд $F=7,5/(kA^{-1/2})$, де K - коефіцієнт, що має значення для низькочастотних і ультразвукових коливань, відповідно 1 і 3.

Важливу роль у процесі обробки рідкого металу вібрацією відіграє тривалість вібраційного впливу. Ця характеристика прямо пов'язана з методичними особливостями експериментів, що проводяться, тому і розбіг у часі обробки значний: від 1-2с до 30-60 хв. Вибір тривалості обробки визначається завданнями, які ставили перед собою дослідники, чи то дегазація металу, чи то отримання однорідного хімічного складу, чи то гранично можлива дрібнозерниста структура, чи то отримання спеціальних властивостей. Сильно перегріті розплави піддавали вібрації практично протягом усього періоду охолодження для його прискорення і вирівнювання температури по всьому об'єму металу. За необхідності поліпшити ливарні властивості, перед заливкою або в процесі її розплаву піддавали короткочасній обробці. З нечисленних відомостей з цього питання найчастіше застосовували режим обробки протягом 4-6 хв безпосередньо перед кристалізацією і в її процесі.

Практично не зустрічається відомостей про вплив вібрації на перегрітий метал, хоча це має безпосередній стосунок до практики лиття. Значний інтерес при цьому представляє те, якою мірою віброобробка нейтралізує шкідливі наслідки перегріву металів і сплавів перед заливкою.

У процесі ультразвукової та низькочастотної обробки металів і сплавів одночасно впливає велика кількість технологічних чинників, які в кінцевому рахунку визначають якість металу. Спроби оцінити вплив окремих параметрів не дають можливості з'ясувати повністю механізм обробки. У жодній роботі в цьому напрямі дослідники не застосували метод математичного планування експериментів, що дає змогу оптимізувати спільний вплив великої кількості технологічних чинників з метою відпрацювання найраціональніших режимів і умов вібраційного оброблення металів і сплавів.

Відсутні дані про застосування сучасних засобів, зокрема, електронної мікроскопії для вивчення тонкої структури металу з метою з'ясування ступеня змін, що відбуваються в металі під дією вібрації.

Судячи з того, що більшість виявлених робіт має більш ніж 10-річну давність, можна припустити про падіння інтересу дослідників до застосування низькочастотної вібрації для впливу на процес кристалізації.

Причиною цього може бути та обставина, що досі не створено потужні й економічні засоби вібраційного впливу, необхідні для обробки великих мас металу. Основним вузлом вібраційних агрегатів, що визначають ступінь їхньої досконалості, а часто і вартість, є віброзбудник

механічних коливань. Дослідники у своїх роботах застосовували, як правило, електричні або механічні вібратори промислового виконання. При цьому більша частина експериментаторів віддає перевагу електровібраторам, як таким, що мають найбільші діапазони амплітудно-частотних характеристик. Однак, в аналізованих роботах практично не ставилося завдання створення більш ефективних і більш економічних вібраційних пристроїв, очевидно, через їхній особливий прикладний характер.

Зовсім не вивчена можливість застосування безпечних у роботі пневматичних, зокрема, кулькових, вібраторів для обробки рідких металів і сплавів безпосередньо у формі. Цей тип вібраторів має ширший діапазон реалізованих частот і амплітуд, допускає просте регулювання режиму роботи.

У зв'язку зі зрослими вимогами до рівня розробленої техніки і технології все більшого значення набувають патентно-інформаційні дослідження. У результаті пошуку стало можливим виявити такі напрямки винахідницької діяльності у розв'язанні завдань, пов'язаних із низькочастотним і ультразвуковим впливом на властивості та структуру металів і сплавів у рідкому стані та в процесі кристалізації:

- подрібнення зерна в злитку і поліпшення його якості досягається введенням коливань безпосередньо в розплав або через виливницю, вібруванням розплаву в кокілях або виливницях за допомогою механічних вібраторів;

- підвищення механічних властивостей виливків здійснюють за рахунок введення ультразвукових коливань через хвилевід, спільної обробкою перемішуванням і вібрацією];

- поліпшення рафінування металу досягається використанням ультразвукової обробки в заливальному пристрої, вібрацією в резонансному режимі.

Викладені вище тенденції охоплюють процес поліпшення якості виливків завдяки застосуванню впливу пружних коливань на рідкий метал і метал, що кристалізується. Однак ці відомості стосуються або конструктивних особливостей застосовуваних установок, або режимів цієї обробки. Виявлені патенти та авторські свідоцтва, в основному, стосуються ультразвукової (високочастотної) обробки рідкого металу. Мало відомостей про комплексний підхід до вирішення вищевказаних проблем, тобто застосування одночасно декількох методів обробки, розширення діапазону параметрів обробки в поєднанні з уже відомими способами поліпшення якості злитка.

Основою для теоретичного аналізу ущільнення металу під час вібрації має стати математична модель процесу. Крім того, тільки за допомогою такої моделі може бути обраний раціональний режим ущільнення металу у формі. Стосовно до завдань ливарного виробництва,

математичне моделювання процесу ущільнення формувальної суміші вібрацією здійснив Г. Ф. Баландін [27], що дало йому можливість розраховувати параметри процесу, необхідні для отримання заданої щільності форми.

У літературі відсутні дані про спроби створити математичну модель за допомогою методів віброреології стосовно ущільнення металу, що твердне. Створення такої моделі є актуальним завданням, оскільки дає можливість керувати процесом формування вилівки в конкретних умовах ливарної технології.

Дослідники, як правило, не прагнули до комплексного вивчення коливань низьких і ультразвукових частот. Ставилися більш вузькі завдання вивчення і конкретного застосування вібрації для обробки тих чи інших металів і сплавів.

Ультразвук і низькочастотна вібрація - це коливання, які мають одну фізичну природу, але характеризуються різними поєднаннями параметрів (частоти, амплітуди, прискорення). Великий інтерес представляє спільне порівняння ступеня

та ефективності впливу вібрацій різних частот на будь-який метал або сплав, наприклад, алюміній і силумін.

Таке порівняння закономірне і виправдане не тільки з наукового, а й з практичного погляду, оскільки потрібно уточнити: коливання яких частот (високих або низьких) і за яких умов впливають більш ефективно на структуру і фізико-механічні властивості рідкого металу і металу, що кристалізується.

1.4 Висновки, мета та завдання дослідження

Аналіз літературних джерел дає змогу зазначити, що багато питань практичного застосування ультразвукової та низькочастотної вібрації не вирішені повністю і потребують не тільки теоретичного розроблення, експериментального уточнення, а й дослідно-промислової перевірки. Як стверджує більшість дослідників, пружні коливання позитивно впливають на структуру і властивості металів і сплавів, проте механізм цього явища вивчений недостатньо. У результаті застосування для проведення експериментів різних джерел коливань не виявлено залежностей між частотою та амплітудою коливань, не робилося спроб пов'язати ущільнення металу з впливом технологічних факторів. Відсутні універсальні теоретичні та практичні розрахунки оптимальних резонансних режимів обробки. Слабо вивчено вплив пружних коливань на рідкий метал у частотному діапазоні від 30 до 90 Гц і амплітуді менше 0,1 мм.

Дослідниками не проведено оптимізацію технологічних чинників вібраційної обробки з метою розроблення і створення оптимальної та економічної технології отримання якісних литих виробів. Практично не вивчено вплив низькочастотної вібрації в горизонтальній площині на

розплави і не встановлено оптимальну тривалість впливу.

Щодо ультразвукових методів обробки металів більшість дослідників не відходить від загальноприйнятих концепцій пояснення механізму впливу на рідкі метали. Застосування ультразвуку і вібрації ще не стало досить широким через різні чинники, здебільшого технологічного характеру, і відсутність ефективних

спеціальних вібротрибок. Під час аналізу літературних джерел привертає до себе увагу нечисленність відомостей про вплив ультразвуку і вібрації на таку важливу характеристику, як густина металу, про нейтралізацію шкідливого впливу різних домішок, про зміну властивостей металу під час багаторазової обробки.

Обробці металу в потоці приділено незаслужено мало уваги, незважаючи на деякі переваги її порівняно з іншими способами. Відсутність відомостей про оптимальні значення технологічних чинників вібраційного впливу на властивості, що визначають якість виливків, робить роботу з оптимізації віброобробки актуальною з огляду на позитивний досвід застосування методів математичного планування в різних галузях технічних наук.

Дослідники не приділяють належної уваги такому важливому засобу вивчення властивостей металу, як структура зламів після статичного руйнування, тоді як фрактограми є наочною характеристикою процесів, що відбуваються під час руйнування, за якими можна судити про наявність тих чи інших змін, які відбулися в тонкій структурі металу внаслідок вібраційного впливу.

Вивчення опублікованої патентної літератури дає змогу зробити висновок про те, що дослідження в цій галузі сконцентровані в напрямі створення способів і пристроїв для оброблення розплавів або ливарних форм з металом пружними коливаннями. Однак, у виявлених джерелах не робиться спроб створити універсальний вібраційний пристрій для обробки розплавів як чорних, так і кольорових металів у резонансному режимі, енергетично більш вигідному.

Підбиваючи підсумки літературного огляду, необхідно відзначити відсутність досвіду у створенні математичних моделей процесів, що відбуваються в рідкому металі та металі, що кристалізується під дією вібрації, що робить такі теоретичні розробки особливо важливими, тому що наразі під час конструювання різних вібраційних механізмів та виборі раціональних режимів оброблення використовують, в основному, тільки емпіричні дані.

Метою цієї роботи є розробка і дослідження технології вібраційного оброблення чавуну та алюмінієвих сплавів для підвищення якості та надійності литих виробів.

У роботі поставлено такі завдання:

– дослідити і розробити технологію ультразвукової обробки вторинних алюмінієвих сплавів для нейтралізації шкідливого впливу

домішок заліза під час отримання виливків відповідального призначення;

- розробити метод обробки сірого чавуну вібрацією низької частоти з метою зменшення розмірів і кількості графітових включень та заміни пластинчастої форми графіту на компактну, за рахунок чого істотно поліпшити фізико-механічні властивості виливків, що працюють в умовах ерозійного руйнування поверхні;

- дослідити ефективність впливу вібрації та ультразвуку на чавун і алюмінієві сплави та ступінь впливу амплітудно-частотних параметрів обробки на ефективність процесу;

- запропонувати конструкцію пневматичного кулькового вібробуджувача підвищеної потужності для ефективного оброблення виливків у піщаних і металевих формах. Дослідити та встановити оптимальні режими вібраційної обробки рідкого металу.

2. МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Обґрунтування вибору матеріалів і загальні особливості проведення експерименту

Як матеріал для досліджень використовували алюміній А99 (ГОСТ 11069-74), силуміни (ГОСТ 1583-73) і чавун марки СЧ20 (ГОСТ 1412-79).

Представляє істотний інтерес простежити вплив вібрації на різні за складом силуміни. З цією метою для вивчення було взято силумін, близький до евтектичного складу (Si - 11,3%, Ge - 0,4%), і широко-інтервальний вторинний алюмінієвий сплав АК7 (Si - 7,67%, Fe - 0,42%, Mg - 0,24%, Ci - 0,54%).

Вибір сірого чавуну марки СЧ20 (склад: C - 3,3-3,5 %, Si - 1,4-1,7 %, Mn - 0,6- 0,9 %, P - 0,2-0,4 %, S - 0,08-0,12 %) визначався переважно його широким розповсюдженням під час виробництва заготівельного литва, а також практичною необхідністю поліпшення його фізико-механічних і технологічних характеристик, можливістю виявлення найхарактерніших особливостей зміни його властивостей.

Крім того, ставили завдання порівняти ефективність впливу вібрації на сплави, що різко відрізняються один від одного за властивостями, питомою вагою, щільністю, кристалічною будовою.

Як модифікатор для чавуну застосовували феросиліцій ФС-75, а як легувальний елемент для алюмінію - ітрій у вигляді лігатури $Al-30\%Y$.

Для вирішення конкретних дослідницьких завдань у роботі було застосовано метод математичного планування експериментів (за Боксом-Вілсоном). Застосований метод дав змогу істотно скоротити обсяг металургійного експерименту, дав змогу оптимізувати спільний вплив найхарактерніших для цього процесу факторів.

Для складання рівнянь регресії параметрів оптимізації розраховували коефіцієнти регресії за формулою

$$B_i = (\sum X_{in} Y_n) / n$$

де X_{in} - знак у матриці планування i -го рядка (верхній рівень - "+", нижній рівень - "-"); Y_n - значення параметра під час реалізації досліду i -го рядка; n - кількість дослідів у матриці.

Перевірку статистичної значущості коефіцієнтів регресії та адекватності отриманих рівнянь проводили за стандартною методикою, описаною в роботах.

2.2. Експериментальні установки, оснащення та пристосування

Для проведення експериментів з обробки рідкого металу і металу, що кристалізується, низькочастотною вібрацією було застосовано вібростенд (рис. 2.1). Він складається з пневматичного кулькового вібратора І, який за

допомогою торсіона 2 кріпиться до чавунної плити 3. Тигель з металом 4 встановлюється над вібратором. Температура металу вимірюється за допомогою термопари 9 і фіксується цифровим вольтметром 10. Сигнали від електромагнітних датчиків 5 надходять на осцилограф 6, а також через електронний блок 7 на прилад віброскорості 8.

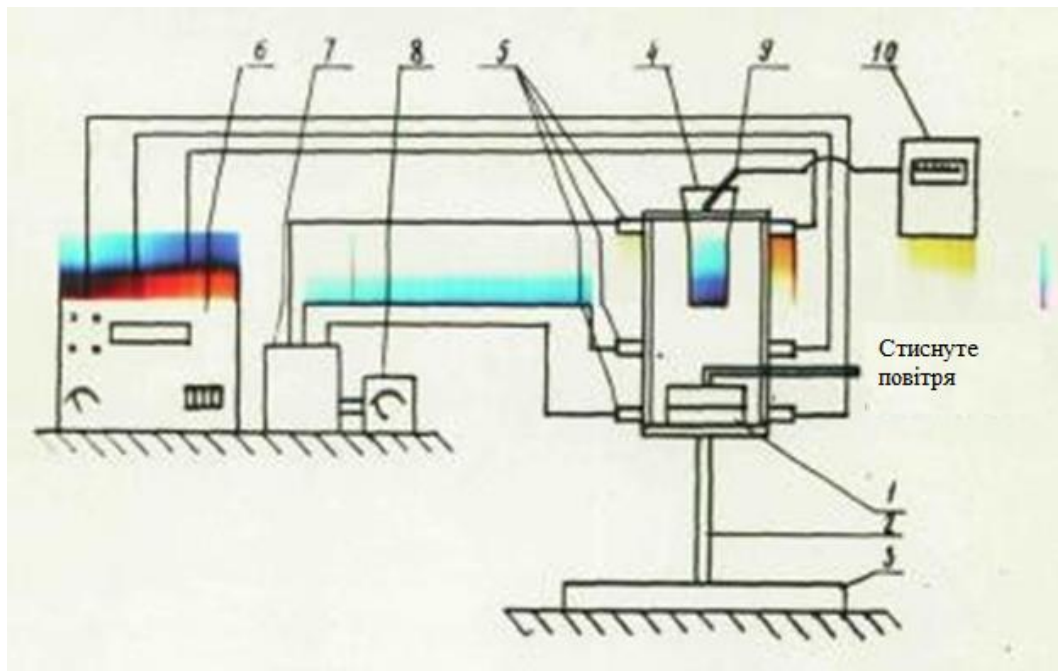


Рис. 2.1. Принципова схема (а) і зовнішній вигляд вібростенда (б) з обробки розплаву низькочастотними коливаннями:

1 - вібратор; 2 - торсіон; 3 - плита; 4 - тигель із металом; 5 - електромагнітні датчики; 6 - осцилограф; 7 - електронний блок; 8 - прилад визначення віброшвидкості.

Така конструкція вібростенда, на відміну від тих, що використовували раніше, дає змогу створювати коливання тигля в горизонтальній площині за прямолінійними, круговими та еліптичними траєкторіями, що надзвичайно важливо з погляду вивчення параметрів коливань на перебіг процесу кристалізації. Конструкція стенда виключає всілякі паразитні коливання, які можуть стати джерелом різних неточних оцінок результатів досліджень.

Приводом вібростенда є пневматичний кульковий вібратор І, спеціально розроблений для проведення досліджень. Конструкція вібратора (рис. 2.2) забезпечує рівномірну швидкість руху кульки без гальмувань і ударів, створює в робочій камері багатоточкове підведення потужних повітряних струменів і тим самим підвищує одиничну потужність вібратора, забезпечуючи високу надійність і довговічність роботи механізму.

Розподілена подача повітря досягається тим, що в кільцеву напрямну вставляються бічні диски з кільцевими канавками, які

утворюють разом із кільцевою напрямною замкнутий кільцевий канал круглого поперечного перерізу, по периметру якого виконані щілинні сопла, спрямовані під кутом $10-15^\circ$ до площини руху кульки. Розрахунково-експериментальним методом було встановлено, що кут нахилу щілинних сопел менше ніж 10° технічно важко виконати, а за кута більше ніж 15° зменшується складова струменя стисненого повітря, що діє в площині руху кульки, що спричиняє зниження його корисної енергії, отже, кут від 10 до 15° є найприйнятнішим для цього типу вібратора. На конструкцію вібратора отримано позитивне рішення про видачу авторського

свідоцтва. У роботі використано два типорозміри вібраторів, що відрізняються діаметром кільцевої напрямної (85 і 110 мм), розміром (масою) кульки ($12,6$ і $15,8$ мм) і максимально досяжною величиною збурювальної сили.),

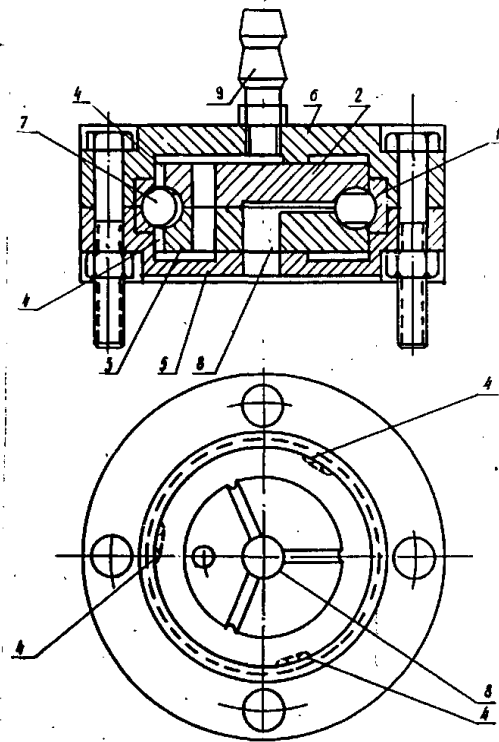


Рис. 2.2. Пневматичний кульковий вібратор:

I - кільцева напрямна; 2,3 - бічні вставні диски; 4 - сопла для подачі стисненого повітря; 5,6 - бічні кришки; 7 - кулька; 8 - отвір для виходу повітря; 9 - штуцер.

Як джерело стисненого повітря в лабораторних умовах застосовували компресор із витратою повітря 30 м³/год і робочим тиском до $0,4$ МПа. Під час роботи вібростенда у виробничих умовах

використовували заводську повітряну мережу з робочим тиском до 0,6 МПа. Витрату повітря як у лабораторних, так і в

заводських умовах регулювали за допомогою вентиля і контролювали за тарованим манометром, встановленим у місці входу стисненого повітря у вібратор. Як пружну систему вібростенда, що допускає коливання робочої частини в горизонтальній площині, було застосовано жорсткий сталевий торсіон 2. Застосовували чотири типи торсіонів різних діаметрів: 13, 16, 20 і 30 мм за довжини 250 і 500 мм. Пружна система прийнятої конструкції давала змогу завдяки зміні довжини та діаметра торсіона легко регулювати власну частоту коливань стенда, а отже, відкривала можливість налаштування системи на бажаний режим роботи (дорезонансний, резонансний і зарезонансний).

Рідкий чавун для експериментів брали зі скарбнички газової вагранки продуктивністю 5 т/год. Серії експериментів проводили на металі одного хімічного складу з метою забезпечення стабільних результатів.

Вібростенд встановлювали в безпосередній близькості від вагранки. Порцію металу (2,5 кг) з ручного чайникового ковша наливали в задалегідь підігрітий графіто-шамотний тигель, який встановлювали в спеціальний пристрій не стенді та подавали у вібратор стиснене повітря. Температуру металу в тиглі вимірювали за допомогою вольфрам-рінгєвої термопари 9 і цифрового вольтметра.

Параметри вібраційного впливу на оброблюваний розплав (частоту й амплітуду коливань) фіксували за допомогою електромагнітних датчиків типу МВ- 26В, установлених у різних частинах вібростенда 5 як у площині тигля з рідким металом, так і в площині горизонтальної осі вібратора. Число точок, у яких одночасно проводили заміри параметрів, дорівнювало 6.

Принцип дії датчиків описано в роботі [21]. Сигнали від трьох датчиків подавали на шлейфовий 12-ти канальний осцилограф 6. Отримана осцилограма давала змогу фіксувати характер коливань тигля, визначати частоту й амплітуду його коливань.

Сигнали від трьох інших аналогічних датчиків подавалися через електронний блок БЕ-І апаратури контролю вібрації на показувальний прилад 8 для вимірювання віброшвидкості. Роботу електронного блока і показання приладу періодично перевіряли повірочною апаратурою.

Установка для дослідження впливу високочастотних коливань на структуру та властивості металів і сплавів представлена на рис. 2.3. Для створення високочастотних коливань використовували ультразвуковий генератор 1 і магнітострикційний перетворювач 2. Вихідна частота генератора дорівнює 19,2 кГц, амплітуда - $15 \cdot 10^{-6}$ м. Розплав обробляли в жолобі, виготовленому з жерсті і футерованому листовим азбестом. У дно жолоба був вмонтований випромінювач високочастотних коливань 3, виготовлений зі ст. 40, діаметром 50 мм, що дорівнює ширині донної частини жолоба. Під час проведення експериментів помітної ерозії хвилеводу і застигання на ньому металу не відбувалося.

Весь метал, що проходить по жолобу 5, піддавався впливу пружних коливань. Оброблений розплав 6 заливали в піщану і металеву форми 7 діаметром 70 мм, висотою 140 мм.

Метал (алюміній і силумін) плавили в печі опору марки СШОЛ-11,6/12- МЗ~44,2. Температуру в печі та тиглі вимірювали за допомогою хромель- алюмелевої термопарі і фіксували потенціометром КСП-4.

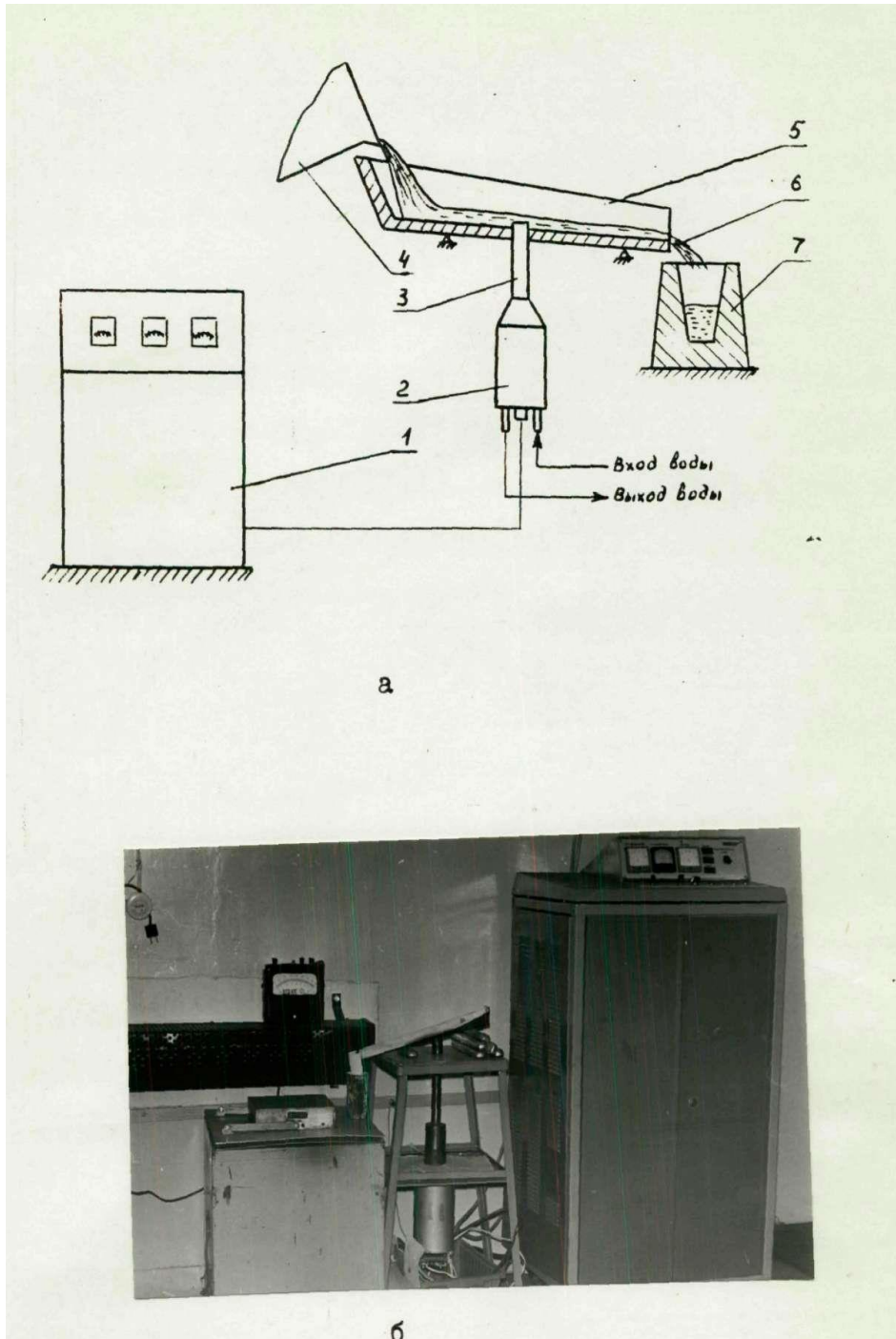


Рис 2.3. Принципова схема (а) і зовнішній вигляд лабораторної установки (б) з обробки розплаву високочастотними коливаннями: 1 - генератор УЗГ2-4М; 2 - перетворювач ПМС-І5А-І8; 3 - випромінювач (хвилевід); 4 - тигель із металом; 5 - жолоб; 6 - розплав; 7 - форма

Під час обробки розплавів алюмінію і силуміну на вібростенді метал розплавляли в печі опору в графіто-шамотному тиглі, і після досягнення необхідної для досліду температури тигель із розплавом встановлювали на вібростенд. Температуру металу вимірювали також ХА термopарою і фіксували потенціометром КСП-4. Хімічний склад металу в усіх дослідах був однаковий, оскільки порції металу для дослідів брали від стандартних промислових злитків однієї партії. Маса тигля з металом (алюміній, силумін) дорівнювала 1,3 кг. Зливки піддавали термічній обробці. Для алюмінію А99 застосовували рекристалізаційний відпал за температури 623 К з витримкою в печі протягом 2 год. Параметри термічної обробки силуміну АК12пч наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1.

Режим термічної обробки силуміну АК12пч

Загартування			Старіння		
Температура нагріву, К	Витримка, год	Охолодження і температура, К	Температура нагріву, К	Витримка, год	Охолоджувальне середовище
808	4	вода, 80	423	2	повітря

2.3 Дослідження фізико-механічних властивостей і структури металу

Зразки для вивчення фізико-механічних властивостей виготовляли зі злитків, отриманих під час проведення експериментів. На рис. 2.4 наведено схему розрізання дослідних злитків, отриманих шляхом заливання металу в графіто-шамотний тигель і підданих обробці на вібростенді. Зливки, отримані після обробки ультразвуковими коливаннями, розрізалися за схемою, представленою на рис. 2.5. Для проведення механічних випробувань виготовляли 5-ти кратні зразки згідно з ГОСТ 1497-73. Випробування на розрив проводили на випробувальній машині

"Інстрон". Твердість металу НВ вимірювали за Брінелем відповідно до ГОСТ 9012-59. Щільність зразків визначали методом гідростатичного зважування.

Для розрахунку похибки вимірювань у роботі було застосовано стандартну методику, проведену відповідно до ГОСТ 8207-76.

Проведений розрахунок похибки вимірювань тимчасового опору

розриву, відносного подовження, твердості та густини як чавуну, так і алюмінієвих сплавів показав, що вона перебуває в межах 3-7 %.

Дослідження макро- і мікроструктури дослідних злитків здійснювали стандартним способом. Макроструктуру алюмінію А99 і силуміну АК12пч одержували травленням зразків у 50 %-му розчині фтористої кислоти (HF) у воді. Макро- і мікроструктуру силуміну АК7 - травленням у 15 %-му розчині лугу ($NaOH$) у воді. Визначення та порівняння форми графітових включень у чавуні проводили згідно з ГОСТ 3443-77.

Фрактографічне дослідження зразків зламів і фотографування отриманого зображення проводили на скануючому електронному мікроскопі "Стереоскан С4- 10". Аналіз характеру фрактограм алюмінієвих сплавів і чавуну був проведений у відповідності з рівненні з атласом фрактограм [23].

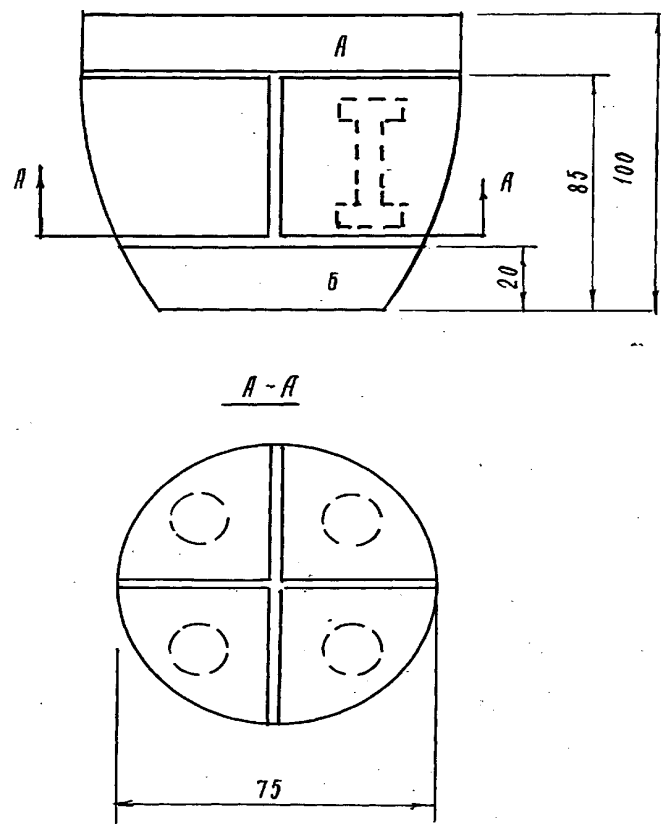
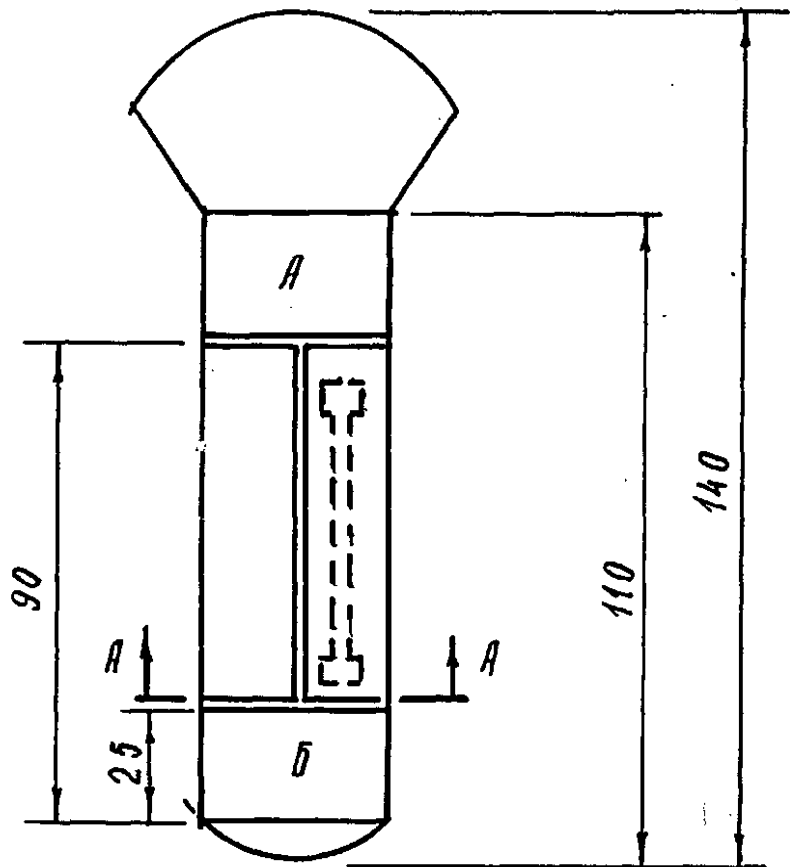


Рис. 2.4. Схема розрізання дослідних злитків із чавуну, алюмінію і силуміну, що затверділи в графіто-шамотному тиглі:
А - мікроструктура; Б - мікроструктура, твердість.



A - A

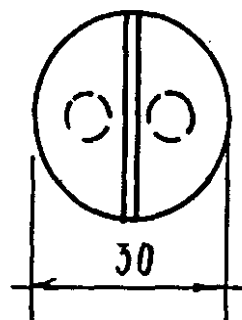


Рис. 2.5. Схема розрізання дослідних виливків з алюмінію і силуміну, залитих у піщану форму і металевий кокіль: А - макроструктура; Б - мікроструктура, твердість.

Основні експериментальні графічні залежності будували за рівнянням другого порядку типу $Y = AX^2 + BX + C$, коефіцієнти якого розраховували за методом найменших квадратів. Адекватність рівнянь оцінювали за критерієм Фішер.

3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1. Дослідження впливу технологічних факторів низькочастотної вібрації на фізико-механічні властивості та структуру металів і сплавів

3.1.1 Вплив вібрації на кристалізацію чавуну

Існують такі чинники, що впливають на якість виливків: частота вібраційного впливу; амплітуда коливань; спосіб вібрації; тривалість обробки; температура розплаву; траєкторія коливань; напрямок прикладання збурювальної сили; стан розплаву.

Для оптимізації впливу технологічних чинників експерименти з чавуном проводили за допомогою методу математичного планування.

У табл. 3.1 подано рівні досліджуваних технологічних факторів та інтервали їх варіювання

Таблиця 3.1

Рівні факторів та інтервали їх варіювання

№	Найменування факторів	Одиниця виміру	Значення	Рівні факторів	
				мінімальний	максимальний
1	Тиск повітря	МПа	X_1	0,2	0,4
2	Температура металу	К	X_2	1523	1573
3	Час обробки	хв	X_3	1	5
4	Модифікатор (FeSi)	%	X_4	0	0,3
5	Діаметр торсіона	мм	X_5	13-16	20-30
6	Тип вібратора, діаметр	мм	X_6	М,85	Б,110

Зміни частоти й амплітуди досягалися за рахунок різних поєднань застосовуваних торсіонів, типорозмірів вібраторів і тиску повітря в пневмомережі.

Робоча матриця планування експериментів представлена в табл. 3.2.

Таблиця 3.2.

Матриця планування експерименту з вібраційної обробки чавуну СЧ20

№№ дослідів	Змінні фактори					
	P, МПа	T, К	t, хв	FeSi, %	діаметр торсіона, мм	тип вібратора
1	0,2	1523	1	-	16	Б
2	0,4	1523	5	-	20	Б
3	0,2	1523	5	0,3	30	М
4	0,2	1573	1	0,3	30	Б
5	0,4	1573	1	-	20	М
6	0,4	1523	1	0,3	13	М
7	0,2	1573	5	-	16	М
8	0,4	1573	5	0,3	13	Б
9	0,2	1573	1	-	13	М
10	0,4	1573	5	-	30	М
11	0,2	1573	5	0,3	20	Б
12	0,2	1523	1	0,3	20	М
13	0,4	1523	1	-	30	Б
14	0,4	1573	1	0,3	16	Б
15	0,2	1523	5	-	13	Б
16	0,4	1523	5	0,3	16	М
17	0,2	1573	1	-	30	Б
18	0,4	1573	5	-	13	Б
19	0,4	1573	1	0,3	20	М
20	0,2	1573	5	0,3	16	М
21	0,2	1523	1	-	20	М
22	0,4	1523	5	-	16	М
23	0,4	1523	1	0,3	30	Б
24	0,2	1523	5	0,3	13	Б
25	0,3	1548	3	0,15	30	М
26	0,3	1548	3	0,15	30	М
27	0,3	1548	3	0,15	30	М

Крім 24 плавов, згідно з матрицею планування, були проведені додатково 3 дослідів (25-27) на середньому рівні факторів для розрахунку значущості коефіцієнтів і перевірки моделі на адекватність і кілька плавов для уточнення деяких точок під час побудови залежностей.

Фізико-механічні властивості чавуну представлені в табл. 3.3.

Таблиця 3.3.

Фізико-механічні властивості чавуну після реалізації матриці
планування

№ плавки по матриці	Тимчасовий опір розриву σ_B , МПа	Пластичність σ , %	Робота руйнування А, Дж	Твердість НВ	Щільність ρ , 10^3 кг/м ³
1	194	2,0	2,28	197	7,155
2	145	1,8	1,70	179	7,142
3	169	1,7	1,91	197	7,166
4	122	1,7	1,57	179	7,102
5	157	1,9	1,90	187	7,125
6	149	1,7	1,71	187	7,156
7	134	1,5	1,43	174	7,124
8	192	2,0	1,84	197	7,217
9	142	1,8	1,81	183	7,174
10	155	1,9	1,99	174	7,117
11	145	1,8	1,65	187	7,152
12	151	1,9	1,75	179	7,135
13	145	1,6	1,49	183	7,141
14	173	1,9	2,04	197	7,157
15	184	2,0	2,16	197	7,146
16	137	1,9	1,60	174	7,147
17	176	1,9	2,08	187	7,183
18	124	1,6	1,14	170	7,161
19	170	2,1	2,31	179	7,150
20	155	1,9	1,82	183	7,099
21	173	2,2	2,36	187	7,187
22	106	1,2	0,82	170	7,110
23	168	1,8	1,80	179	7,146
24	177	2,0	2,20	192	7,141
25	181	1,9	2,04	201	7,196
26	174	1,8	1,82	207	7,209
27	192	2,0	2,41	192	7,142
Вих.	143	1,6	1,47	167	7,099

У результаті опрацювання цих даних отримано рівняння регресії для міцності, твердості, пластичності та густини чавуну.

Рівняння регресії мають такий вигляд, наприклад для твердості

$$НВ = 184 - 2,75X_1 - 1,0X_2 - 1,25X_3 + 1,75X_4 - 1,0X_5 + 2,92X_6$$

У табл. 3.4 наведено значення коефіцієнтів усіх рівнянь регресії.

Таблиця 3.4.

Зведені дані коефіцієнтів регресії при оптимізації процесу віброобробки чавуну

№ п/п	Параметр оптимізації	V_0	Коефіцієнт регресії					
			$V_1 (P)$	$V_2 (T)$	$V_3 (t)$	$V_4 (FeSi)$	V_5 (діаметр торсіона)	V_6 (тип вібратора)
1	HВ	184	-2,75	-1,0	-1,25	-1,75	-1,0	+2,92
2	σ_B	156	-4,9	-1,8	-4,5	+3,5	+0,8	+6,5
3	Араз	1,8	-0,1	-0,008	-0,12	+0,04	+0,2	+0,02
4	σ	1,82	-0,04	+0,008	-0,05	+0,04	+0,03	+0,002
5	P	7,147	-0,0002	-0,0005	-0,004	+0,001	-0,001	+0,005

Через специфічність експерименту (наприклад, незначний перепад рівнів вплив деяких чинників у дослідженому інтервалі варіювання виявити не вдалося, коефіцієнти рівнянь виявилися незначущими (виділені жирним текстом).

Аналіз даних табл. 3.4 показує, що такі чинники, як тиск повітря, що визначає витрату і частоту коливань V_1 , підвищення температури початку віброобробки V_2 і час вібрації V_3 , певною мірою ведуть до зниження механічних властивостей чавуну.

Застосування модифікатора V_4 чинить позитивну дію.

Збільшення жорсткості, тобто діаметра торсіона V_5 і потужності вібратора зі збільшенням діаметра кільцевої направляючої V_6 веде, в основному, до зростання механічних характеристик.

Мікроструктура чавуну без обробки вібрацією характеризується сильно розвиненою грубою пластинчастою формою графіту (6 бал ГОСТ 3443-77). Розміри графітових включень після обробки істотно змінюються, причому це залежить від поєднання різних технологічних факторів. Так, у дослідях №№ 1, 8, 14, 15, 17, 19, 24 досягнуто подрібнення пластинчастої форми графіту з 6-го до 4-го бала, причому в досліді № 17 форма графіту стала компактною.

Подрібнення графітових включень пластинчастої форми призвело до підвищення фізико-механічних властивостей у цих сплавах.

Невисокі механічні властивості в дослідях №№ 2, 4, 5, 16, 20, 22 зумовлені укрупненням форми пластинчастого графіту.

Зростання щільності та механічних властивостей робить злам дрібнішим, а руйнування крихким, відсутні характерні ознаки в'язкості. Зі зростанням характеристик міцності збільшується робота, необхідна для утворення і поширення тріщини під час руйнування, а саме руйнування відбувається не на кордонах, а в центрі зерна.

Результати експериментів, проведених згідно з матрицею планування, дали змогу виявити напрямок подальших пошуків з метою визначення оптимальних параметрів вібраційної обробки чавуну.

Додатково було проведено серію одно факторних експериментів для з'ясування закономірностей зміни основних характеристик металу у вузькому інтервалі зміни параметрів вібраційних коливань.

Графічні залежності побудовані за даними реалізованих дослідів.

На рис. 3.1-3.3 показано графічні залежності впливу прискорення вібраційних коливань на густину, міцність і твердість чавуну. Як видно з графіків, максимальні значення фізико-механічних властивостей відповідають коливанням, за яких значення прискорень не перевищують $g = 8 \text{ м/с}^2$. Погіршення фізико-механічних властивостей відбувається при прискореннях близько $9,8 \text{ м/с}^2$.

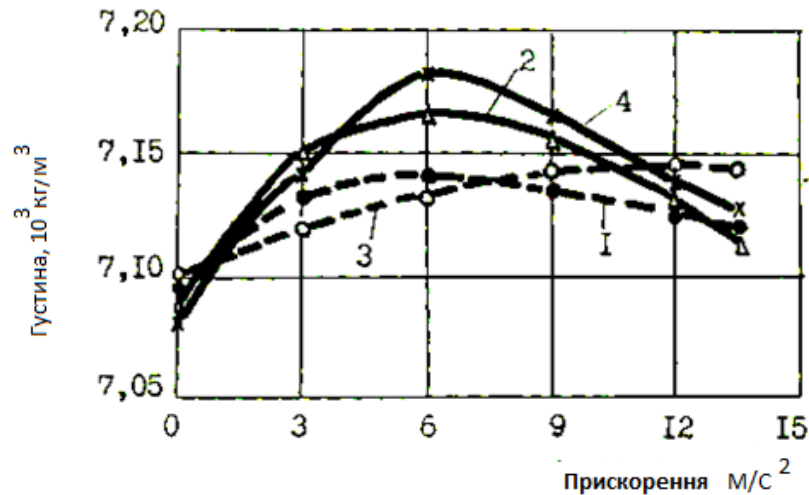


Рис. 3.1. Вплив прискорення вібрації на щільність чавуну

1. $t = 5 \text{ хв.}$, $\text{FeSi} = 0$;
2. $t = 1 \text{ хв.}$, $\text{FeSi} = 0$;
3. $t = 5 \text{ хв.}$, $\text{FeSi} = 0,3\%$;
4. $t = 1 \text{ хв.}$, $\text{FeSi} = 0,3\%$.

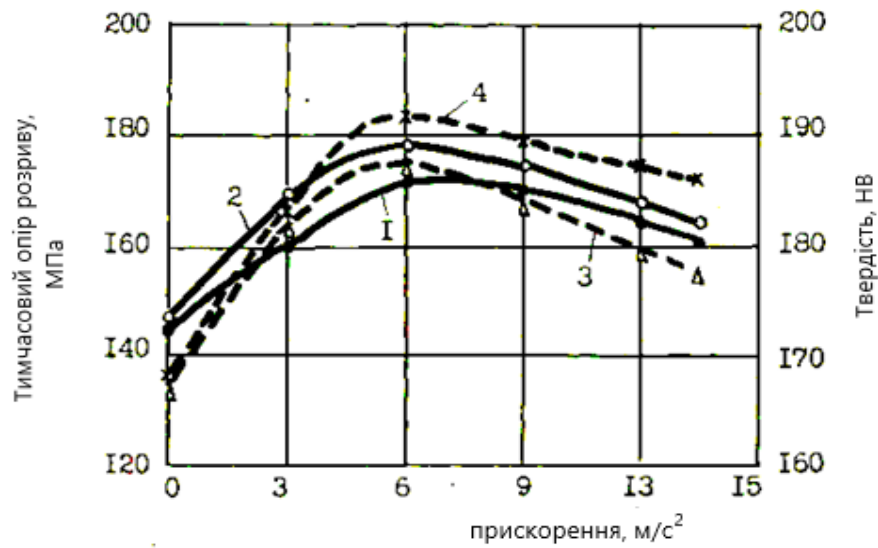


Рис 3. 2. Вплив прискорення вібрації на тимчасовий опір розриву і твердість чавуну (FeSi = 0)

1. - σ_B , t = 5 хв.;
2. - σ_B , t = 1 хв.;
3. - НВ , t = 5 хв.;
4. - НВ , t = 1 хв.

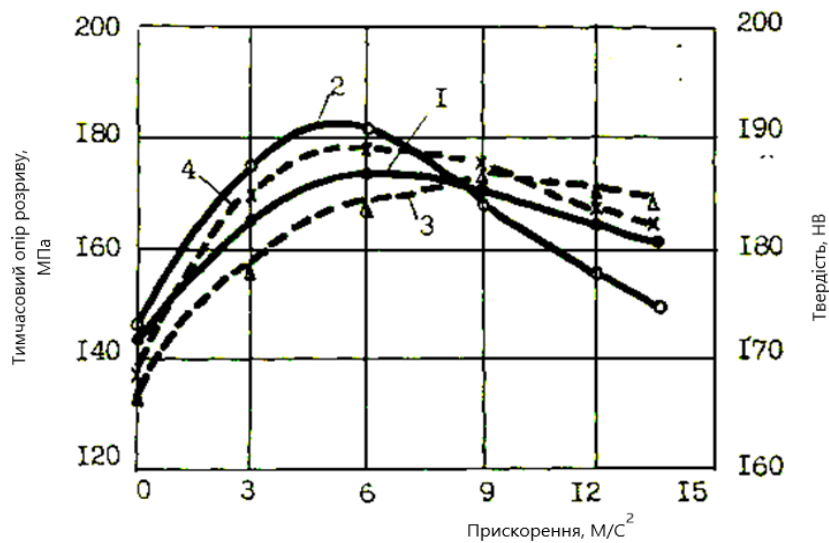


Рис 3. 3. Вплив прискорення вібрації на тимчасовий опір розриву і твердість чавуну (FeSi = 0,3 %)

1. - σ_B , t = 5 хв.;
2. - σ_B , t = 1 хв.;
3. - НВ , t = 5 хв.;
4. - НВ , t = 1 хв.

На рис. 3.4 і 3.5 представлено графічні залежності впливу тривал

ості вібраційної обробки на густину і міцність чавуну при частоті 70 Гц. Максимальні показники міцності та густини досягаються під час обробки протягом 2-4 х

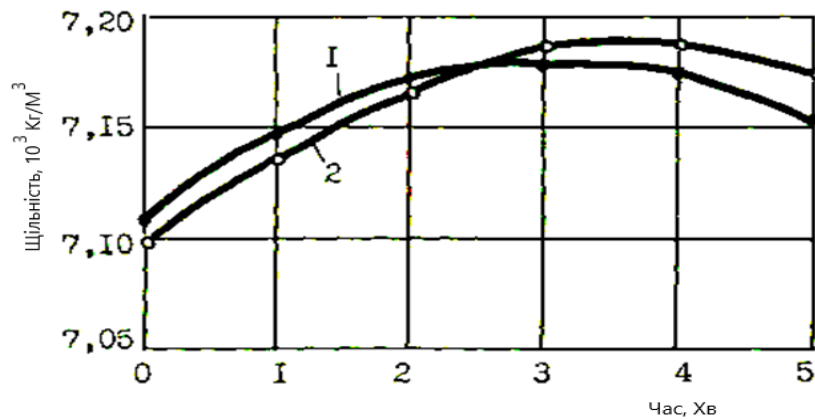


Рис. 3.4. Вплив тривалості віброобробки на густину чавуну (частота 70 Гц)

I - FeSi = 0;
2 - FeSi = 0,3%.

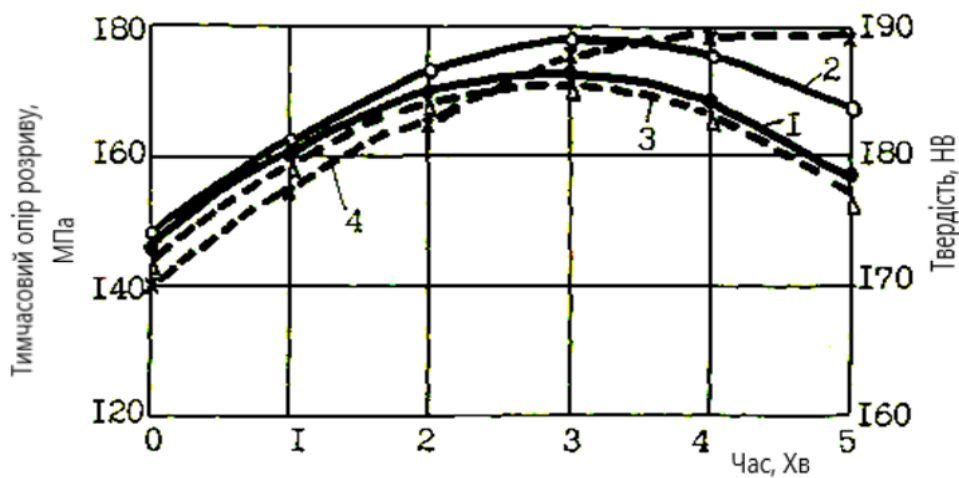


Рис. 3.5. Вплив тривалості віброобробки на міцність і твердість чавуну (частота 70Гц)

1. - σ_B , FeSi = 0 ;
2. - σ_B , FeSi = 0.3%;
3. - HB , FeSi = 0 ;
4. - HB , FeSi = 0.3%.

На рис. 3,6 і 3.7 показано графічні залежності впливу тривалості вібраційної обробки на фізико-механічні властивості чавуну в частотному діапазоні 40 Гц. Найбільші значення міцнісних властивостей і густини в цьому діапазоні відповідають другій - четвертій хвилинам обробки. При введенні модифікатора міцнісні властивості та густина підвищуються.

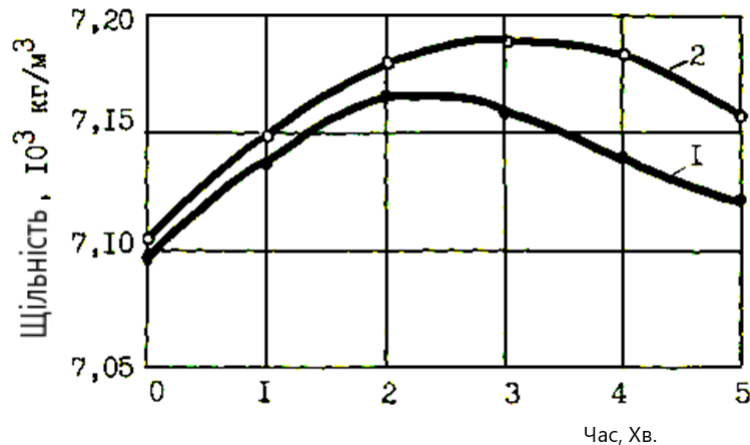


Рис. 3.6. Вплив тривалості віброобробки на міцність і твердість чавуну (частота 40Гц)

- 1 - FeSi = 0;
- 2 - FeSi = 0,3%.

Вплив зміни частоти коливань на фізико-механічні властивості чавуну простежено на рис. 3.8-3,10. Криві густини і міцнісних властивостей мають екстремальний характер, причому найкращі характеристики відповідають діапазону частот 40-50 Гц. Причому характер кривих залишається однаковим як за часу обробки в 1 хв, так і за тривалості обробки в 5 хв.

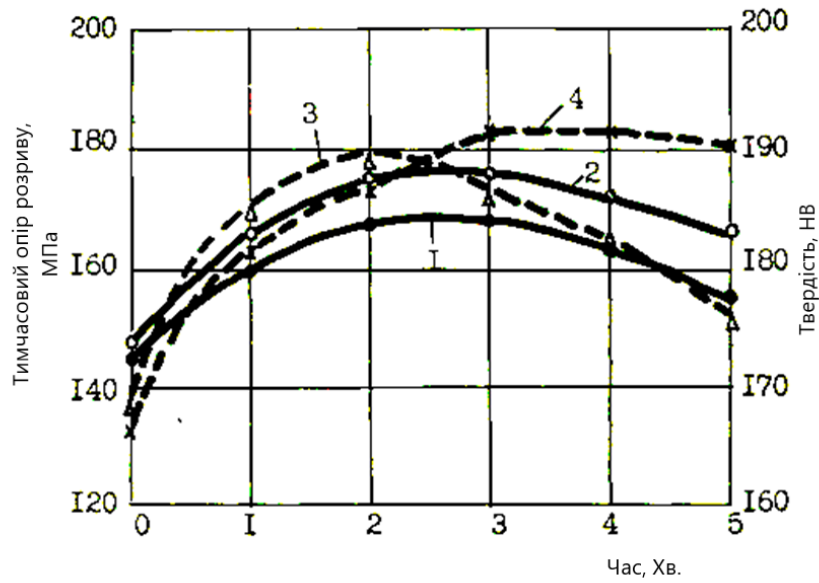


Рис. 3.7. Вплив тривалості віброобробки на міцність і твердість чавуну (частота 40Гц)

1. - σ_B , FeSi = 0 ;
2. - σ_B , FeSi = 0.3% ;
3. - HB , FeSi = 0 ;
4. - HB , FeSi = 0.3% .

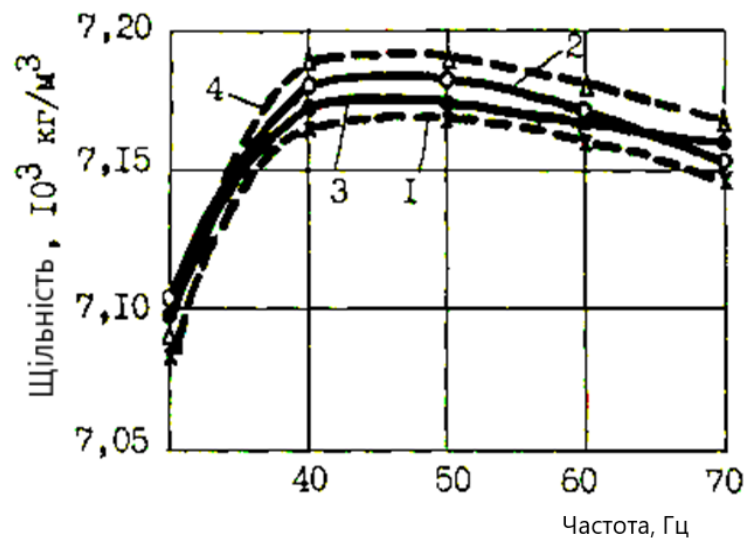


Рис. 3.8. Вплив частоти вібрації на щільність чавуну

1. $t = 5$ хв., FeSi = 0 ;
2. $t = 1$ хв., FeSi = 0 ;
3. $t = 5$ хв., FeSi = 0,3% ;
4. $t = 1$ хв., FeSi = 0,3% .

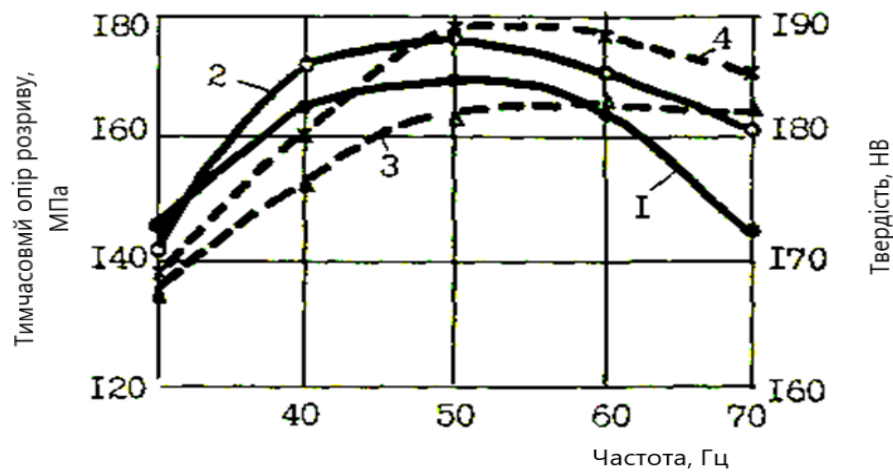


Рис. 3.9. Вплив частоти вібрації на міцність і твердість чавуну ($t = 1$ хв.)

1. - σ_B , FeSi = 0 ;
2. - σ_B , FeSi = 0.3% ;
3. - HB, FeSi = 0 ;
4. - HB, FeSi = 0.3% .

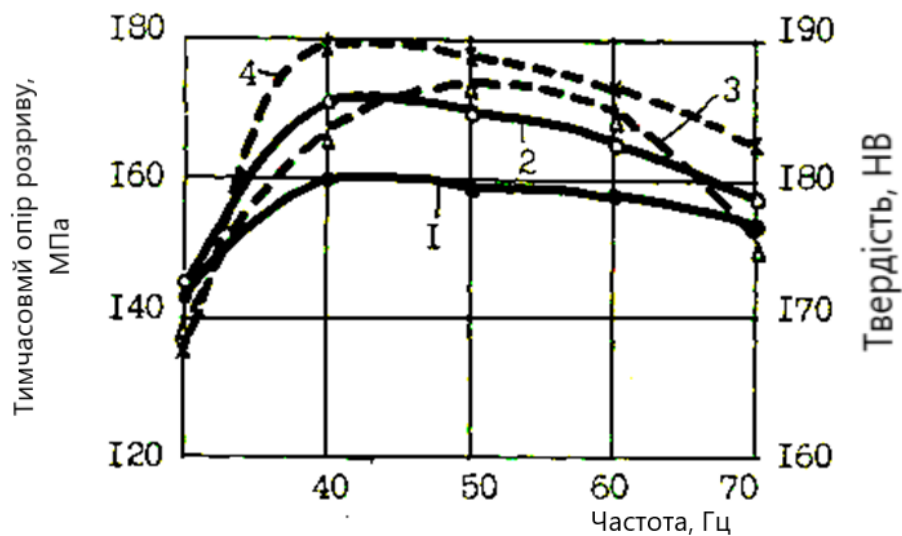


Рис. 3.10. Вплив частоти вібрації на міцність і твердість чавуну ($t = 5$ хв.)

1. - σ_B , FeSi = 0 ;
2. - σ_B , FeSi = 0.3% ;
3. - HB, FeSi = 0 ;
4. - HB, FeSi = 0.3% .

Усі аналітичні залежності мають характер кривої, яка описується функцією другого порядку. Коефіцієнти рівнянь і критерії адекватності найхарактерніших залежностей наведено в табл. 3.5

Таблиця 3.5

Розрахункові коефіцієнти квадратичного рівняння та критерії Фішера

№ п/п	Номер рисунка та кривої	Коефіцієнт рівняння			Критерій Фішера
		A	B	C	
1	3.16 (1)	-0,00025	0,3085	144,3	0,806
2	3.16 (2)	-0,0226	1,7176	143,8	0,557
3	3.16 (3)	-0,0085	0,8115	167,9	0,200
4	3.16 (4)	-0,0067	0,6042	167,9	0,289
5	3.14 (1)	-3,267	18,710	146,6	0,777
6	3.14 (2)	-3,0773	20,3678	142,34	0,641
7	3.14 (3)	-1,952	10,666	171,9	0,791
8	3.14 (4)	-1,095	9,219	170,38	0,347
9	3.15 (1)	-0,0072	0,0434	7,110	0,375
10	3.13 (2)	-0,0073	0,0497	7,0987	0,401
11	3.35 (1)	-0,0094	0,9506	55,56	0,511
12	3.35 (2)	-0,00006	0,00502	2,6133	0,150
13	3.36 (1)	-0,0087	1,1685	118,17	0,373
14	3.36 (2)	-0,00002	0,0018	2,646	0,515

Як оптимальні були обрані такі режими обробки, які дали змогу отримати метал із найвищими фізико-механічними властивостями.

- 1) частота коливань 40-50 Гц за час вібрування 2-5 хв;
- 2) частота коливань 70 Гц за тривалості обробки 2-3 хв.

Модифікування чавуну феросилієм у поєднанні з вібраційною обробкою призвело практично у всіх дослідах до зростання характеристик міцності.

Вочевидь, у дослідженому діапазоні частота в 40 Гц сприяє найефективнішому впливу коливань на процеси, які відбуваються в чавуні під час кристалізації.

Проведена в роботі оптимізація технологічних факторів віброобробки чавуну і побудовані аналітичні залежності досить добре узгоджуються. Введення модифікатора (FeSi) призвело до підвищення фізико-механічних властивостей за різних режимів і тривалості обробки, що підтверджується позитивними значеннями коефіцієнта регресії b_4 .

Поєднання таких параметрів оптимізації як тиск повітря b_1 , , діаметр торсіона b_5 і тип вібратора b_6 в кінцевому рахунку визначає частоту коливань вібростенда.

Позитивний вплив частоти в навколорезонансному режимі обробки на механічні властивості чавуну повністю корелює з коефіцієнтами регресії

b_1 та b_6 , Оптимізація технологічних чинників визначила найкоротші шляхи для розроблення кращих режимів обробки.

3.1.2 Вплив вібрації на кристалізацію алюмінію та силуміну

Чушковий алюміній і силумін розплавляли в графіто-шамотному тиглі ємністю 3 кг в електропечі опору. Потім тигель із розплавом поміщали у вібростенд і піддавали обробці пружними коливаннями в резонансному режимі: частота 30 Гц, амплітуда 0,1 мм.

Було проведено дві серії дослідів:

- перегрітий на 50 К вище температури плавлення метал вібрували за різної тривалості обробки (з інтервалом 1 хв);

- за різного перегріву розплав (з інтервалом 30 К) проводили обробку вібрацією до повного затвердіння металу.

Проведені дослідні плавки дали змогу виявити як якісні (макроструктура алюмінію і силуміну, характер усадочної раковини), так і кількісні (міцність, твердість, пластичність, розмір литого зерна) характеристики впливу вібрації на властивості металу.

Аналіз макроструктур алюмінію А99 і силуміну АК12пч (табл. 3.6,3.7) показує, що під впливом низькочастотних коливань істотно відбувається подрібнення зерна та зменшення величини стовпчастих кристалів.

Таблиця 3.6

Вплив вібрації на макроструктуру і характер усадочної раковини алюмінію і силуміну за різної тривалості обробки

№ п/п	Сплав	Температура початку обробки, К	Тривалість віброобробки, хв	Розмір зерна, мм	Характер усадочної раковини та пористої	Характер макроструктури
1	2	3	4	5	6	7
1	A99	983	вихідн. 0	дендрити завдовжки 10-20, завтовшки 2-10	концентрована, глибока, 58 % від висоти зливка. Основна маса перерізу - щільна, завтовшки, але під раковиною і вздовж стінок легковитравлені зони меншої щільності	від стінки - тонкий шар дрібних дезорієнтованих кристалітів, далі потужні транскристаліти, що здебільшого досягають осі злиткового утворення
2	A99	983	1	дендрити завдовжки 12-15, завтовшки 1-5	концентрована, глибока, 45 % , зона з підвищеною травимістю не спостерігається	поряд зі стовпчастими дендритами в нижній частині зливка на відстані 15 мм від поверхні спостерігаються дрібні дезорієнтовані кристаліти
3	A99	983	2	дендрити відсутні, кристаліти розміром 0,1-0,3	раковина становить 33 %, зона з підвищеною травимістю не спостерігається	стовпчасті дендрити відсутні, рівномірні дрібні кристаліти спостерігаються по всьому перерізу зливка
4	A99	983	3	кристаліти розміром 0,1-0,3	концентровані, 33%, але макропористість спостерігається навколо неї і проникла на глибину 32 мм	по всьому перерізу зливка - дрібні рівноосні кристаліти, спостерігаються зони підвищеної травимості по межах зерен у вигляді розводів
1	2	3	4	5	6	7
5	A99	963	4	кристаліти розміром 0,1-0,4	раковина становить 16%, під нею - легковитравлювані зони, які проникли на глибину 20 мм	по всьому перерізу зливка - дрібні кристаліти, 2-3 зерна на 1 мм із підвищеною травимістю на

						кордонах зерен
6	A99	963	5	кристаліти розміром 0,2-0,4	раковина мінімальна, макропори - на глибині 17 мм, основна маса злитка - щільна	дрібні кристаліти - по всьому перерізу, але на відстані 5 мм від поверхні злитка і в нижній зоні - більші кристаліти
7	AK12пч	903	вих, 0	дендрити завдовжки 7-15, завтовшки 0,1-0,6	раковина не глибока, основна маса злитка - щільна, але в центрі та в нижній зоні - макропори	крупногочасті дендрити на відстані 10 мм від поверхні розташовані перпендикулярно фронту затвердіння, далі дендрити дезорієнтовані
8	AK12пч	903	1	дендрити завдовжки не більше 4, завтовшки 0,1-1,2	раковина концентрована, розташована в центральній зоні злитка на відстані 10 мм від поверхні, мікропори по всьому перетину	поряд із подрібненнями голчастими дендритами (у верхній частині злитка і на відстані до 6 мм від поверхні) спостерігаються дрібні дезорієнтовані кристаліти, голки, що залишилися, мають меншу довжину
9	AK12пч	903	2	дендрити до 5, кристаліти 0,1-0,5	раковина концентрована, розташована на відстані 15 мм від поверхні, мікропори здебільшого зосереджені у верхній зоні злитка	-----
10	AK12пч	903	3	дендрити до 3, кристаліти 0,1-0,3	раковина концентрована, проникла на глибину 35 мм від поверхні, макропори - переважно у верхній частині злитка	по всьому перерізу злитка (за винятком нижньої частини, де спостерігаються дрібногочасті дендрити) поряд із дрібними кристалами з'явилася нова темно-сіра фаза у вигляді розгалуження (евтектика L + Si)
1	2	3	4	5	6	7
11	AK12пч	903	4	дендрити до 1, кристаліти 0,2-0,3	раковина відсутня, макропори по всьому перерізу злитка, в основному зосереджені у верхній частині центральної зони	евтектика сповільнилася до 1 мм, у центральній зоні дрібні дезорієнтовані кристаліти, у нижній - дрібногочасті дендрити
12	AK12пч	903	5	дендрити до 1.5, кристаліти 0,1-0,2	раковина концентрована, розташована на відстані 10 мм від поверхні, макропори по всьому перетину злитка	-----

Таблиця 3.7.

Вплив вібрації на макроструктуру і характер усадочної раковини алюмінію і силуміну при різному перегріві над лінією ліквідус

№ п/п	Сплав	Температура початку обробки, К	Тривалість віброобробки, хв	Розмір зерна, мм	Характер усадочної раковини та пористої	Характер макроструктури
1	2	3	4	5	6	7
1	A99	983	вихідн. 0	дендрити завдовжки 10, завтовшки 2-10	раковина концентрована, глибока, 60 % від висоти злитка. Основна маса перерізу - щільна, завтовшки, але під раковиною і вздовж стінок легковитравлені зони меншої щільності	від стінки - тонкий шар дрібних дезорієнтованих кристалітів, далі потужні транскристаліти, що здебільшого досягають осі злиткового утворення
2	A99	933	5	кристаліти розміром 0,2-0,4	раковина відсутня, але у верхній частині злитка - макропори. Структура щільна	по всьому перерізу злитка - дрібні кристаліти (3-4 зерна на 1 мм). У верхній і нижній зонах злитка - легковитравлювані зони
3	A99	963	5	кристаліти розміром 0,2-0,3	раковина відсутня, по всьому перетину злитка - щільна структура	по всьому перерізу - структура дрібних рівновісних кристалітів
4	A99	993	5	кристаліти розміром 0,1-0,3	раковина відсутня, але замість неї - велика зона макропористості	по всьому перерізу - структура дрібних рівновісних кристалітів, спостерігаються легковитравлювані зони
5	A99	1023	6,5	кристаліти розміром 0,2-0,6	раковина мінімальна, під нею - макропористість, структура злитка - щільна, лише в нижній частині на відстані до 6 мм невелика зона, що легко піддаються травленню	спостерігається деяке збільшення зерна вздовж стінок злитка (кристаліти розміром до 0,6 мм), але в основному по всьому перетину - дрібні кристаліти (до трьох зерен на 1 мм)
6	A99	1053	7,5	кристаліти	на місці раковини - локальна	структура - малозерниста, (2-3

				розміром 0,3-0,6	макропористість	зерна на 1 мм), але в нижній зоні та вздовж стінок злитка спостерігаються егкоутравлювальні зони за межами зерна
7	AK12пч	903	вих, 0	дендрити завдовжки 7-15, завтовшки 0,1-0,6	раковина неглибока, 10% від висоти злитка, основна маса злитка - щільна, але в центральній і нижній зонах спостерігаються макропори	крупноголчасті дендрити вздовж стінок злитка розташовані перпендикулярно фронту затвердіння, далі дендрити дезорієнтовані
8	AK12пч	853	3,5	кристаліти розміром 0,3-0,6	раковина відсутня, але макропористість спостерігається по всьому перерізу, в основному у верхній частині	голчасті дендрити відсутні, нова темно-сіра фаза у вигляді розгалужень (L+Si) проникла по всьому перетину злитка
9	AK12пч	833	4	кристаліти розміром 0,1-0,2	раковина відсутня, максимальна розсіяна пористість - у центральній зоні злитка	евтектика L+ Si розміром 0,3-0,5 спостерігається у верхній зоні злитка, більш дрібні - у нижній частині на відстані до 10 мм від поверхні
10	AK12П Ч	913	5	дендрити нової фази до 3, кристаліти 0,1-0,3	раковина сконцентрована в центральній частині злитка, макропористість - по всій верхній частині	велика нова фаза розміром до 3 мм - уздовж стінок злитка, дрібніші (до 1 мм) - у нижній зоні
11	AK12пч	943	6	кристаліти розміром 0,1-0,3	раковина відсутня, макропористість розсіяна по всьому перерізу злитка з переважанням у верхній і центральних зонах	нова фаза спостерігається тільки в нижній зоні та вздовж стінок злитка, по всьому перерізу - дрібні дезорієнтовані кристаліти
12	AK12пч	973	6,5	кристаліти розміром 0,1-0,2	раковина відсутня, макропори - по всьому перетину	у верхній і центральній зонах розмір нової фази у вигляді розгалужень досягає 2,5 мм, у нижній зоні та вздовж стінок злитка - дрібні кристаліти
13	AK12пч	1053	9,5	дендрити до 1 мм, кристаліти 0,1-0,2	раковина відсутня, концентрована макропористість - на глибині 30 мм від поверхні, основна маса злитка - щільна	з'явилися дрібноголчасті дендрити по всьому перетину злитка

Макроструктура алюмінію А99, обробленого вібрацією з різним часом впливу, характеризується рівновісними кристалами. Середня величина кристалів у зливках, оброблених вібрацією, значно менша, ніж у вихідних, де великі кристали досягають осі злитка.

При розгляді макроструктури алюмінію А99 з різним ступенем перегріву вище за лінію ліквідусу з подальшим віброобробленням до повної кристалізації спостерігаються дрібні рівноосні кристали в структурі металу, перегрітого аж до 993 К. За 1023 і 1053 К кристали дещо збільшилися.

Так, у вихідному зразку на відстані 10 мм від поверхні спостерігаються крупногочасті дендрити, розташовані перпендикулярно фронту затвердіння, далі вони дезорієнтовані. У зразках, оброблених вібрацією, дендрити подрібнюються. Макроструктура силуміну характеризується високою дисперсністю та однорідністю. Загалом макроструктура дрібнозерниста, навіть дрібні девдрити спостерігаються рідко.

Дослідження показало, що віброобробка розплавів призводить до істотного подрібнення литого зерна алюмінію і силуміну, причому інтенсивність цього впливу зі збільшенням часу обробки зростає (рис. 3.11). Литє зерно з мінімальним діаметром 0,2-0,3 мм утворюється за тривалості обробки понад дві хвилини. Вплив температури перегріву на діаметр литого зерна показано на рис. 3.11.

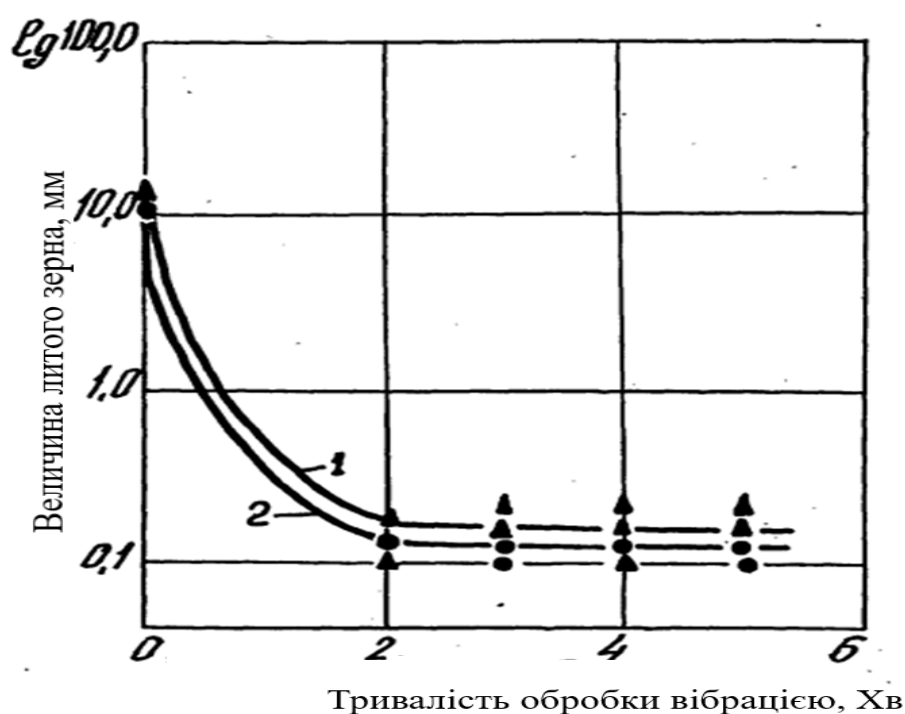


Рис. 3.11. Вплив тривалості обробки вібрацією на величину литого зерна алюмінію А99 (І) і силуміну АК1

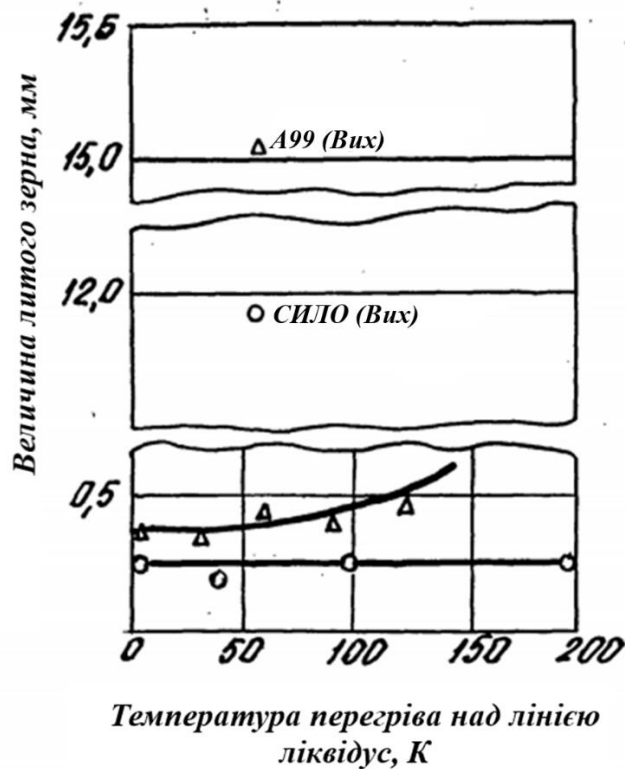


Рис. 3.12. Вплив температури перегріву під час віброоброблення на величину литого - зерна алюмінію А99 і силуміну АК12пч.

Результати дослідження характеру розташування усадочної раковини в злитках алюмінію показали, що віброобробка призвела до зменшення глибини розташування усадочної раковини. Без вібрації усадочна раковина мала звичайну форму подовженої лійки, а під час вібрації вона набула форми усіченого конуса за різкого скорочення її глибини. Чим більший ступінь локалізації раковини, тобто чим менше розвинена усадочна пористість, тим легше організувати живлення виливки.

Обробка вібрацією протягом 5 хв зменшує глибину залягання усадочної раковини до 5% проти початкових 55-60 %, Графічна залежність впливу тривалості обробки на глибину поширення усадочної раковини для алюмінію А99 представлена на рис. 3.13.

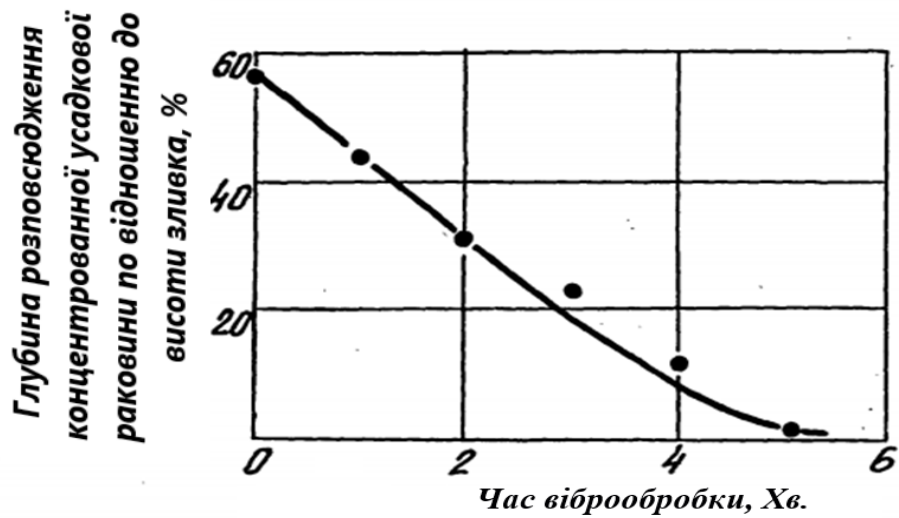


Рис. 3.13. Вплив тривалості обробки вібрацією на глибину розповсюдження усадкової раковини алюмінію А99

Аналіз макроструктури силуміну показав наявність характерного розподілу усадочних дефектів у вигляді розсіяної пористості у вихідному злитку, де концентрована усадочна раковина взагалі відсутня.

У всіх зливках, оброблених вібрацією з різною тривалістю, явно видно тенденцію до утворення концентрованої усадочної раковини.

При підвищенні температури перегріву сплаву над лінією ліквідус і впливі вібрації до кристалізації концентрована усадочна раковина не утворюється.

Результати фізико-механічних випробувань зразків алюмінію А99 і силуміну АК12пч зведені в табл. 3.8.

Таблиця 3.8

Фізико-механічні властивості алюмінію А99 і силуміну АК12пч
після вібраційної обробки

№ п/п	Сплав	Температура початку обробки Т, К	Час віброобробки t, хв	Тимчасовий опір розриву σ_{β} , МПа	Відносне подовження %	Твердість, НВ	Щільність $\rho \cdot 10^3$ кг/м ³
1	А99	983	0	57	10,0	25,5	2,612
2	А99	983	1,0	78	10,0	28,5	2,730
3	А99	983	2,0	71	10,7	27,9	2,725
4	А99	983	3,0	62	11,7	26,5	2,579
5	А99	983	4,0	64	11,7	26,9	2,715
6	А99	983	5,0	59	10,2	25,5	2,688
7	А99	933	5,0	67	11,4	28,5	2,620
8	А99	963	5,0	69	13,4	28,5	2,665
9	А99	993	5,0	76	7,1	30,1	2,732
10	А99	1023	6,5	63	8,1	26,9	2,665
11	А99	1053	7,5	51	10,1	26,2	2,660
12	АК12пч	903	0	120	0	47,7	2,645
13	АК12пч	903	1,0	120	1,1	60,0	2,685
14	АК12пч	903	2,0	132	1,1	60,0	2,702
15	АК12пч	903	3,0	134	1,1	60,0	2,677
16	АК12пч	903	4,0	127	1,1	60,0	2,662
17	АК12пч	903	5,0	130	1,1	60,0	2,672
18	АК12пч	853	3,5	114	0	55,5	2,645
19	АК12пч	883	4,0	110	0	60,0	2,662
20	АК12пч	913	5,0	110	0	60,0	2,680
21	АК12пч	943	6,0	126	1,1	60,0	2,685
22	АК12пч	973	6,5	131	2,2	60,0	2,658
23	АК12пч	1053	9,5	138	3,2	60,0	2,655

На рис. 3.14.3.19 наведено графічні залежності впливу часу віброобробки та температури перегріву над лінією ліквідус на механічні властивості А99 і АК12пч.

Анвліз графічних залежностей (рис. 3.14 і 3.15) показує, що вплив тривалості віброоброблення на тимчасовий опір розриву алюмінію і силуміну характеризується екстремальними кривими з максимумом в інтервалі 2-4 хв у силуміну і 1-3 хв у алюмінію.

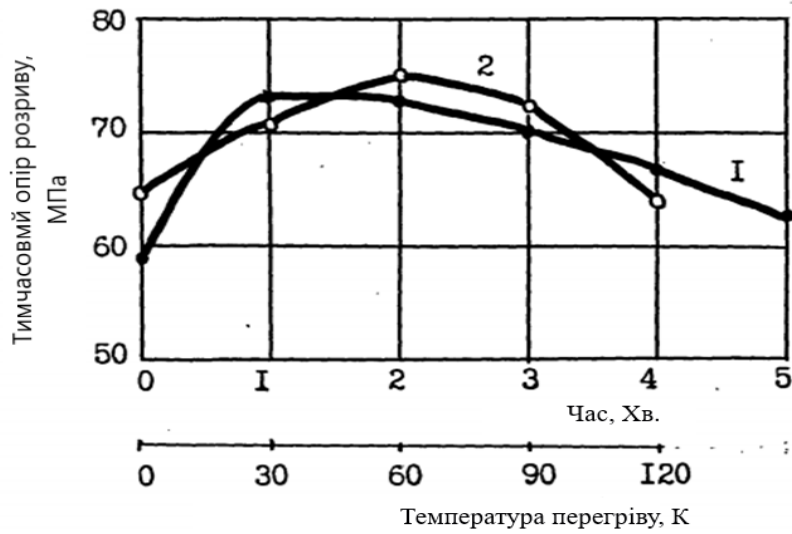


Рис. 3.14. Вплив тривалості віброобробки та температури перегріву над ліквідусом на тимчасовий опір розриву алюмінію А99
 1 - вплив часу віброобробки;
 2 - вплив температури перегріву над ліквідусом.

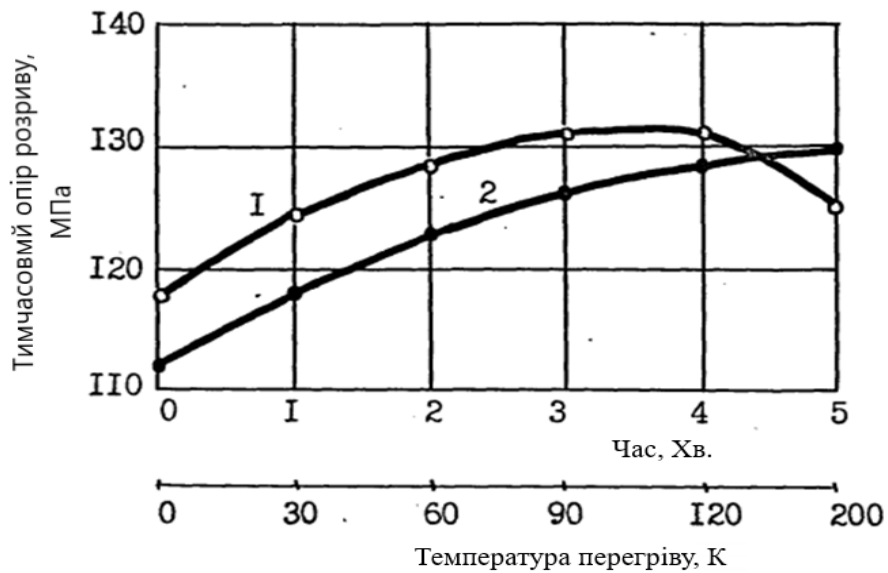


Рис. 3.15. Вплив тривалості віброобробки та температури перегріву над ліквідусом на тимчасовий опір розриву силуміну АК12пч
 1 - вплив часу віброобробки;
 2 - вплив температури перегріву над ліквідусом.

Вплив температури перегріву на міцність алюмінію характеризується кривою з досить добре вираженим максимумом при перегріві над лінією ліквідусу на 60 К. Підвищення температури розплаву понад 993 К знижує міцність.

Вплив температури перегріву на міцність силуміну описує плавно зростаюча крива. Зі збільшенням температури перегріву сплаву міцність монотонно зростає до 130 МПа. Причому, одночасно з цим не відбувається збільшення щільності, як це спостерігається в інших випадках (рис. 3.21).

Твердість алюмінію (рис. 3.16) як зі зростанням тривалості обробки вібрацією в межах 1-3 хв, так і зі збільшенням температури перегріву розплаву до обробки зростає за умови перегріву від 30 до 90 К. Необхідно зазначити, що максимум кривої тривалості обробки слабо виражений порівняно з кривою впливу перегріву сплаву.

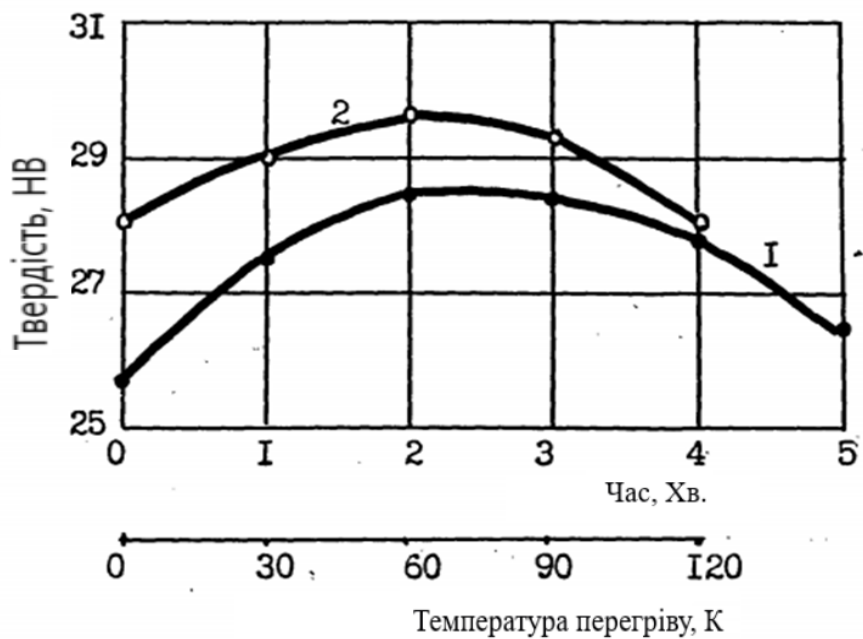


Рис. 3.16. Вплив часу віброобробки та температури перегріву над ліквідусом на твердість алюмінію А99

- 1 - вплив часу віброобробки;
- 2 - вплив температури перегріву над ліквідусом.

Вплив часу віброобробки і температури перегріву на твердість силуміну описується однотипними кривими, близькими за формою до гіперболи (рис. 3.17). У разі перегріву у вузькому інтервалі температур від 853 до 883 К твердість збільшується від 55 одиниць до 60, збільшення перегріву понад 893 К не призводить до подальшого зростання твердості.

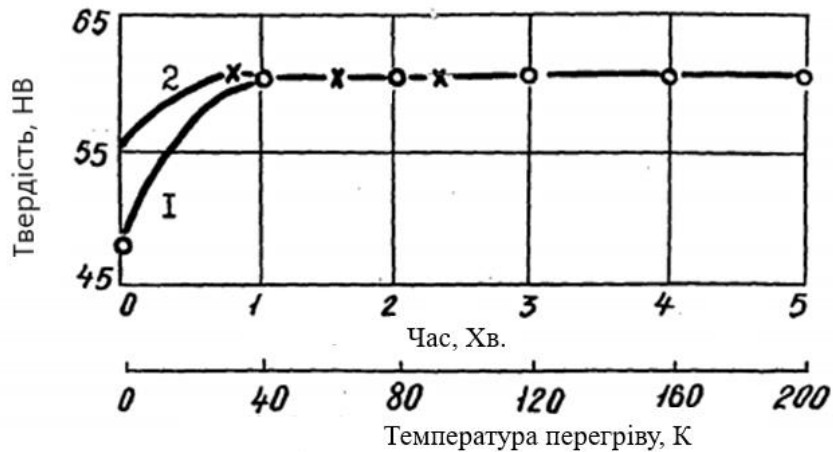


Рис. 3.17. Вплив часу віброобробки та температури перегріву над ліквідусом на твердість силуміну АК12пч
 1 - вплив часу віброобробки;
 2 - вплив температури перегріву над ліквідусом.

Аналогічним є вплив часу віброобробки на твердість силуміну: збільшення часу обробки понад 1 глин на відміну від алюмінію не призводить до подальшого зростання твердості.

Характер впливу змінюваних факторів на пластичність представлений на рис. 3.18 и 3,19.

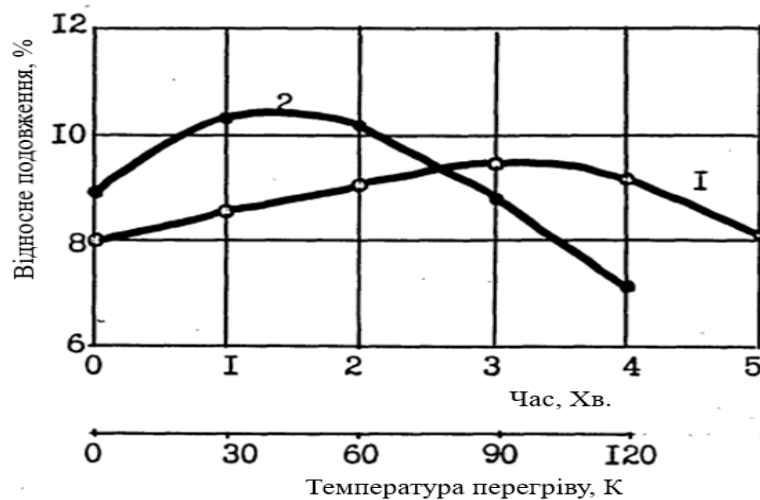


Рис. 3.18. Вплив часу віброобробки та температури перегріву над ліквідусом на пластичність алюмінію А99
 1 - вплив часу віброобробки;
 2 - вплив температури перегріву над ліквідусом.



Рис. 3.19. Вплив тривалості віброобробки та температури перегріву на пластичність силуміну АК12пч
 О - О - вплив часу віброобробки;
 Х - Х - вплив температури перегріву над ліквідусом.

За малої тривалості віброобробки (1-2 хв) пластичність алюмінію незначно зростає. Зі збільшенням часу обробки від двох хвилин до трьох-чотирьох хвилин відбувається зміна структури металу таким чином, що це супроводжується вже істотним підвищенням пластичності алюмінію на 18-20 %, Подальше збільшення тривалості віброобробки призводить до зниження пластичності до початкового рівня.

Вплив температури перегріву на пластичність алюмінію характеризується екстремальною кривою з максимумом при 963 К.

Вплив температури перегріву і часу віброобробки силуміну (рис. 3.19), на відміну від алюмінію, характеризується плавними кривими без максимуму.

Вплив тривалості віброобробки (рис. 3.19) практично у всьому діапазоні від 1 до 5 хвилин призводить до підвищення пластичності силуміну. Крива в цьому інтервалі близька до прямої.

За незначного збільшення перегріву силуміну (на 50-70 К) вібрація не призводить до зміни відносного подовження. При подальшому збільшенні температури до 1053 К пластичність істотно збільшується, досягаючи 3,2 %.

Зміна густини металу в твердому стані від тривалості обробки і температури перегріву над ліквідусом (рис. 3.20 і 3.21) характеризується кривими з максимумом і в основному узгоджується зі зміною механічних характеристик алюмінію і силуміну.

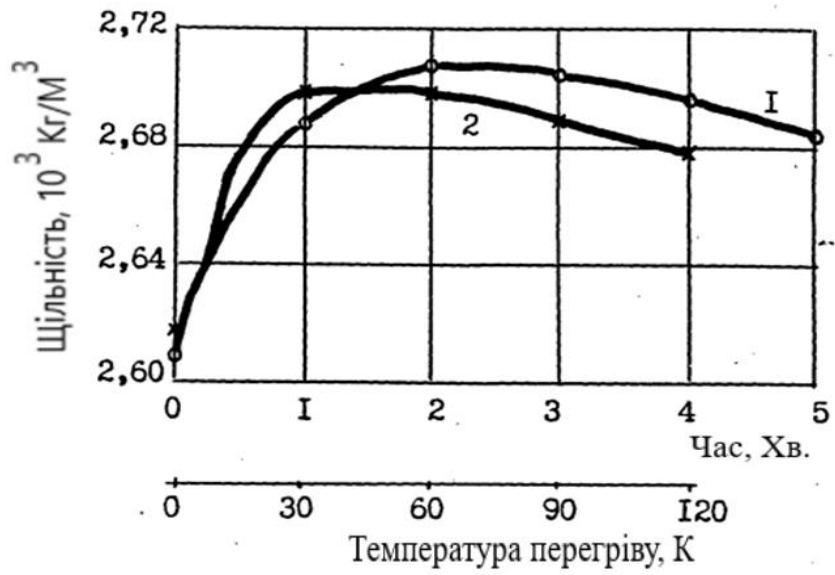


Рис. 3.20. Вплив тривалості віброобробки та температури перегріву над ліквідусом на густину алюмінію А99
 1 - тривалість обробки;
 2 - температура перегріву.

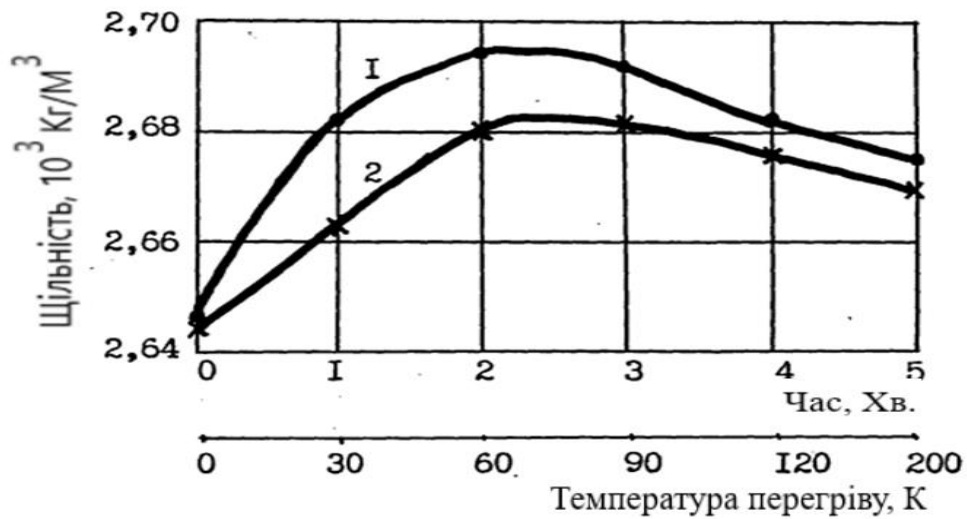


Рис. 3.21. Вплив тривалості віброобробки і температури перегріву над ліквідусом на щільність силуміну АК12пч
 1 - тривалість обробки;
 2 - температура перегріву.

Так, для алюмінію підвищення густини в обох режимах обробки практично збігається і відповідає мінімальній тривалості обробки і температурі перегріву в розглянутому діапазоні параметрів. У разі збільшення часу обробки і підвищення температури перегріву густина алюмінію дещо знижується, залишаючись, однак, вищою за вихідні значення.

Графічні залежності для силуміну мають той самий екстремальний характер, що і для алюмінію, з тією лише різницею, що вони зміщені в бік більшого часу обробки (2-3 хв) і температури перегріву над ліквідусом.

Після встановлення оптимального часу вібраційної обробки алюмінію і силуміну було проведено серію дослідів з метою з'ясування впливу різних частот вібрації на фізико-механічні властивості.

Результати експериментів представлені в табл. 3.9.

Таблиця 3.9.

Фізико-механічні властивості алюмінію та силуміну за різних частот вібраційної обробки

Частота вібрації, Гц	Сплав	Тимчасовий опір розриву, МПа	Відносне подовження, %	Твердість, НВ	Щільність, 10^3кг/м^3
30	A99	58	10	25,5	2,73
40	A99	85	12,3	34	2,732
50	A99	90	13,1	35,2	2,728
60	A99	69	13,2	28,8	2,68
70	A99	78	13,4	29,7	2,702
0	A99	57	10	25,5	2,612
30	AK12пч	134	1,1	60	2,677
40	AK12пч	158	1,1	65	2,702
50	AK12пч	169	2,2	63	2,711
60	AK12пч	148	3,2	60	2,665
70	AK12пч	159	1,1	60	2,699
0	AK12пч	120	0	47,7	2,645

Примітка: температура була постійною, перегрів над лінією ліквідусу на 50 К, тривалість обробки 3 хв.

На рис. 3.22 і 3.23 наведено графічні залежності впливу частоти вібрації на величину тимчасового опору розриву та щільність алюмінію і силуміну.

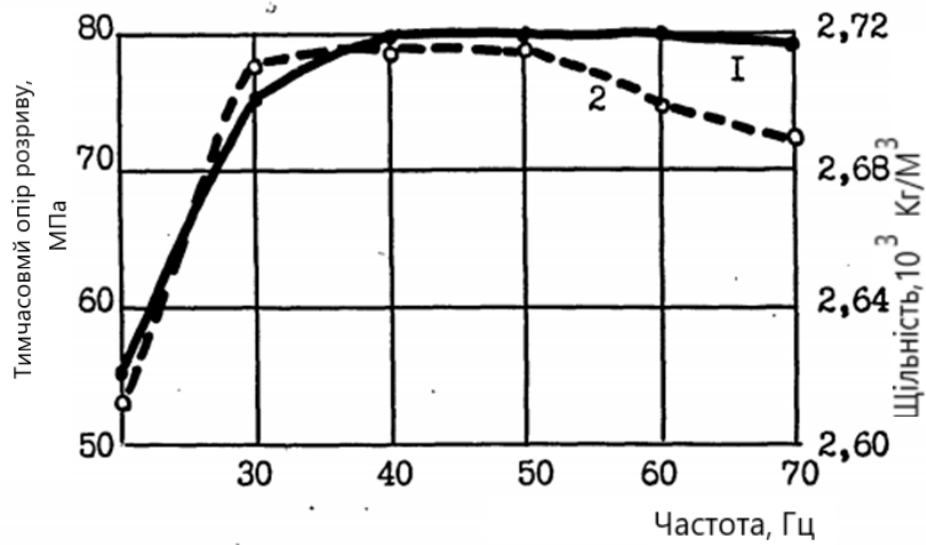


Рис. 3.22. Вплив частоти вібрації на величину тимчасового опору розриву та густину алюмінію ($t = 3$ хв.)
 1 - тимчасовий опір розриву;
 2 - щільність.

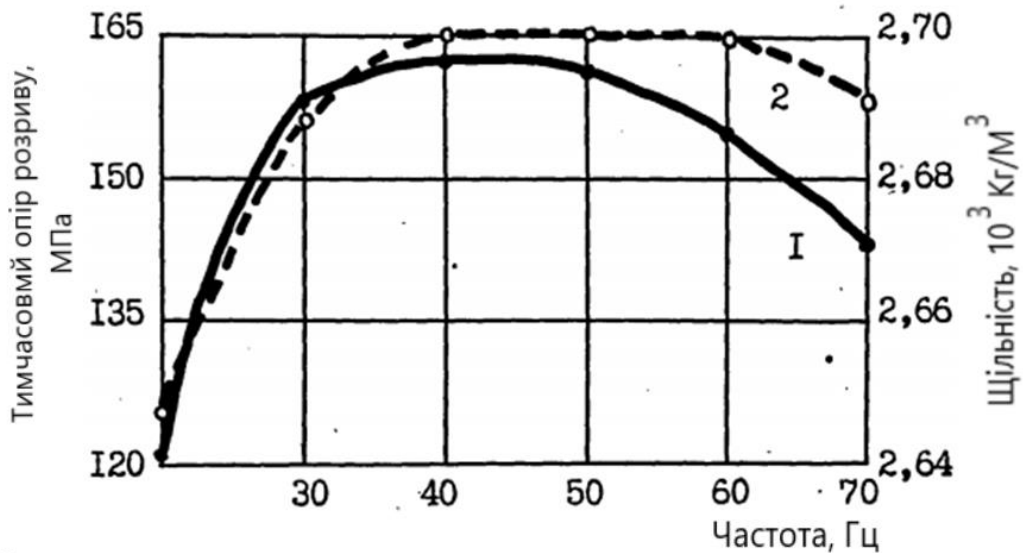


Рис. 3.23. Вплив частоти вібрації на величину тимчасового опору розриву і густину силуміну ($t = 3$ хв.)
 1 - тимчасовий опір розриву; 2 - щільність.

Криві мають екстремальний характер із максимумом у частотному діапазоні 40-50 Гц. Слід звернути увагу на ту обставину, що криві міцності мають характер близький до кривих зміни густини. Ущільнення маси металу під дією вібрації є, очевидно, визначальним фактором, від якого залежать властивості міцності як чистого металу, так і сплаву.

Отримані експериментальні залежності та структура металу свідчать про ефективність низькочастотної обробки алюмінієвих сплавів, що проявляється в підвищенні фізико-механічних властивостей і якісному поліпшенні структури.

3.2 Дослідження впливу технологічних чинників і параметрів високочастотної вібрації на фізико-механічні властивості та структуру алюмінію і силуміну

Для проведення експерименту за допомогою методу математичного планування необхідно було зробити вибір і оцінити ступінь впливу різних чинників і параметрів на якість сплавів. Ці фактори наведено в табл. 3.10. З даних таблиці видно, що не всі фактори мають визначальний вплив на структуру і властивості металу. З основних чинників було відібрано сім, для яких вдалося виявити вивчені межі впливу, решту було стабілізовано.

Під час складання матриці планування експерименту використовували 1/8 частину від повного факторного експерименту об'ємом 2^7 , тобто було реалізовано 16 дослідів замість 128. У табл. 3.11 наведено вибрані фактори для алюмінію: А99 і силуміну АК7.

На підставі цих даних було складено робочі матриці експериментів (табл.3.12 і 3.13). Для того, щоб унеможливити вплив помилок, викликаних зовнішніми умовами (зміною сировини, матеріалів, вологістю тощо), під час проведення експериментів виконали рандомізацію в часі. Результати фізико-механічних випробувань представлені в табл. 3.14.

Таблиця 3.10.

Фактори, що впливають на якість металу

№ п/п	Група факторів	Найменування факторів	Досліджені раніше межі впливу факторів
1	Фактори, що залежать від обладнання	1.1 Інтенсивність коливань ультразвукового поля	2-20 Вт/см ²
		1.2 Потужність ультразвукового поля	1-1,5 кВт
		1.3 Частота ультразвукового поля	18-25 кГц
		1.4 Амплітуда ультразвукових коливань	8 мкм
2	Фактори, що залежать від особливостей процесу	2.1 Тривалість обробки розплаву ультразвуком	1-5 хв
		2.2 Кратність обробки металу (число разів)	Даних не знайдено
		2.3 Спосіб введення ультразвукової енергії	Знизу, зверху, через проміжний об'єм
		2.4 Матеріал випромінювача	Найбільш стійкий титан
		2.5 Швидкість кристалізації	2,8-5,4 град/с
3	Фактори, що залежать від властивостей розплаву	3.1 Тип металу (основа сплаву)	Алюмінієвий сплав
		3.2. Маса металу	100-400 г
		3.3 Температура перегріву над ліквідусом у процесі обробки	50-70 К
		3.4 Наявність підігріву форми	Даних не знайдено
4	Фактори, що залежать від складу оброблюваного металу	4.1 Вміст домішок у металі	По залізу 0-1,8 %
		4.2 Вміст газів у металі	(0,1-0,4).10 ⁺² см ³ /100г
		4.3 Вміст неметалевих включень у металі	Даних не знайдено
		4.4 Вміст модифікатора	0,05-0,6 %

Таблиця 3.11.

Рівні факторів та інтервали їх варіювання в матриці для алюмінію А99 і силуміну АК7

№ п/п	Найменування фактора	Позначення	Розмірність	Рівні факторів	
				мінімальний	максимальний
Для алюмінію А99					
1	Тривалість обробки (пропорційно куту нахилу жолоба)	L	град	0	20
2	Швидкість кристалізації в земляній ("З") і металевій формі (кокілі) ("К")	К,З	град/с	2,8	5,4
3	Температура розплаву	Т	К	720	760
4	Потужність ультразвукового поля	W	кВт	2,7	3,15
5	Вміст ітрію	У	%	-	2,0
6	Концентрація флюсу	Ф	%	0	0,2
7	Кратність обробки	К	кількість разів	1	2,0
Для силуміну АК7					
1	Час обробки (пропорційно куту нахилу жолоба)	L	град	0	20
2	Швидкість кристалізації в земляній ("З" - 2,8) і металевій формі ("К" - 5,4)	К,З	град/с	2,8	5,4
3	Температура розплаву	Т	К	973	1013
4	Потужність ультразвукового поля	W	кВт	2,7	3,15
5	Вміст заліза	Fe	%	0,42	1,0
6	Концентрація флюсу	Ф	%	0	0,2
7	Кратність обробки	К	кількість разів	1	2

Таблиця 3.12.

Матриця експерименту з ультразвукової обробки алюмінію А99

№№	Технологічні чинники						
	L град	T К	W кВт	Y %	V град/с	K	Ф %
1	20	1033	3,15	2,0	К	2	0,2
2	20	993	3,15	2,0	К	1	0,2
3	0	1033	3,15	2,0	З	2	0
4	0	993	3,15	2,0	З	1	0
5	20	1033	2,70	2,0	З	1	0
6	20	993	2,70	2,0	З	2	0
7	0	1033	2,70	2,0	К	1	0,2
8	0	993	2,70	2,0	К	2	0,2
9	20	1033	3,15	0	К	2	0
10	20	993	3,15	0	К	1	0
11	0	1033	3,15	0	З	2	0,2
12	0	993	3,15	0	З	1	0,2
13	20	1033	2,70	0	З	1	0,2
14	20	993	2,70	0	З	2	0,2
15	0	1033	2,70	0	К	1	0
16	0	993	2,70	0	К	2	0

Таблиця 3.13.

Матриця експерименту з ультразвукової обробки алюмінію АК7

№№	Технологічні чинники						
	L град	T К	W кВт	Y %	V град/с	K	Ф %
1	20	1013	3,15	1,0	К	2	0,2
2	20	973	3,15	1,0	К	1	0,2
3	0	1013	3,15	1,0	З	2	0
4	0	973	3,15	1,0	З	1	0
5	20	1013	2,70	1,0	З	1	0
6	20	973	2,70	1,0	З	2	0
7	0	1013	2,70	1,0	К	1	0,2
8	0	973	2,70	1,0	К	2	0,2
9	20	1013	3,15	0,42	К	2	0
10	20	973	3,15	0,42	К	1	0
11	0	1013	3,15	0,42	З	2	0,2
12	0	973	3,15	0,42	З	1	0,2
13	20	1013	2,70	0,42	З	1	0,2
14	20	973	2,70	0,42	З	2	0,2
15	0	1013	2,70	0,42	К	1	0
16	0	973	2,70	0,42	К	2	0

Таблиця 3.14.

Фізико-механічні властивості алюмінію А99 і силуміну
АК7 після реалізації матриці планування

№ п/п	Алюміній А99				Силумін АК7			
	Тимчасовий опір розриву Б _р , МПа	Пластичність σ, %	Твердість НВ	Щільність Р. 10 ³ кг/м ³	Тимчасовий опір розриву Б _р , МПа	Пластичність σ, %	Твердість НВ	Щільність Р. 10 ³ кг/м ³
1	88,6	11,6	27,03	2,720	170,2	1,60	65,6	2,720
2	74,0	10,8	27,69	2,716	157,8	1,30	74,3	2,703
3	68,0	18,3	29,63	2,707	95,7	1,80	54,3	2,700
4	63,5	21,1	24,78	2,710	133,0	1,00	63,9	2,708
5	56,5	15,8	25,48	2,705	113,4	0	59,5	2,703
6	60,0	13,3	24,78	2,708	115,2	0	62,4	2,702
7	91,0	20,0	25,48	2,706	150,7	1,60	68,8	2,705
8	88,0	26,6	27,69	2,721	170,2	1,60	68,8	2,710
9	65,0	33,3	29,63	2,709	150,6	0	68,8	2,704
10	64,0	49,7	24,78	2,701	150,6	0,45	68,8	2,706
11	59,0	28,3	27,69	2,715	118,8	0	56,8	2,702
12	38,5	57,6	21,59	2,691	124,0	0	59,5	2,707
13	40,2	39,1	17,03	2,700	116,9	0,3	58,1	2,702
14	44,0	31,6	20,16	2,701	104,5	0	58,1	2,699
15	61,0	50,8	25,48	2,705	163,0	1,6	68,8	2,711
16	60,5	45,3	25,48	2,704	143,5	0,3	67,1	2,711
вих. зраз ок	35,0	40,0	20,16	2,694	157,7	1,1	60,4	2,702

Параметрами оптимізації обрали основні фізико-механічні властивості (тимчасовий опір розриву, пластичність, твердість, щільність), а також розмір литого зерна силуміну.

Рівняння регресії за різних параметрів оптимізації мають такий вигляд, наприклад для твердості алюмінію А99

$$НВ = 25,28 - 0,7X_1 - 0,66X_2 + 1,33X_3 + 1,3X_4 + 1,38X_5 + 1,24X_6 - 0,98X_7,$$

а для силуміну АК7

$$НВ = 63,96 + 0,46X_1 - 1,32X_2 + 0,01X_3 + 0,71X_4 + 4,86X_5 - 1,25X_6 - 0,23X_7.$$

Зведені дані про коефіцієнти регресії під час оптимізації процесу ультразвукової обробки алюмінію А99 і силуміну АК7 наведено в табл. 3.15 і 3.16.

Таблиця 3.15.

Коефіцієнти регресії під час оптимізації процесу обробки алюмінію А99 ультразвуковим полем

№ п/п	Параметри оптимізації	Коефіцієнти регресії							
		b_0	$L(b_1)$	$T(b_2)$	$W(b_3)$	$Y(b_4)$	$V(b_5)$	$K(b_6)$	$\Phi(b_7)$
1	НВ (B^{iii})	25.28	-0.7	+0.66	1.33	+1.30	+1.38	+1.24	-0.98
2	$\sigma_{0,2}$ (B)	55.9	-1.1	+2.4	+1.8	+9.9	+8.8	+3.1	+1.4
3	σ_β (B^i)	63.9	-2.3	+2.4	+1.2	+9.8	+10.2	+2.8	+1.5
4	σ (B^{ii})	29.57	-3.92	-2.42	-0.74	-12.38	+1.46	-3.51	-1.37
5	P (B^{iiii})	2.707	+0.0011	+0.0011	+0.0014	+0.0044	+0.003	+0.0034	+0.0015

Таблиця 3.16.

Коефіцієнти регресії під час оптимізації процесу обробки алюмінію АК7 ультразвуковим полем

№ п/п	Параметри оптимізації	Коефіцієнти регресії							
		b_0	$L(b_1)$	$T(b_2)$	$W(b_3)$	$Y(b_4)$	$V(b_5)$	$K(b_6)$	$\Phi(b_7)$
1	НВ (B)	63,96	+0,46	-1,32	+0,01	+0,71	+4,86	-1,25	-0,23
2	$\sigma_{0,2}$ (B^i)	136,1	-1,2	-1,2	+1,4	+2,1	+21,0	-2,5	+3,0
3	σ_β (B^{ii})	0,72	-0,25	+0,14	+0,04	+0,39	+0,33	-0,05	+0,07
4	y (B^{iii})	12,81	+0,43	-0,22	+0,83	+0,001	+3,60	-0,28	+0,34
5	C (B^{iiii})	2,705	-0,0003	-0,0006	+0,0011	+0,0011	-0,34	+0,0008	+0,0008

Усі лінійні коефіцієнти для дослідів із чистим алюмінієм визнано статистично значущими, а рівняння адекватними. За загальної адекватності рівнянь для дослідів із силуміном АК7 не всі лінійні коефіцієнти визнано статистично значущими, тобто ступінь впливу деяких чинників на параметри оптимізації виявити не вдалося через певну специфіку експерименту (було взято вузькі інтервали) варіювання факторів).

Аналіз даних табл. 3.15 показує, що вплив технологічних факторів на властивості алюмінію проявляється досить сильно. Так, на весь комплекс міцнісних характеристик (σ_B , $\sigma_{0,2}$, НВ) позитивний вплив мають потужність ультразвуку, температура металу, швидкість його кристалізації, вміст легувального елемента і кратність обробки, причому на твердість цей вплив більш значний.

Вплив факторів на пластичність за знаком негативний, а ступінь впливу набагато інтенсивніший за зміцнення. Пластичність покращується завдяки збільшенню часу обробки і швидкості кристалізації.

Вплив усіх факторів на густину металу практично не помітний, якщо судити за абсолютною величиною коефіцієнта, але характерно те, що цей вплив у всіх випадках позитивний.

Дані щодо кратності обробки свідчать про зміцнювальний ефект при подвійній обробці, хоча економічно це робити недоцільно.

Для підвищення механічних властивостей алюмінію не слід допускати перегріву рідкого металу, а обробку вести якомога довше, заливку краще проводити в металеві форми, застосування рафінуючого флюсу не забезпечує помітного покращення властивостей, концентрацію легуючого елемента за цих умов потрібно зменшувати, потужність ультразвукового впливу слід збільшити.

Аналіз показує, що визначальними технологічними факторами, що впливають на структуру, алюмінія є легування і швидкість кристалізації. Початковий алюміній має досить велике макрозерно, транскристалізаційну будову від стінок форми до центру злитка. Макроструктура металу, що пройшов ультразвукову обробку, значно більш дисперсна, особливо за оптимального поєднання технологічних чинників. Структура металу, залитого в землю, навіть після ультразвукової обробки зберігає характер транскристалізації, хоча й істотно обмеженої, за зовнішнім контуром злитка спостерігаються дисперсні дезорієнтовані кристаліти. Кратність обробки практично непомітна, Незначні відмінності в макроструктурі зразків відбуваються у разі зміни часу обробки, потужності ультразвукового поля і температури металу.

Найдрібніше зерно отримано за дворазової обробки ультразвуком, незалежно від швидкості кристалізації. Зміна швидкості кристалізації під час переходу від піщаної форми до кокіля різко подрібнює мікрозерно. Зміна потужності ультразвукового поля і температури обробки металу не

справила істотним змінам.

Розгляд коефіцієнтів регресії для силуміну АК7 (табл. 3.16) показує, що найінтенсивніше на всю гаму властивостей, що розглядаються, впливає швидкість кристалізації b_5 , вміст заліза як домішки b_4 і час обробки ультразвуком b_1 . Найслабше всього проявляється дія флюсу b_7 і кратності ультразвукової обробки b_6 . Примітно, що в умовах ультразвукової обробки звичайного негативного впливу заліза не спостерігається, а навіть навпаки, зміцнювальний вплив залізовмісних фаз (типу Fe_3Al) в умовах ультразвукового впливу посилюється. У свою чергу, в результаті глобуляризації та подрібнення цих фаз (див. аналіз мікроструктур) підвищується пластичність металу, як порівняти з вихідним на $65^\circ C$ (з 1,1 до 1,8 %),

Макроструктура силуміну характеризується, як правило, високою дисперсністю та однорідністю. Під час заливання в піщану форму дисперсність зменшується, що одразу ж позначається на властивостях міцності та пластичності. Однак, загалом макроструктура силуміну дрібнозерниста, немає слідів транскристалізації, дендрити проглядаються дуже рідко, травлення ускладнене, структуру видно тільки при значних для цього методу збільшеннях (аж до $\times 40$).

Мікроструктура силуміну для оцінки ефективності впливу ультразвуку є ще досить чутливим параметром.

Особливо виразна структура зразків, залитих у піщані форми. У разі не оптимізованої технології обробки включення кремнію мають голкоподібний вигляд, характерний для немодифікованих силумінів. У разі оптимізації режимів обробки (досліди №№ 3 та 4) крем'яниста фаза глобуляризується, подрібнюється, добре проглядається фаза Fe_3Al , в результаті змінюється характер зламу, поліпшуються властивості сплаву.

Отримані експериментальні дані показують, що за відповідного вибору параметрів обробки високочастотна вібрація ефективно впливає на фізико-механічні властивості та структуру алюмінію і силуміну.

3.3 Обговорення результатів експериментів

Під час низькочастотних коливань хвилі, що збуджуються в оброблюваному середовищі, мають значну довжину,; під час ультразвукової обробки довжини хвиль значно нижчі. Цим визначаються деякі відмінності в механізмі впливу вібрації різних частот на розплав.

Порівняння обробки металу низькими і високими частотами на застосовуваних установках є правомірним, тому що в обох випадках концентратор (хвилевід) енергії коливань не вводили безпосередньо в розплав.

Обробка ультразвуком у потоці дає ефект при короткочасному впливі коливань на рідкий метал до початку кристалізації його в спокійних

умовах.

Обробка вібрацією в тиглі також показала ефективність тільки короткочасного впливу на рідкий метал до початку процесу кристалізації. І особливо характерно те, що механізм того й іншого впливу в основному однаковий.

Все це підтверджується ідентичними практичними результатами: подрібненням структури, усуненням транскристалізації, підвищенням фізико-механічних властивостей тощо.

Експеримент і в тому, і в іншому випадку показав, що немає необхідності обробляти метал безпосередньо до затвердіння, тобто впливати на руйнування зростаючих дендритів. Стівчаста структура не утворюється вже після короткочасної обробки (руйнування дендритів у нашому випадку - другорядний процес).

Область застосування установок того чи іншого типу в виробничих умовах значною мірою визначається досяжною потужністю джерел коливань. Існуючі інерційні пневматичні вібратори здатні генерувати значні збурювальні струси в досить широкому діапазоні частот. Суттєво також, що вони допускають просте регулювання частотно-силових параметрів. Це дає змогу проводити обробку в промислових умовах у режимах, близьких до оптимальних.

Випробування вібростенда в різних режимах дало можливість побудувати характеристичні криві, які дають змогу в доволі широкому діапазоні регулювати амплітудно-частотні характеристики вібраційної обробки розплаву. Крім того, було виявлено область ефективних частот і амплітуд, яка забезпечує отримання необхідного технологічного результату за відсутності викидів розплаву з тигля.

Чутливим параметром оцінки ступеня ефективності вібраційного обробки є макроструктура. Лите зерно істотно подрібнюється вже після двох хвилин обробки. В експериментах з перегрівом 50 К подрібнення зерна відбувається таким чином. У початковий період обробки на поверхні стінок тигля починається утворення твердої скоринки і одночасно відбувається руйнування зростаючих дендритів рідким металом, що інтенсивно циркулює внаслідок вібродії. Уламки твердої фази заносяться вглиб розплаву і потім частково або повністю розплавляються залежно від ступеня перегріву розплаву. Уламки, які не встигають розплавитися, стають додатковими центрами кристалізації. Зі збільшенням температури перегріву збільшується і кількість тих, що повністю розплавляються до досягнення рідким металом температури кристалізації уламків твердої фази, внаслідок чого величина зерна в зливку збільшується.

Процес кристалізації чавуну має свою специфіку. Збільшення дисперсності включень графіту, якої вдалося досягти, відбулося, в основному, за рахунок інтенсифікації процесів утворення і зростання центрів кристалізації, які перешкоджають виникненню сильно розвинених

включень графіту пластинчастої форми.

Під дією вібрації утворюється однорідна структура. Зміни у властивостях чавуну свідчать про те, що вібрація сприяє кристалізації за стабільною діаграмою системи залізо - вуглець, збільшуючи ступінь графітизації. Це пояснюється підвищенням швидкості утворення зародків графіту і диспергуванням включень.

Під час графітизації відбувається кристалізація вуглецю у вигляді графіту на наявних зародках. Отже, чим більше зародків, тим дрібніші включення графіту. Віброобробка розплаву сприяє підвищенню дисперсності графіту. На цій підставі можна впевнено вважати, що при вібрації відбувається збільшення кількості зародків. Включення графіту компактної форми кристалізуються також із центрів, число яких безперервно зростає. Подрібнення і більш рівномірне розташування включень графіту в металевій матриці підвищує механічні властивості.

Ефективність короткочасного впливу вібрації для чавуну підтверджується отриманими залежностями (3.11-3.14, 3.25, 3.26). Мабуть, істотну роль під час обробки вібрацією відіграє стан розплаву перед затвердінням.

Частота обробки в діапазоні 40-50 Гц є оптимальною, на наш погляд, з огляду на те, що енергетичні умови обробки в такому режимі є найсприятливішими для оптимальних швидкостей зародження і зростання кристалів.

За тривалості обробки вібрацією силумінів до кристалізації всередині злитка, мабуть, відбуваються розриви ще не затверділого металу.

Графічні залежності міцнісних характеристик і густини від прискорення вібрації для алюмінієвих сплавів і чавуну мають аналогічний вигляд, що дає змогу говорити про закономірності впливу низькочастотної вібрації на метали, різні за густиною. Підвищення фізико-механічних властивостей відбувається аж до прискорення 6-8 м/с², подальше збільшення перевантаження веде до зменшення ефективності впливу вібрації. За величини прискорення, більшої за g інтенсивне бурління, призводить до викидів металу з тигля. Відбувається захоплення з поверхні рідкої ванни оксидів, що виділяються під час вібрації, і неметалевих включень і втягування їх углиб розплаву, що призводить до зниження міцності властивостей. Одночасно зі зростанням перевантаження зростає й амплітуда коливань ($A = a/2\pi f^2$), що також негативно позначається на властивостях міцності. Крім того, вплив вібрації з перевантаженням, більшим за g , на метал аж до його повної кристалізації веде до небезпеки виникнення всередині розплаву, що твердіє, розривів і порожнеч, пов'язаних з ламкою ще неміцного скелета кристалічної решітки сплаву.

Згідно з побудованими експериментальними залежностями для чавуну (рис. 3.1, 3.4, 3.6, 3.8) густина при вібраційній обробці є визначальним фактором для механічних властивостей сплаву.

Експериментальні криві для алюмінію та силуміну (рис. 3.20, 3.21) мають аналогічний характер при зміні тривалості обробки. Щільність є об'ємною властивістю сплаву і залежить тільки від металу - його складу та структури, а отже, і від технології отримання. При цьому головну роль здебільшого відіграє структура, а для чавуну ще й кількість графіту і пір, які знижують його густину.

Вплив ступеня перегріву сплаву, як показали дослідження, не є визначальним фактором в умовах вібраційної обробки. Інтенсивне перемішування і циркуляція розплаву досить швидко знімають перегрів і вирівнюють температуру по всьому об'єму. Інтенсивна дегазація і видалення неметалевих включень під час обробки не тільки знімають шкідливі наслідки перегріву, а й підвищують механічні властивості.

Головною причиною впливу ультразвуку на розплав була активація частинок металу, що стають додатковими центрами кристалізації. Крім того, скоринка твердого металу, що утворюється на поверхні концентратора, яка під дією коливань руйнувалася, потоком розплаву змивалася з хвилеводу, фрагменти кристаликів разом зі струменем металу потрапляли в порожнину форми та служили додатковими центрами кристалізації. Підвищення температури в експерименті з алюмінієм від 993 до 1033 К сприяє збільшенню газонасиченості розплаву, що призводить до зниження пластичності алюмінію. Водночас із підвищенням температури збільшується розчинність твердих фаз, що позитивно впливає на міцність і твердість алюмінію.

Збільшення тривалості обробки ультразвуком взаємопов'язане зі збільшенням енергії коливань, що передається розплаву, і сприяє підвищенню міцності та пластичних властивостей завдяки істотному подрібненню литої структури, поліпшенню розчинності та перерозподілу домішок, які не контролюються звичайним аналізом.

Аналогічно, але з більшою інтенсивністю впливає легування ітрієм. Різке зниження пластичності обумовлюється появою твердих і тендітних ітрії-вмісних фаз, що мають малу розчинність у рідкому алюмінії.

З підвищенням швидкості кристалізації міцність і пластичність практично з однаковою інтенсивністю зростають за рахунок подрібнення литого зерна.

Використання флюсу підвищує міцнісні властивості металу, але, мабуть, його власний вплив невеликий, тому що за потужного впливу легування ітрієм пригнічується самостійний вплив флюсу.

Збільшення густини алюмінію закономірно зумовлює підвищення характеристик міцності та пов'язане з подрібненням структури. Характерно, що всі технологічні фактори позитивно впливають на цей параметр оптимізації, проте абсолютні значення коефіцієнтів регресії не дають змоги виявити ступінь цього впливу. Пояснюється це тим, що під час складання матриці планування було взято вузькі інтервали варіювання

деяких чинників, що позначилося на значеннях коефіцієнтів регресії.

Аналіз макро - і мікроструктури досліджуваного металу дає змогу оцінити ефективність обробки чистого і легованого ітрієм алюмінію. Вплив віброобробки на метал проявляється в усьому різноманітті явища: подрібнення зерна, зменшення товщини границь зерна, усунення транскристалізації, зміна розміру інтерметалідних фаз і характеру їхнього розподілу, зменшення ступеня розвитку зональної та дендритної ліквідації.

Інтенсивний вплив чинить потужність ультразвуку на величину зерна силуміну, причому навіть незначне збільшення її призводить до істотного його подрібнення. Отже, для підвищення ефективності технологічної обробки збільшення потужності є доцільним.

Збільшення вмісту заліза від 0,42 до 1,0 % справило позитивний вплив на всі механічні характеристики сплаву, причому найсильніше на його твердість. Отримані результати про такий характер впливу домішки заліза, яка зазвичай шкідливо впливає на механічні властивості алюмінієвих сплавів, аж до 1,0 % мають важливе значення для виробництва виливків із вторинних сплавів. Застосування ультразвукової обробки розплавів низькосортних вторинних алюмінієвих сплавів дає змогу відмовитися від традиційних методів компенсації негативного впливу домішок рафінуванням, модифікуванням і легуванням.

У роботі експериментально доведено реальну можливість підвищення властивостей алюмінієвих сплавів з великим вмістом заліза за рахунок їхньої ультразвукової обробки. Ефективність цієї обробки підтверджують отримані значення коефіцієнтів регресії. Це відкриває можливість широкого використання алюмінієвих сплавів з підвищеним вмістом заліза.

Збільшення швидкості кристалізації позитивно впливає на характеристики міцності сплаву, причому на твердість удвічі сильніше, ніж на міцність і в 15 разів сильніше, ніж на пластичність. Під час порівняння структури зразків, залитих у піщані форми і в кокіль, встановлено, що при збільшенні швидкості кристалізації від 2,8 до 5,4 /с дисперсність зерна зростає на 40-45 %.

Оцінити вплив потужності ультразвукового поля на твердість і пластичність силуміну не град стало можливим, тому що коефіцієнти регресії цих чинників малі за величиною і тому незначущі. На міцність сплаву потужність впливає позитивно, тобто при її збільшенні від 2,7 до 3,15 кВт міцність сплаву зростає, що узгоджується з відомими літературними даними. На відміну від широко поширеної думки про істотний позитивний вплив потужності ультразвукового поля на властивості оброблюваних сплавів, у наших дослідженнях цей вплив невеликий. Причина цього - порівняно малий інтервал варіювання значень потужності поля пружних коливань.

Дворазова обробка розплаву силуміну не дала змоги домогтися

очікуваного подальшого підвищення механічних властивостей сплаву, вона призвела до укрупнення мікрозерна. Дані щодо кратності обробки не є можливим порівняти з літературними, тому що нам не вдалося виявити подібних відомостей.

Збільшення після певної межі тривалості обробки розплаву негативно впливає на твердість сплаву і призводить до збільшення дисперсності мікрозерна. Отримані в результаті експерименту дані щодо твердості не збігаються із загальноприйнятими уявленнями. Причиною цього може бути наявність у розплаві дисперсних бульбашок пароподібних тетрахлоретану і хлориду алюмінію, що залишилися в розплаві продуктів рафінування, це робить сплав у певному сенсі більш пухким, і це побічно підтверджується зниженням щільності силуміну.

Збільшення температури оброблюваного розплаву з 973 до 1013 К негативно впливає на міцність і твердість, але позитивно на пластичність, причому ступінь цього впливу на міцність і пластичність приблизно в 10 разів слабкіше, ніж на твердість.

Мабуть, під час нагрівання відбувається часткова дезактивація домішок, що знаходяться в розплаві. При короткочасній обробці ультразвуком енергія коливань частково витрачається на зменшення ступеня перегріву сплаву, а активовані домішки при цьому не встигають стати додатковими центрами кристалізації, мікрозерна укрупнюються, а фізико-механічні властивості знижуються, але не нижче вихідних значень.

Рафінування силуміну флюсом сприяє збільшенню міцності та зростанню розмірів зерна за незначного зниження твердості. Визначити вплив цього фактора на пластичні властивості важко з огляду на незначимість коефіцієнта регресії.

Значення коефіцієнтів регресії такого параметра оптимізації як щільність суперечливі. Незважаючи на те, що щільність деяких злитків, підданих обробці, нижча за густину вихідного металу, значення коефіцієнтів регресії чотирьох технологічних чинників (потужність ультразвуку, домішки заліза, кратність обробки і рафінування флюсом) показують сприятливий вплив їх на збільшення густини,

Примітний факт зміцнювальної дії домішки заліза і дворазової обробки на щільність.

Ймовірно, комплексний вплив багатьох чинників створює умови для ущільнення силуміну за дворазової обробки ультразвуком і підвищеного вмісту домішок.

Негативний вплив на густину швидкості кристалізації на перший погляд важко пояснити. І проте, такий результат свідчить про те, що під час багатофакторного експерименту відбувається спільний вплив одночасно декількох технологічних факторів. У цьому разі можливо, що під час кристалізації в кокіль активовані домішки не встигають справити свого позитивного впливу на зародження додаткових центрів кристалізації і тим

самим на подрібнення структури. Абсолютні значення коефіцієнтів регресії вказують на слабкий вплив технологічних факторів у межах обраних інтервалів варіювання на густину силуміну.

Аналіз макро- і мікроструктури показує, що вплив ультразвуку на розплав силуміну аналогічний його дії на чистий алюміній. Внаслідок багатфакторності експерименту просте зіставлення структури одну з одною ускладнене, проте дані дають якісне підтвердження отриманим кількісним результатам дослідження та оптимізації процесу ультразвукової обробки силуміну.

Так, при зростанні механічних властивостей і щільності структура має яскраво виражену дрібнозернисту будову. Подрібнює структуру збільшення швидкості кристалізації та підвищення потужності коливань, що вводяться в розплав. Водночас вплив флюсу в умовах обробки невеликий і практично не впливає на величину зерна.

Короткочасного впливу вібрації ультразвукової частоти достатньо для істотного подрібнення литої структури і підвищення фізико-механічних властивостей сплаву. Відпадає необхідність обробляти розплав безпосередньо протягом усього періоду кристалізації. Технологічне здійснення способу обробки в потоці в умовах виробництва доволі просте й економічне. Обробка ж таким способом низькосортних вторинних алюмінієвих сплавів ефективна не тільки з погляду поліпшення якості металу, а й економічно доцільна, оскільки дає можливість застосовувати ці дешеві сплави для виготовлення виливків відповідального призначення.

3.4. Випробування технології лиття чавуну в умовах вібраційної обробки розплаву

Для випробування вібраційної обробки чавуну на реальних виливках було обрано деталь "горлове кільце", яка застосовується у склоформувальних машинах. Деталь працює в складних умовах періодичних температурних перепадів. Згідно з ОСТ 27-30-241-82 деталь повинна простояти 150-170 тисяч знімачів форм, чого не завжди вдається досягти через руйнування крайок поверхні, що перебувають у контакті з рідким склом (рис. 3.23).

Крім цього дефекту, суттєвим є брак під час лиття заготовок під деталь. Основні види браку: пористість виливків, недоливи, раковини на оброблюваних поверхнях. Приховані внутрішні дефекти, які виявляються тільки під час механічної обробки, ще більше ускладнюють у виробничих умовах відсоток браку за ливарними дефектами,

Для обробки вібрацією реальних виливків використовували лабораторний вібростенд, оскільки потужність вібратора була достатньою для обробки виливків разом із формою загальною масою в кілька десятків кілограм.

Чорнова маса виливки з ливниковою системою становила 5,4 кг.

Форму для вилівка напівболванки горлового кільця виготовляли з формувальної суміші такого складу: оборотна суміш 92-94 %; кварцовий пісок 5-7 %; вогнетривка глина 1,0 %; деревна тирса 0,3 %; кріпитель СБ 2,0 %.

Виливок і деталь представлені на рис. 3.24.

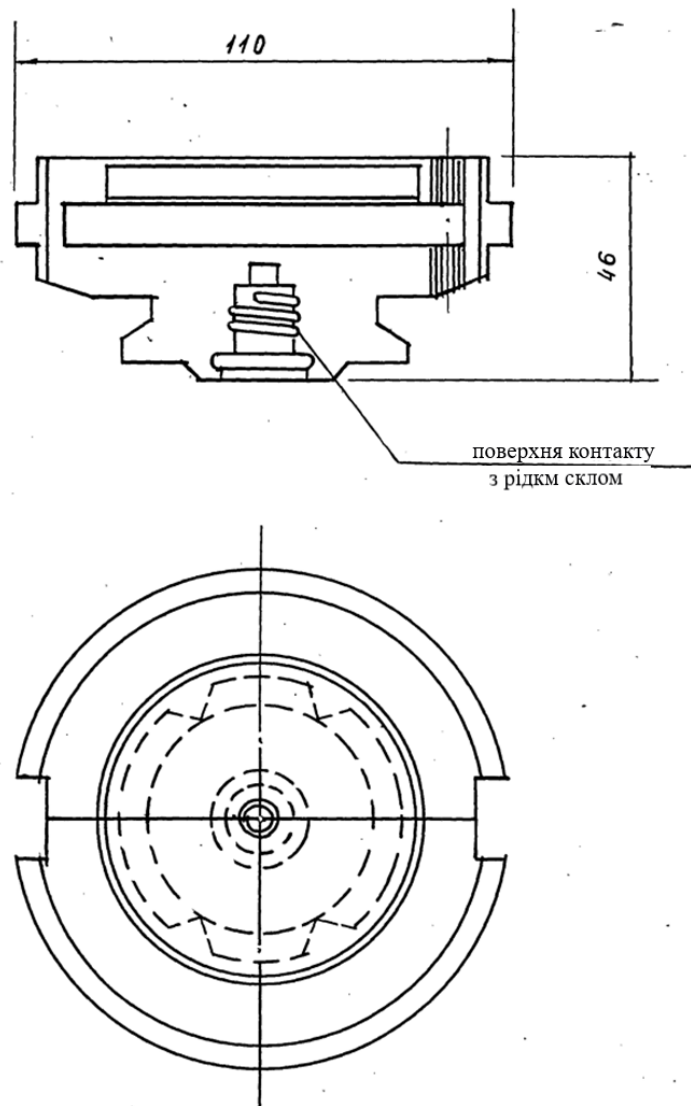


Рис.3.23. Ескіз деталі горлове кільце



Рис.3.24. Виливок і деталь горлове кільце

Форму встановлювали на вібростенд і закріплювали струбцинами. Уся операція з установа і закріплення форми займала не більше ніж 40-60 с. Після закріплення форма заливалася чавуном із чайникового ковша і вмикали вібратор. Загальний час за операцією обробки однієї виливки не перевищував 4-5 хв .

Дослідні виливки оброблялися за таким режимом: частота вібрації 40 Гц, амплітуда 0,14 мм, тривалість обробки 2 хв. Виливки піддавалися розрізанню і вивченню фізико-механічних властивостей у різних її частинах. Розподіл властивостей за зонами розрізання дослідного і вихідного виливків наведено в табл. 3.17.

Як видно з даних, представлених у табл. 3.17, усі властивості виливки після віброобробки значно вищі за властивості звичайних виливків. Форма графітових включень у дослідних виливках практично однакова по всьому перерізу виливки і набагато компактніша, ніж у виливка без обробки.

Таблиця 3.17.

Фізико-механічні властивості і розмір включень графіту в дослідно-промислових виливках чавуну

Зона розрізання виливки	Твердість НВ	Щільність $P \cdot 10^3 \text{кг/м}^3$	Тимчасовий опір розриву, σ_B , МПа	Розмір включень графіту за ГОСТ 3443-77
відливання з обробкою вібрацією				
1	<u>203</u> 209	<u>7,200</u> 7,194	<u>187</u> 191	Гроз 90 (4 бал)
2	<u>207</u> 201	<u>7,198</u> 7,205	<u>183</u> 189	Гроз 90 (4 бал)
3	<u>195</u> 200	<u>7,215</u> 7,225	<u>191</u> 190	Гроз 90 (4 бал)
4	<u>201</u> 210	<u>7,220</u> 7,223	<u>190</u> 192	Гроз 90 (4 бал)
1	<u>165</u> 162	<u>7,090</u> 7,085	<u>143</u> 142	Гроз 360 (6 бал)

2	$\frac{160}{167}$	$\frac{7,070}{7,052}$	$\frac{142}{144}$	Гроз 360 (6 бал)
3	$\frac{163}{167}$	$\frac{7,089}{7,095}$	$\frac{145}{144}$	Гроз 360 (6 бал)
4	$\frac{163}{169}$	$\frac{7,091}{7,100}$	$\frac{143}{144}$	Гроз 360 (6 бал)

Примітка : чисельник - верхня частина виливки,
знаменник - нижня частина виливки.

Оцінка якості металу дослідних виливків показала, що отримано істотне ущільнення чавуну(щільність до обробки в середньому 7,084 г/см³, після обробки 7,210 г/см²), підвищення міцності на 26 % і твердості на 21 %.

Згідно з ОСТ 27-30-241-82 заводом для відливання заготовок під деталі типу "горлове кільце" планується застосовувати легований хромом і молібденом чавун у кількості: Cr = 0,2 - 0,3 % . Ni = 0,3-0,6 %, що підвищить собівартість випущених деталей. Застосування віброобробки чавуну дасть змогу відмовитися надалі від застосування легування цими елементами без шкоди для якості виливків.

Досягнуте зменшення розміру включень пластинчастої форми графіту (з 6 по 4 бал ГОСТ 3443-77) і при певних режимах утворення компактної форми графітових включень сприяє збільшенню опору чавуну ерозійному руйнуванню під дією розплавленої скляної маси.

З дослідних виливків були виготовлені деталі "горлове кільце" і відправлені на завод для подальших випробувань безпосередньо в натурних умовах на склоформувальній машині.

Проведені випробування властивостей дослідних виливків за попередніми розрахунками дають збільшення їхньої стійкості щонайменше в 1,5 рази під час роботи в контакті з рідкою скляною масою. Деталі, виготовлені з дослідних виливків, проходять натурні випробування.

3.5 Дослідно-промислове випробування технології ультразвукової обробки силуміну АК7

Дослідно-промислове випробування способу ультразвукової обробки в потоці вторинного алюмінієвого сплаву АК7 було здійснено в умовах ливарного цеху .

Пристрій для обробки силуміну в потоці було встановлено на машині лиття під тиском безпосередньо між дозатором і пресформою так, що порція металу, необхідна для виготовлення одного виливка, оброблялася ультразвуком на шляху в камеру пресування.

Вибіркова перевірка виливків дослідної партії гальмівних колодок (рис. 3.25).показала зростання міцнісних властивостей обробленого

металу, поліпшення якості виливків за рахунок зменшення пористості через зменшення пористості (див. табл. 3.18)

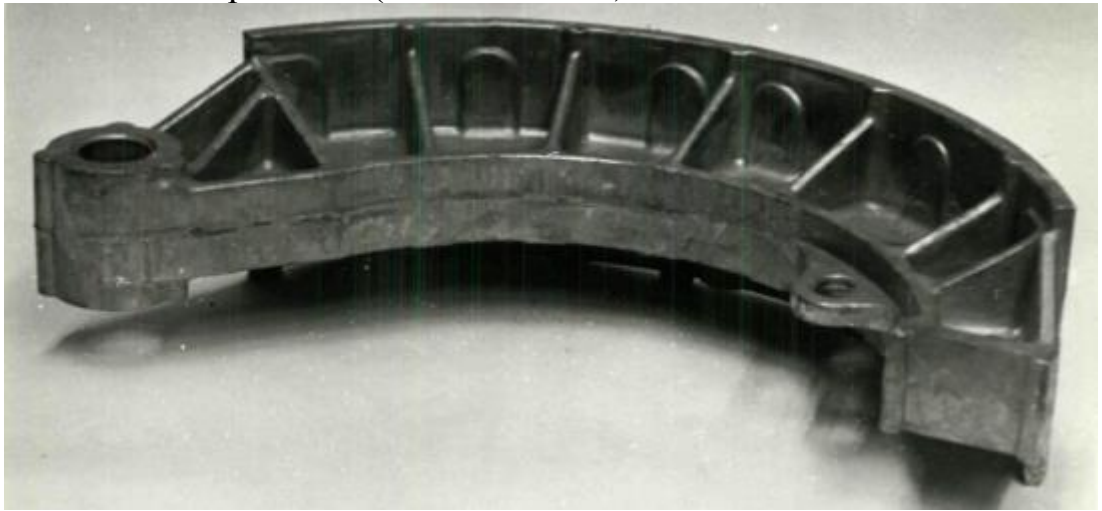


Рис.3.25. Гальмівна колодка

Таблиця 3.18
Фізико-механічні властивості дослідних виливків із силуміну АК7

№ п/п	Тимчасовий опір розриву, МПа	Твердість, НВ	Щільність, Р.10 ³ кг/м ³
1	163	74,3	2,718
2	170	80,2	2,720
3	170	79,1	2,724
4	168	81,0	2,711
5	165	78,3	2,720
6	165	78,3	2,720
7	169	80,0	2,718
8	171	79,5	2,715
9	168	78,4	2,717
10	170	79,9	2,713
без обробки	145	63,7	2,695

Вигляд зламів обробленої та вихідної колодок показано на рис. 3.26.

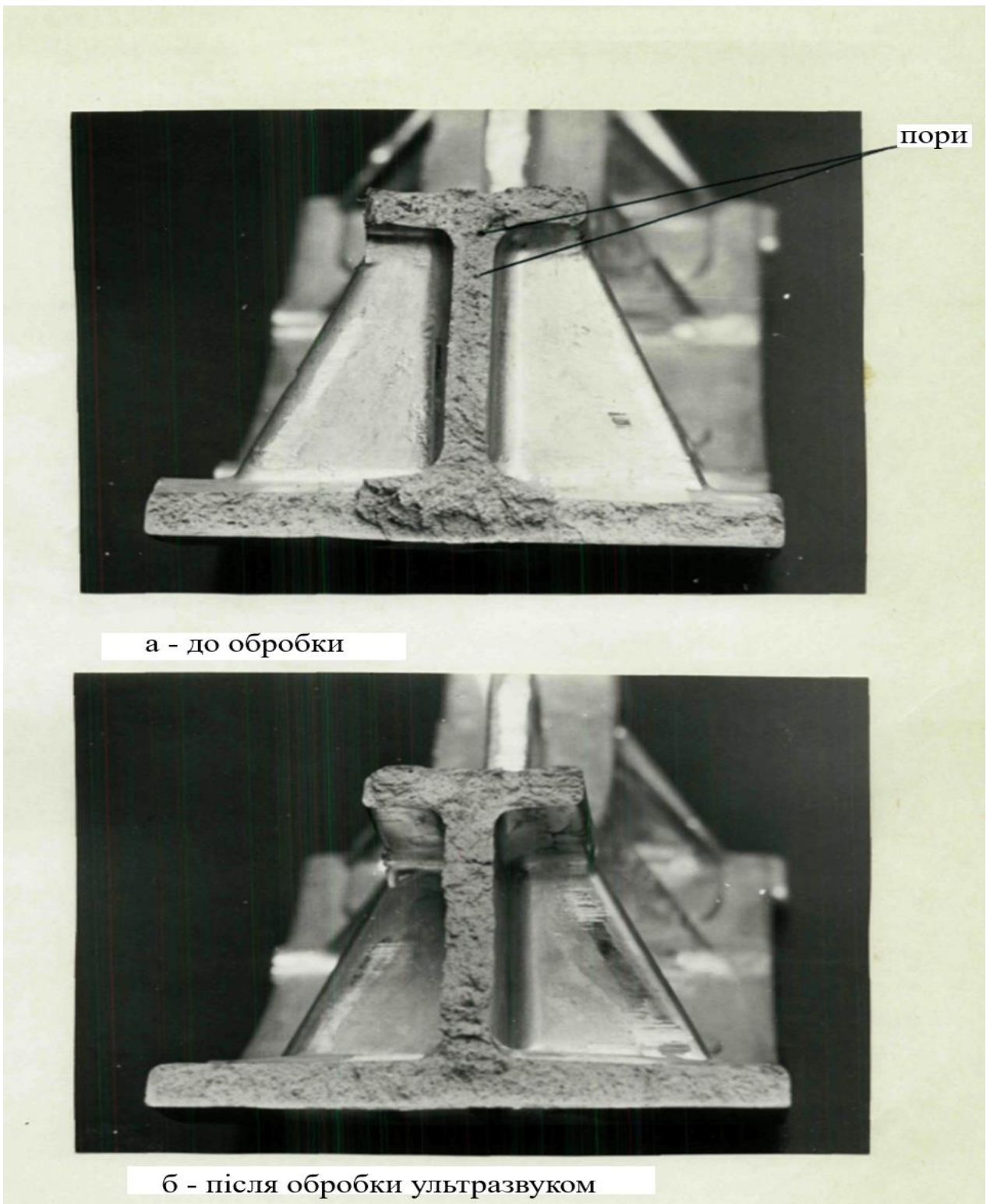


Рис.3.26. Вид зламів гальмівної колодки

З рисунка видно, що структура зламу обробленої ультразвуком дрібнозерниста з одиничними порами, у той час як у необробленого металу більш грубий злам і пористість практично по всьому перерізу.

Висновки до розділу

1. Підвищення щільності металу при вібраційній обробці чавунних виливків, що кристалізуються, призвело до зростання механічних властивостей і практично повного скорочення пористості по всьому об'єму виливка.

2. Вібраційна обробка забезпечила отримання більш дрібних включень графіту пластинчастої форми, а також графіту компактної форми порівняно з вихідною структурою чавуну.

3 Завдяки поліпшенню властивостей сірого чавуну за рахунок вібраційного оброблення відпадає необхідність надалі застосовувати легувальні елементи для поліпшення якості не тільки виробів цієї даної номенклатури, а й низки інших виробів із сірого чавуну з пластичастою формою графіту аналогічного призначення.

4. Застосування вібраційної обробки чавуну дало змогу скоротити брак виливків.

5. Ультразвукова обробка вторинного алюмінієвого сплаву АК7 у потоці під час виробництва гальмівних колодок забезпечує нейтралізацію шкідливого впливу домішок і підвищує фізико-механічні чеські властивості виливків. Обробка силуміну істотно скоротила пористість виливків.

6. Завдяки поліпшенню властивостей силуміну за рахунок ультразвукової обробки рідкого металу практично відпадає необхідність у додатковому рафінуванні та модифікуванні.

7. Застосування для виготовлення гальмівних колодок обробленого ультразвуком вторинного алюмінієвого сплаву АК7 дає змогу відмовитися надалі від використання для цих цілей дорожчого первинного алюмінієвого сплаву .

4. ЕКОНОМІКА ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВІБРАЦІЙНОЇ ОБРОБКИ РОЗПЛАВІВ

4.1. Теоретичне обґрунтування вибору технології вібраційної обробки розплавів з метою підвищення якості литих виробів

Вібраційна обробка розплавів є прогресивною технологією, яка використовується для покращення фізико-механічних властивостей литих виробів. Вона дозволяє мінімізувати дефекти кристалізації, підвищити однорідність структури металу та знизити витрати на подальшу механічну обробку виробів. У даному обґрунтуванні розглянемо принципи технології, її переваги та механізми впливу, а також економічну та практичну ефективність.

1. Актуальність проблеми

Ливарне виробництво часто стикається з такими проблемами, як: пористість металу через виділення газів, утворення тріщин, шлакових включень та сегрегацій та нерівномірна структура кристалізації, яка призводить до зниження механічних властивостей. Традиційні методи обробки, такі як шлакове рафінування чи барботаж, не завжди забезпечують потрібну якість, особливо для відповідальних деталей. Вібраційна обробка розв'язує ці проблеми завдяки активному впливу механічних коливань на розплав.

2. Принцип дії вібраційної обробки;

Вібраційна обробка — це технологія, при якій на розплавлений метал впливають механічні коливання певної частоти та амплітуди. Ці коливання створюють динамічний вплив на рідкий метал, що сприяє зміні умов його кристалізації. Механізми впливу: руйнування газових бульбашок (вібрації змушують гази, розчинені в металі, підніматися на поверхню розплаву, це знижує пористість у кінцевому виробі), подрібнення зерна (коливання стимулюють утворення великої кількості центрів кристалізації, що призводить до формування дрібнозернистої структури), розподіл домішок (нерівномірний розподіл легувальних елементів (сегрегація) мінімізується завдяки постійному перемішуванню), зменшення внутрішніх напружень (вібрації сприяють рівномірному охолодженню та знижують ризик утворення мікротріщин).

3. Обґрунтування вибору вібраційної технології

Переваги вібраційної обробки: покращення якості металу (зниження газо- та шлакових включень, формування дрібнозернистої структури, що підвищує міцність і пластичність), економічна ефективність (зменшення браку, скорочення витрат на додаткову механічну обробку), універсальність (метод може бути застосований до більшості металів і сплавів, зокрема чавуну, сталі та алюмінію), екологічність (

зменшення кількості відходів (шлак, дефекти).. Фактори вибору : тип металу (для чавуну вібрації сприяють усуненню графітових дефектів, для алюмінієвих сплавів зменшують газотримання) , призначення виробу (відповідальні деталі потребують високої однорідності та довговічності), масштаби виробництва (у масовому виробництві впровадження технології є економічно виправданим).

4. Технічні параметри технології

Основні параметри : енерговитрати (витрати на вібраційну обробку складають близько 5–10% від загальної енергетичної витрати на плавлення).

Порівняння з іншими методами у таблиці 4.1

Таблиця 4.1.

Параметр	Вібраційна обробка	Газове рафінування	Модифікування
Підвищення якості	Високе	Середнє	Високе
Дегазація	Висока	Висока	Низька
Економічна ефективність	Висока	Середня	Висока
Застосування до сплавів	Широке	Вузьке	Широке

5. Економічне обґрунтування

Зниження браку: у масовому виробництві дефектність знижується з 10% до 2–3%. При вартості однієї тонни литва 25 000 грн економія становить 1 000–1 500 грн/т. Збільшення міцності виробів (Покращення структури дозволяє зменшити розміри деталей без втрати функціональності, що знижує витрати на матеріали). Окупність (Впровадження системи вібраційної обробки окупається за 1–2 роки за умов обсягів виробництва понад 100 тонн на місяць).

Ця технологія є перспективною для застосування як у серійному, так і в дрібносерійному виробництві, особливо для відповідальних деталей.

4.2. Визначення собівартості технології вібраційної обробки на прикладі чавунного розплаву

Собівартість у ливарному виробництві — це сукупність витрат, які підприємство несе на виготовлення литих виробів, починаючи від придбання сировини і закінчуючи отриманням готової продукції. Вона є

важливим економічним показником, який впливає на конкурентоспроможність підприємства та рентабельність виробництва.

1. Основні складові собівартості в ливарному виробництві

Собівартість у ливарному виробництві складається з прямих витрат, які можна віднести до конкретного виробу, та непрямих витрат, що розподіляються між усіма виробами.

1.1. Прямі витрати

1. Матеріальні витрати:

Основні матеріали (метали і сплави): наприклад, чавун, сталь, алюміній.

Допоміжні матеріали: формувальні суміші (пісок, глина), шлакові флюси, легувальні добавки.

Витратні матеріали: мастила, фарби, ізоляційні покриття.

2. Енергетичні витрати:

Електроенергія або паливо для плавлення металу.

Енерговитрати на технологічні процеси (вібраційна обробка, термічна обробка).

3. Трудові витрати:

Заробітна плата працівників, зайнятих у виробництві.

Витрати на підготовку та підвищення кваліфікації персоналу.

1.2. Непрямі витрати

1. Амортизація обладнання:

Плавильні печі, машини для лиття, системи очищення розплаву.

2. Витрати на обслуговування обладнання:

Ремонт і технічне обслуговування.

3. Адміністративні витрати:

Зарплата управлінського персоналу, логістика, зберігання матеріалів.

4. Контроль якості та екологія:

Витрати на аналіз хімічного складу, перевірку механічних властивостей, утилізацію відходів.

Собівартість технології вібраційної обробки чавунного розплаву включає витрати на сировину, енергію, обладнання, робочу силу, контроль якості та додаткові витрати, пов'язані із впровадженням та експлуатацією вібраційної технології. Ця технологія забезпечує підвищення якості литих виробів завдяки зменшенню пористості, поліпшенню структури та мінімізації дефектів.

Складові собівартості на 1 тону чавунного розплаву

1. Сировинні витрати

Чавунні злитки:

Для плавлення використовується 600 кг злитків за ціною 20 грн/кг:

$$600\text{кг} \times 20\text{грн/кг} = 12000\text{грн.}$$

Металевий лом:

Додається 400 кг лому за ціною 12 грн/кг:

$$400\text{кг} \times 12\text{грн/кг} = 4800\text{грн.}$$

Легувальні добавки:

Додається 20 кг добавок (наприклад, кремній, марганець) за ціною 80 грн/кг:

$$20\text{кг} \times 80\text{грн/кг} = 1600\text{грн.}$$

Разом сировина:

$$12\,000\text{ грн} + 4\,800\text{ грн} + 1\,600\text{ грн} = 18\,400\text{ грн}$$

2. Енергетичні витрати

Електроенергія на плавлення:

Для плавлення 1 тонни чавунного розплаву необхідно 400 кВт·год:

$$400\text{кВт} \cdot \text{год} \times 8,50\text{грн} = 3400\text{грн.}$$

Електроенергія для вібраційної обробки

Для вібраційної обробки використовується 100 кВт·год:

$$100\text{кВт} \cdot \text{год} \times 8,50\text{грн} = 850\text{грн.}$$

Разом енергетичні витрати:

$$3400 + 850 = 4250\text{грн.}$$

3. Витрати на обладнання

Амортизація печі та вібраційного обладнання:

Умовно 1 000 грн/т.

Обслуговування обладнання:

Умовно 300 грн/т.

Разом на обладнання:

$$1\,000\text{ грн} + 300\text{ грн} = 1\,300\text{ грн}$$

4. Трудові витрати

Розрахунок на 1 тону продукції:

При середній місячній заробітній платі 15 000 грн і обробці 200 тонн на місяць :

$$15\,000 : 200 = 75 \text{ грн/т}$$

Для обслуговування технологічного процесу, враховуючи декількох працівників (оператори печі, техніки) , умовно встановимо витрати:

$$75 \text{ грн/т} \times 4 \text{ працівники} = 300 \text{ грн/т}$$

5. Контроль якості та екологія

Лабораторний контроль якості розплаву: Хімічний та фізичний аналіз металу —

$$400 \text{ грн/т.}$$

Утилізація шлаків та інших відходів: 200 грн/т.

Разом на контроль та екологію:

$$400 \text{ грн} + 200 \text{ грн} = 600 \text{ грн.}$$

Таблиці 4.2

Загальний розрахунок собівартості

Категорія витрат	Сума (грн/т)
Сировина	18400
Енергетичні витрати	4250
Витрати на обладнання	1300
Трудові витрати	300
Контроль якості та екологія	600
Загальна собівартість	24850

Економічна ефективність вібраційної обробки

1. Зменшення браку

До впровадження технології: 10% браку при середній вартості 1 тонни литва 24 850 грн (еквівалент 2 500 грн втрат).

Після впровадження: 2–3% браку, втрати скорочуються до 700 грн/т.
Економія на 1 тонні:

$$2\ 500\ \text{грн} - 750\ \text{грн} = 1\ 750\ \text{грн}$$

2. Покращення якості

Збільшення міцності виробів на 10–15% дозволяє використовувати меншу кількість металу при проєктуванні.

Скорочення витрат на механічну обробку через меншу кількість дефектів.

3. Окупність технології

Додаткові витрати на вібраційне обладнання складають близько 200 000–300 000 грн для середньогабаритного виробництва.

При щомісячному виробництві 100 тонн економія на зниженні браку та покращенні якості складає

$$1\ 750\ \text{грн} \times 100\ \text{т} = 175\ 000\ \text{грн}$$

Окупність інвестицій: $200\ 000\ \text{грн} \div 175\ 000\ \text{грн/міс} \approx 1,1$ року

Висновки

1. Собівартість 1 тонни чавунного розплаву з вібраційною обробкою становить 24850 грн/т.

2. Впровадження технології дозволяє скоротити брак і підвищити якість литва, що робить її економічно ефективною.

3. Технологія окупається протягом 1–2 років за умов серійного виробництва понад 100 тонн на місяць.

4.3. Визначення техніко-економічних показників порівнювання технологій

Техніко-економічні показники (ТЕП) — це сукупність кількісних і якісних характеристик, які використовуються для оцінки ефективності технологій. Вони дозволяють порівнювати різні варіанти виробничих процесів з точки зору їх економічної вигоди, продуктивності, якості продукції та впливу на навколишнє середовище.

1. Основні техніко-економічні показники

1.1. Технологічні показники

1.1.1. Продуктивність (Q):

Кількість продукції, виготовленої за одиницю часу:

$$Q = \frac{\text{Обсяг продукції}}{\text{Час виробництва}}$$

Наприклад, у ливарному виробництві продуктивність вимірюється в тоннах/зміню.

2. Коефіцієнт використання матеріалу ($K_{\text{мат}}$):

Відношення маси корисного виробу до маси використаного матеріалу:

$$K_{\text{мат}} = \frac{\text{Маса готового виробу}}{\text{Маса вихідного матеріалу}}$$

Високий коефіцієнт свідчить про раціональне використання матеріалів.

3. Рівень дефектності ($R_{\text{деф}}$):

Частка браку у загальному обсязі виготовленої продукції:

$$R_{\text{деф}} = \frac{\text{Маса браку}}{\text{Маса виготовленої продукції}} \times 100\%$$

4. Якість виробів:

Параметри, які характеризують фізико-механічні властивості (міцність, зносостійкість, однорідність структури).

1.2. Економічні показники

1. Собівартість продукції (C):

Загальні витрати на виготовлення одиниці продукції:

$$C = \frac{\text{Сукупні витрати}}{\text{Обсяг виготовленої продукції}}$$

2. Капітальні витрати ($K_{\text{кап}}$):

Інвестиції, необхідні для впровадження технології (вартість обладнання, монтажу, навчання персоналу).

3. Енерговитрати (E):

Споживання енергії на одиницю продукції:

$$E_{\text{енер}} = \frac{\text{Енерговитрати}}{\text{Обсяг продукції}}$$

4. Рентабельність (R):

Відношення прибутку до собівартості:

$$R = \frac{\text{Прибуток}}{\text{Собівартість}} \times 100\%$$

5. Термін окупності (Т):

Час, за який витрати на впровадження технології окупляться:

$$T = \frac{K_{\text{кап}}}{\text{Щорічний чистий прибуток}}$$

1.3. Екологічні показники

1. Викиди в атмосферу (V):

Кількість шкідливих речовин, що виділяються під час процесу (в тоннах/рік).

2. Відходи виробництва (W):

Обсяг відходів, що утворюються на кожну одиницю продукції.

3. Споживання води та енергії:

Ресурси, необхідні для забезпечення роботи технології.

2. Порівняння технологій за ТЕП

Таблиця 4.3.

Порівняння традиційного лиття та лиття з вібраційною обробкою

Показник	Традиційне лиття	Лиття з вібраційною обробкою	Відхилення
Продуктивність (Q), т/зміну	10	12	↑
Коефіцієнт використання матеріалу ($K_{\text{мат}}$)	0,85	0,92	↑
Рівень дефектності ($R_{\text{д}}$), %	10	3	↓
Собівартість продукції (С), грн/т	25 000	23 500	↓
Енерговитрати ($E_{\text{д}}$), кВт·год/т	500	550	↑
Капітальні витрати (К), грн	1 000 000	1 200 000	↑
Термін окупності (Т), років	3,5	2,8	↓

Викиди (V), кг/т	50	40	↓
------------------	----	----	---

Висновки до розділу

1. Вібраційна обробка розплаву є ефективною технологією для підвищення якості литих виробів. Її застосування дозволяє: забезпечити високу однорідність структури металу, знизити кількість дефектів (пористості, тріщин), підвищити економічну ефективність і конкурентоспроможність виробів.

2. Лиття з вібраційною обробкою має вищу продуктивність і коефіцієнт використання матеріалів, що знижує витрати.

3. Зменшення дефектності до 3% дозволяє економити на виправленні браку.

4. Незначне збільшення енерговитрат компенсується зниженням собівартості.

5. Термін окупності вібраційної технології менший, що робить її економічно доцільною.

6. Порівняння технологій за техніко-економічними показниками дозволяє вибрати оптимальний варіант для виробництва. Важливо враховувати: продуктивність, ефективність використання ресурсів, собівартість і термін окупності, екологічний вплив. Ретельний аналіз усіх показників сприяє прийняттю економічно обґрунтованого рішення щодо впровадження нових технологій.

7. Вібраційна обробка розплавів — це інноваційна технологія, яка не лише покращує якість продукції, але й значно оптимізує економічні аспекти ливарного виробництва. Економічні результати від її впровадження проявляються у зменшенні витрат, підвищенні рентабельності та скороченні часу виробництва.

8. Вібраційна обробка розплавів є економічно доцільною технологією для середньо- та великосерійного виробництва литих виробів. Її впровадження дозволяє знизити собівартість, скоротити дефекти та підвищити продуктивність, що позитивно впливає на рентабельність підприємства. Попри початкові капітальні витрати, технологія окуповується протягом 1–2 років, забезпечуючи довгострокову економічну вигоду.

5. ОЦІНКА СТАНУ УМОВ ПРАЦІ І БЕЗПЕКИ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ ПІСЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Вібраційне оброблення чавуну та алюмінієвих сплавів передбачає використання джерел ультразвуку, а також обладнання для утворення низькочастотної вібрації.

Для ефективного оброблення виливків у піщаних і металевих формах в роботі запропоновано конструкцію пневматичного кулькового вібробудувача підвищеної потужності.

Вібрація - це рух точки або механічної системи, при якому відбувається по чергове зростання і спад у часі значень скалярних величин.

З точки зору передачі на людей вібрація поділяється на загальну, що проходить на тіло людини, що стоїть або сидить, і локальну, що передається через руки.

Вібрація може діяти у вертикальному і в горизонтальному напрямках; при впливі на людину вона зветься відповідно вертикальною та горизонтальною.

За джерелом виникнення розрізняють такі види вібрації:

- локальну, що передається від ручного механізованого інструменту (з двигунами), органів ручного керування машин та обладнання;

- локальну, що передається від ручного немеханізованого інструменту (без двигунів), наприклад, від рихтувальних молотків;

- загальну 1-ї категорії - транспортну вібрацію, що впливає на людину на робочих місцях самохідних і причіпних машин при їх русі по пересіченій місцевості та дорогах. До джерел транспортної вібрації відносяться трактори, сільськогосподарські машини, автомобілі, вантажні машини, рейковий транспорт та ін;

- загальну 2-ї категорії - транспортно-технологічну вібрацію, що впливає на людину на робочих місцях машин, що пересуваються спеціально підготовленими поверхнями виробничих приміщень та промислових майданчиків. Джерелами транспортно-технологічної вібрації служать екскаватори, крани, колійні машини та ін;

- загальну 3-ї категорії - технологічну вібрацію, що впливає на людину на робочих місцях стаціонарних машин. Технологічну вібрацію створюють верстати, електричні машини, ковальсько-пресове обладнання, вентилятори, насосні агрегати та ін.

Отже, обладнання для утворення низькочастотної вібрації є джерелом загальної вібрації 3-ї категорії яка може діяти на постійних робочих місцях виробничих приміщень підприємств.

Ступінь впливу вібрації на людину залежить від її спектрального складу, тривалості, напрямку, місця застосування та джерела виникнення.

Вібрація впливає на функціональний стан людини (підвищується стомлюваність, збільшується час рухової та зорової реакцій, порушується діяльність вестибулярного апарату) та на фізіологічний (порушується серцево-судинна діяльність та робота опорно-рухового апарату, а також уражаються м'язові тканини та суглоби).

Особливістю дії вібрації на людину є можливість резонансу на власних частотах окремих частин організму. Власні частоти деяких частин тіла людини мають наступні значення: для ніг та рук 2-8 Гц, голови 8-27 Гц, хребта 12-15 Гц. Вібрації з частотами до 1 Гц викликають нудоту, 1-10 Гц - утруднення дихання, 10-100 Гц - погіршення серцево-судинної діяльності.

Загальна вібрація, за інших рівних умов, більш шкідлива, ніж локальна, а вертикальна небезпечніша за горизонтальну.

Віброізоляція є основним способом віброзахисту, який полягає в установці вібруючого джерела (агрегату, механізму тощо) на віброізоляторі.

Спрощено систему з віброізоляцією можна подати у вигляді маси, встановленої на пружини з демпфером.

Основні конструктивні елементи віброізоляції - це віброізолятори, демпфери, сильфони, а елементи вібропоглинання - вібропоглинаючі покриття, вібропоглинаючі конструкції («сендвіч-конструкції») і вібродемпфуючий сплав.

Віброізолююча система включає кілька елементів:

- пружний елемент, що навантажується масою об'єкта, що віброізолюється, і забезпечує зниження передачі збурювальних сил (віброізоляцію);

- демпфер, що обмежує (гасить) коливання в області резонансних частот; це може бути окрема конструкція, в якій пружним елементом служать пружини, або конструкція, що поєднує демпфуючі властивості з віброізолюючими при використанні гумового пружного елемента;

- обмежувачі коливань, що перешкоджають переміщенням об'єкта, що віброізолюється, при впливі максимальних навантажень;

- засоби віброізоляції неопорних зв'язків (трубопроводів різного призначення та ін.).

Залежно від типу пружного елемента віброізолюючі пристрої (віброізолятори) можуть бути гумовими, гумометалевими, цільнометалевими, пружинними, пневматичними, комбінованими.

Найбільш ефективно зменшення передачі вібрації досягається шляхом спільного використання віброізоляції та вібродемпфування. Як елементи, що послаблюють вібрацію, можна застосувати віброізолятори, віброзатримуючі маси, гнучкі вставки тощо.

Якщо нанести, наприклад, на раму віброізолюваного електродвигуна вібродемпфуюче покриття, то додатковий ефект зниження вібрації та

випромінюваного підтримуючими конструкціями шуму досягає 7-10 дБ у середньо-і високочастотному діапазонах.

Основне призначення вібродемпфуючих (вібропоглинаючих) покриттів - зниження інтенсивності звуковипромінювання металевих конструкцій, що захищають. За характером деформації, що визначає поглинання вібрації, всі вібродемпфуючі покриття (ВДП) можна розбити на чотири групи: 1) жорсткі; 2) армовані; 3) м'які; 4) комбіновані.

У жорстких ВДП поглинання енергії при згинальних коливаннях обумовлено головним чином деформаціями розтягування - стискування вздовж поверхні пластини, що деформується. Покриття називають жорсткими умовно, тому що насправді вони виготовляються з матеріалів, модуль пружності яких на кілька порядків менший від модуля пружності металу. Існує варіант жорсткого покриття з так званим віднесеним демпфуючим шаром, який відокремлений від демпфованої пластини прошарком пінопласту.

Жорсткі покриття ефективні на низьких частотах коливань, у високочастотному діапазоні їх ефективність падає.

Для жорстких ВДП розробляються матеріали на основі полімерів та рідких смол із наповнювачами, фізико-механічні властивості яких залежать від температури. Робоча область температур різна для різних матеріалів становить від 20 до 70°C.

ВДП випускають у вигляді листових матеріалів чи мастик. Перші наносяться на пластину, що демпфується, за допомогою різних клеїв, другі — напилюванням або шпателюванням. Деякі матеріали потребують спеціальної термообробки.

В армованих ВДП, внаслідок введення металевого (армуючого) шару, основне поглинання вібрації визначається деформаціями зсуву шару, що демпфує. Якщо товщина армуючого шару близька до товщини пластини, що демпфується, то покриття називається листовим, або «сендвічем». У цьому випадку армуючий шар може виконувати одночасно функцію несучої конструкції.

Армовані ВДП - це багатошарові спеціально виготовлені конструкції. Так, ВДП «Поліакрил-В» складається з армуючого шару (алюмінієва фольга) товщиною 0,06 мм і липкого в'язкопружного шару товщиною 0,1 мм, що з'єднує ВДП з пластиною, що демпфується.

У м'яких ВДП енергія поглинається насамперед внаслідок деформацій розтягування — стиску в напрямку, перпендикулярному до поверхні пластини, що демпфується.

Принцип дії м'яких ВДП заснований на тому, що при певних частотах, коли на товщині покриття укладається ціла кількість напівхвиль, покриття інтенсивно поглинає коливання пластини. Оскільки для м'яких ВДП використовують гуми та пластмаси з малим модулем пружності, резонансне поглинання виникає на частотах близько сотень герц.

В роботі також пропонується підвищувати властивості алюмінієвих сплавів з великим вмістом заліза за рахунок їхньої ультразвукової обробки.

Ультразвук – це коливання пружного середовища з частотою понад 20000 Гц.

Джерелами ультразвуку можуть бути різні акустичні перетворювачі. Ультразвуки генеруються механічними і електромеханічними випромінювачами. Механічним випромінювачем низькочастотних ультразвукових хвиль великої інтенсивності є сирена. Магнітострикційні електромеханічні випромінювачі застосовуються для генерування ультразвуків до 200 кГц. Пієзоелектричні випромінювачі генерують ультразвук з частотами до 50 МГц.

Для покращення властивостей алюмінієвих сплавів використовується ультразвукова установка з частотою ультразвукового поля 18-25 кГц.

За способом передачі від джерела до людини ультразвук поділяють на:

- повітряний, що передається через повітряне середовище;
- контактний, що передається на руки працюючої людини через тверде і рідке середовище.

За спектром ультразвуку поділяють на:

- низькочастотний, коливання якого передаються людині повітряним та контактним шляхом (від $1,2 \cdot 10^4$ до $1,0 \cdot 10^5$ Гц);
- високочастотний, коливання якого передаються людині тільки контактним шляхом (від $1,0 \cdot 10^5$ до $1,0 \cdot 10^9$ Гц).

Враховуючи частоту ультразвукового поля (18-25 кГц) робимо висновок, що ультразвукова установка генерує низькочастотний ультразвук, який діє на людину повітряним та контактним шляхом.

Вплив ультразвуку на організм людини виявляється у виникненні зрушень у стані нервової, серцево-судинної та ендокринної систем, швидкої стомлюваності; низькочастотний ультразвук також може викликати локальну дію, вражаючи нервовий та серцево-судинний апарат у місці контакту.

Основними заходами захисту від ультразвуку є дистанційне управління, системи блокування. Ультразвукові установки повинні мати кожухи або екрани із органічного скла або сталевих листів, що оброблені протишумною мастикою, гумовим покриттям. Як засоби індивідуального захисту, використовуються протишумові навушники та двошарові рукавички із зовнішнім гумовим шаром.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Аналіз літературних даних показав, що обробка вібрацією металів і сплавів у рідкому стані та в процесі кристалізації може бути ефективним способом впливу на фізико-механічні властивості виливків, сприяти поліпшенню якості та службових властивостей..

2. Досліджена і пройшла випробування нова ефективна технологія обробки розплаву низькочастотними коливаннями в горизонтальній площині, що дає змогу якісно поліпшити процес обробки розплаву у всьому об'ємі за рахунок створення інтенсивних циркуляційних потоків металу.

3. Експериментально встановлено залежності між параметрами вібрації та фізико-механічними властивостями вібрації та фізико-механічними властивостями алюмінієвих сплавів і чавуну, що дають змогу з достатньою точністю розраховувати ефективні режими обробки, які забезпечують отримання виливків високої якості.

4. Встановлено, що ефективність впливу вібрації на розплав залежить від тривалості, температури та прискорення коливань у процесі обробки. Підвищення фізико-механічних властивостей силумінів, близьких до евтектичного складу, досягається обробкою при температурі не вище 973 К протягом 2-3 хв за оптимальних параметрів вібрації і при переважанні, що не перевищує 0,9 g.

5. Експериментально встановлено залежності режиму обробки від технологічних параметрів і конструктивних особливостей вібростенда (діаметра торсіона, типу вібратора, тиску повітря), які дають змогу регулювати частоту в діапазоні від 30 до 70 Гц і амплітуду від 0,04 до 0,14 мм коливань розплаву в процесі обробки.

6. Методом багатофакторного експерименту оптимізовано основні технологічні параметри низькочастотної та високочастотної (ультразвукової) обробки й отримано нові експериментальні дані, що більш точно розкривають механізм впливу вібрації на структуру і властивості чавуну та алюмінієвих сплавів. Поліпшення структури і підвищення фізико-механічних властивостей досягається за рахунок створення вимушеної комбінованої циркуляції розплаву, а також активації домішок під дією вібрації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Погодін-Алексєєв Г.І., Гаврилов В.М. Вплив пружних коливань на кристалізацію металів і сплавів. - Вісті АН . Метали, 1966, № I, с. 80-101,
2. Абрамов О.В. Кристалізація металів в ультразвуковому полі - М.: Металургія, 1972. - 256 с.
3. Іванов А.А., Крушенко Г.Г. Вплив ультразвуку на властивості доевтектичного силуміну. - У кн.: Ультразвукові методи інтенсифікації технологічних процесів: Тез. докл. Ш Всес. конф., М., 1975, с. П2-П3.
4. Іванов А.А. Розробка і дослідження технології застосування пружних коливань з метою поліпшення якості виливків. - Дис... кавд. техн. наук. – М., 1983. - 202 с.
5. Романов А.А., Лиття сталі у віброуючі форми. - М.: Машгиз, 1959. - 63 с.
6. Чернов Д. К. Наука про метали. - У кн.: Праці Д.К.Чернова/Під ред. Гудцова Н.Т.- М.-Л.: Металлургіздат, 1950. - 546 с.
7. Абрамов О.В., Ковальов О.І., Смирнов О.М. Вплив ультразвукової обробки на дислокаційну структуру алюмінію і сплаву АІ-4 % Сu. - Фізика і хімія обробки матеріалів, 1974, № 4, с. 142-144.
8. Кревський Г.Г., Тютєва Н.Д. Про механізм ультразвукового впливу на процеси кристалізації металів і сплавів. - У зб. тр. Тюменського індустр. інст., 1969, вип. 8, с. 209-210.
9. Айзензон Е.Г., Гревнов Л.М., Утробіна І.К. Впливи ультразвукової обробки за 1000 °С на тонку структуру аустеніту сталі ІХ18Н9Т. - Вісті вузів. Чорна металургія, 1970, № 12, с. П4-П7.
10. Гітіс М.Б., Михайлов І.Г. Швидкість звуку і стисливість деяких рідких металів. - Акустичний журнал, 1965, т. ХІ, вип.4, с. 434-437.
11. Дмитрієв Н.Н., Абрамов О.В., Куделькін В.П. Ультразвукова обробка сплавів на нікелевій основі. - Вісті АН . Метали, 1977, № 4, с. 102-107.
12. Лабунов В.А., Данилович Н.І., Лещенко І.М. Установка для дослідження взаємодії рідких металів з поверхнею твердого тіла, що коливається з ультразвуковою частотою. - Заводська лабораторія, 1976, № 7, с. 817-819.
13. Рамішвілі Ш.Д., Тавадзе Ф.Н., Каладзе Д.А. та ін. Вплив низькочастотної вібрації на зміну структури і механічних властивостей сірого чавуну. - Ливарне виробництво, 1983, № I, с. 36.
14. Серветник В.М. Вплив вібрації на кристалізацію великих промислових злитків киплячої сталі. - У кн.: Вплив зовнішніх впливів на рідкий метал і метал, що кристалізується. - Київ, ІПЛ АН УРСР, 1983, с. 41-43.
15. Касумзаде Н.Г. Зміна структури і властивостей сталі під впливом фізико-хімічних чинників. - Баку: Азнефтеіздат, 1957.-324 с.

16. Борисов Г.П., Біленький Д.М., Котлярський Ф.М. та ін. Формування виливків з алюмінієвих сплавів в умовах накладення тиску і низькочастотної вібрації. - У кн.: Вплив зовнішніх впливів на рідкий метал і метал, що кристалізується. Київ, ІПЛ АН УРСР, 1983, с. 44-50.
17. Оно А. Затвердіння металів/Пер. з англ. - М.: Металургія, 1980. - 152 с.
18. Баландін Г.Ф. Вплив вібрації на процес кристалізації виливків. - Ливарне виробництво, 1963, № 5, с. 24-25.
19. Чернишов І.А. Про режим вібрації сплавів під час затвердіння. - Ливарне виробництво, 1953, № 10, с. 13-18.
20. Бузіашвілі Б.І. Дослідження залежності параметрів вібрації в металевих розплавах. - Повідомл. АН, Тбілісі, 1976, т. 81, № 3, с. 645-648.
21. Ключев В.В. Прилади і системи для вимірювання вібрації, шуму та удару. Довідник. - М.: Машинобудування, 1978, кн. 2. - 439 с.
22. Гончаревич І.Ф., Фролов К.В. Теорія вібраційної техніки і технології. - М.: Наука, 1982. - 320 с.
23. Фрактографія та атлас фрактограм/Пер. з англ. під ред. М.Л. Берштейна. - М.: Металургія, 1982. - 488 с.
24. Гончаревич І.Ф., Докукін А.В. Динаміка гірничих машин з пружними зв'язками. - М.: Наука, 1975. - 212 с.
25. Абрамов О.В., Теумін І.І. Роль кавітаційних явищ при кристалізації металів у полі пружних коливань. - Фізика металів і металознавство, 1964, т. 17, вип. 5, с. 786-789.
26. Абрамов О.В., Теумін І.І. Роль нерозчинних домішок при кристалізації металів в ультразвуковому полі. - Фізика металів і металознавство, 1963, т. 15, с. 710-716.
27. Баландін Г.Ф., Семенов В.І. Перетікання формувальної суміші після попереднього ущільнення, - Ливарне виробництво, 1966, с. 20-22.