

**Смірнов О.М.<sup>1</sup>, Семірягін С.В.<sup>2</sup>, Скоробагатько Ю.П.<sup>1</sup>, Горюк М.С.<sup>1</sup>,  
Семенко А.Ю.<sup>1</sup>, Гойда Д.І.<sup>1</sup>**

*(<sup>1</sup>ФТІМС НАН України, м. Київ;*

*<sup>2</sup>ТОВ НВП «Дніпроенергосталь», м. Запоріжжя)*

## **ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ВІБРОІМПУЛЬСНОГО ВПЛИВУ НА ПОКРАЩЕННЯ СТРУКТУРИ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ**

Алюмінієві сплави системи Al-Si завдяки поєднанню високих ливарних, механічних та спеціальних властивостей широко використовуються у різних галузях промисловості. Однак розвиток високотехнологічної техніки зумовлює необхідність постійного підвищення рівня їх властивостей.

З цією метою вдосконалюють процеси обробки сплавів та кристалізації виливків. В даний час традиційні способи вирішення цієї проблеми себе вичерпали, тому ведеться активний пошук нових, у тому числі заснованих на використанні зовнішніх впливів на рідкий метал. При цьому до найбільш перспективних з них відносяться ті, в яких застосовуються фізичні способи обробки металевих розплавів.

При використанні фізичних полів на рідкий сплав виявляється тепловий і силовий вплив як на макрорівні (нагрів, рух (перемішування та транспортування), надання форми), так і на мікрорівні (вплив на структурні неоднорідності, рідкі та тверді включення, окремі компоненти сплаву). Вид введеної енергії може бути різним – теплова, механічна, акустична, електрична, електромагнітна – і, відповідно, основна керуюча дія й ефект від її введення можуть бути різними. У загальному вигляді схему фізичної обробки металевих розплавів можна представити таким чином. Незалежно від виду енергії, що вводиться в розплав, її джерелом (генератором) є будь-який електротехнологічний пристрій (ЕТП), який подає електричну енергію на пристрій-перетворювач, що формує необхідний вид енергії, та забезпечує задану потужність її потоку (рис. 1). Такий пристрій-перетворювач може бути змінним і мати різні модифікації в залежності від конкретних цілей обробки.

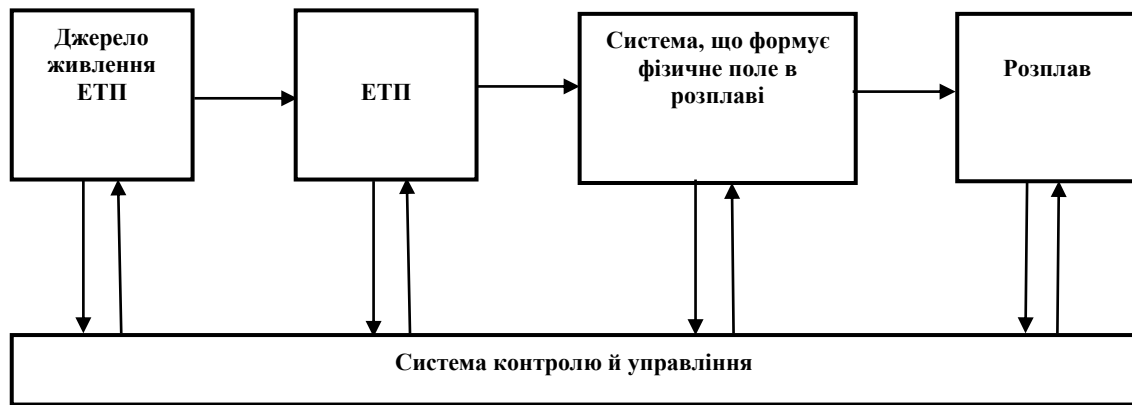


Рис. 1. Загальна схема обробки розплаву фізичними полями

У процесі такої фізичної обробки енергія, що вводиться в розплав, розподіляється наступним чином. В ідеалі, таку систему для фізичної обробки намагаються сконструювати таким чином, щоб по-перше, мінімізувати втрати енергії в ЕТП, по-друге, збільшити ККД передачі енергії в розплав і, в-третьєх, максимально зменшити втрати енергії в самому розплаві. На практиці, через велику різноманітність застосовуваних для обробки видів енергії, конструкція конкретних пристроїв і перерозподіл енергії в них можуть сильно відрізнятись. Так, конструктивно найлегше ввести в розплав механічну енергію (обертання, вібрація). Однак найбільш концентроване і потужне виділення енергії в обсязі рідкого металу досягається при створенні в ньому акустичних ударних хвиль, аж до кавітації (ультразвукова та електрогідроімпульсна обробка). У той же час максимальна повнота передачі енергії в розплав має місце при використанні електричних і електромагнітних полів. Для фізичної дії на рідкометалеві системи застосовують також пристрої, що надають розплаву рух, наприклад, центрифугування або механічну вібрацію.

Ефект вібраційної та пульсаційної дії на рідину в рідкій ванні необхідно розглядати як у площині примусового регламентованого перемішування, так і з точки зору прояву деяких відомих ефектів. Диференціація цих ефектів стосовно розплавленого металу видається вкрай скрутною в технічному плані.

У загальному вигляді основна мета фізичного моделювання процесів затвердіння при пульсаційному та вібраційному впливі визначена як якісна та

порівняльна кількісна оцінка характеру зростання частинок твердої фази, ідентифікація джерел утворення частинок твердої фази у розплаві та ступеня їх впливу на процеси затвердіння.

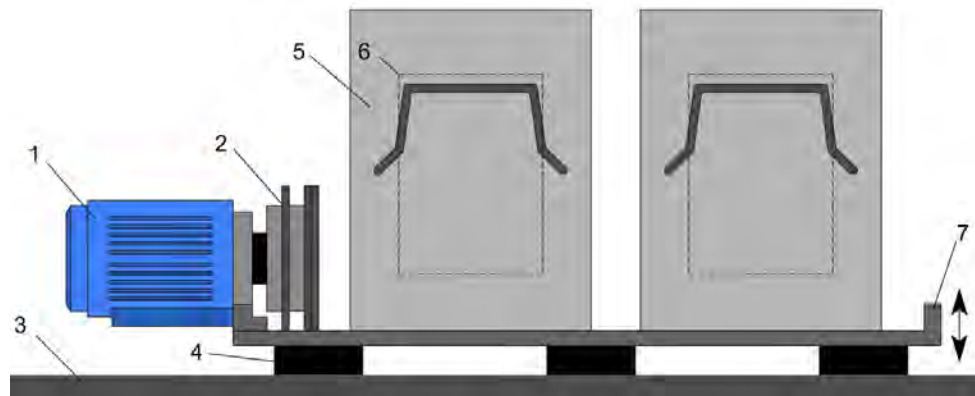
Перевага такого моделювання полягала в наступному:

а) в якості моделюючої речовини використовується метал, що формує яскраво виражену дендритну макроструктуру різної дисперсності;

б) модельний зливоч (вилівок) відливається об'ємним, що забезпечує можливість збереження подоби при порівнянні різних виливків;

в) використання сплавів алюмінію в якості моделюючої речовини дозволяє з високим ступенем точності оцінити вплив пульсаційного та вібраційного впливу на зміну макроструктури зливків.

Віброобробку дослідних виливків проводили на спеціальній віброплатформі, яка встановлювалася на бетонну основу та була оснащена механічним вібратором, що модулює синусоїдальні коливання частотою 0,5-70 Гц. Схему дослідного вібростенду для обробки виливків наведено на рис. 2.



1 – електродвигун; 2 – вібратор; 3 – фундамент; 4 – пружні прокладки;  
5 – опока; 6 – виливоч; 7 – віброплита

Рис. 2. Схема стенду для віброобробки дослідних виливків деталей

Попередньо амплітудно-частотний діапазон коливань був обраний відповідно до раніше розглянутих міркувань забезпечення режиму кавітаційного утворення зародка при більш рівномірному затвердінні виливки в цілому.

Враховуючи високий коефіцієнт об'ємної усадки для алюмінію, ефективність віброобробки може бути оцінена за рівнем осідання розплаву в формі. Надалі зафіксовані таким чином частоти коливань, що забезпечують максимальне осадження розплаву, були прийняті як базові для одержання дослідних виливків.

Результати впливу вібраційної дії на формування алюмінієвих зливків представлені на рис. 3, а (без віброобробки).

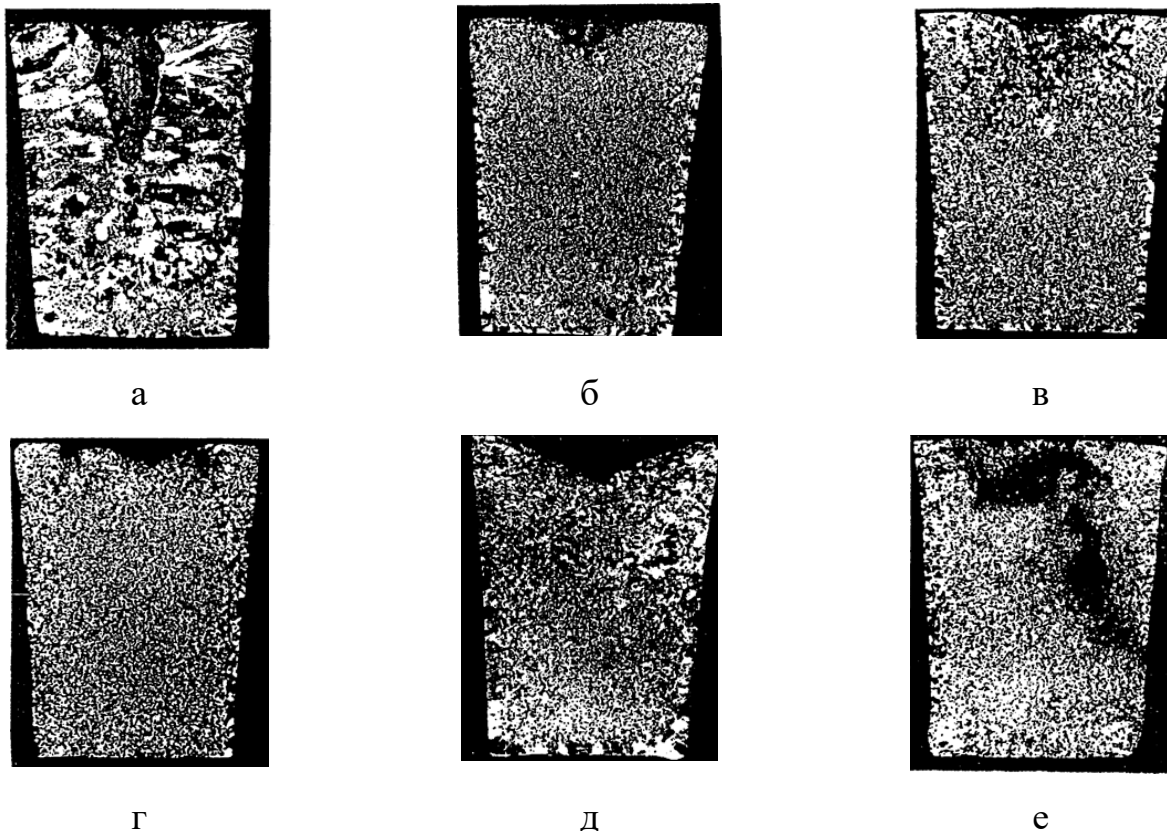


Рис. 3. Макроструктура дослідних алюмінієвих зливків (поздовжні темплети)

Як видно з наведених результатів, значний ефект подрібнення макроструктури досягається навіть при низьких частотах (5-10 Гц) за умови перевищення в процесі обробки порога кавітації на 15-20% (рис. 3, б-в). Аналогічний ефект одержано, наприклад, при віброобробці з частотою 40 Гц (рис. 3, г) в умовах перевищення порогу кавітації на 15%. Додатково слід звернути увагу на те, що віброобробка в режимі низькочастотної вібрації, що перевищує кавітаційний поріг на 30-40% (рис. 3, е), супроводжувалася серйозними сплесками та порушеннями суцільності тіла виливки, що необхідно

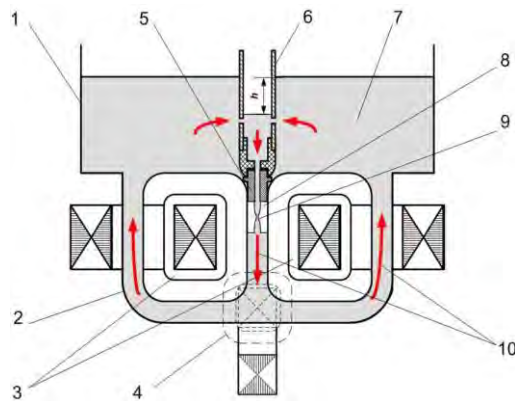
розглядати як негативний прояв ефекту обробки. Тим часом, при недосягненні порога кавітації ефект впливу помітно знижується (рис. 3, д). Співвідношення значень частоти та амплітуди коливань для величини кавітаційного порогу визначалося за рекомендаціями Дж. Кемпбелла.

Процес формування виливків, що твердіють при накладенні пульсаційної дії, у порівнянні з виливками, що твердіють без накладання зовнішнього впливу, характеризується декількома чітко вираженими етапами:

- а) утворення на початку процесу затвердіння великої кількості дрібних частинок твердої фази у розплаві;
- б) укрупнення (зростання) частинок, що утворилися, та їх поступове осадження в донну частину);
- в) зменшення у розплаві кількості твердих частинок та зниження інтенсивності перемішування з подальшим заростанням внутрішньої порожнини керамічної пульсаційної труби.

Інший спосіб такого впливу на алюмінієвий розплав був пов'язаний з використанням явища лінійного пінча, ініційованого в локальній зоні каналу магнітодинамічної установки (МДУ), через яку під дією електромагнітної сили багаторазово прокачували рідкий алюмінієвий сплав марки АК7.

Для забезпечення фізичної обробки рідкого алюмінієвого сплаву в МДУ локальну зону дії на розплав факторів, зумовлених керованим пінч-ефектом, створювали в центральній гілці Ш-подібного каналу магнітодинамічної установки за рахунок розміщення в цій зоні неелектропровідного змінного дроселюючого насадка та пропускання по металу в каналі індукційного струму (рис. 4). При цьому використовували насадки відповідно з каналами діаметром 5, 10 і 15 мм. Діаметр таких каналів вибирався із умови створення умов для повного циклічного розриву рідкометалевого провідника (щільність змінного електричного струму 15-30 А/мм<sup>2</sup>, що є критичною для розриву алюмінієвого струменя), а також для утворення в каналі МДУ (під торцем насадка) розрідження. Виконані в бічній поверхні металопроводу отвори підбиралися так, щоб їх загальний перетин був удвічі більшим, ніж переріз у дроселя.



1 – тигель; 2 – канал; 3 – індуктори; 4 – електромагніт; 5 – дроселюючий насадок, виготовлений із калієвого фторфлогопіту; 6 – металопровід, за допомогою якого утримується насадок; 7 – алюмінієвий розплав; 8 – локальна зона розрідження; 9 – ділянка виникнення пінч-ефекту; 10 – напрямок циркуляції розплаву

Рис. 4. Схема обробки алюмінієвого розплаву в МДН-6А при створенні розрідження в локальній зоні та ініціації пінч-ефекту в струмені металу, що вільно витікає

Було експериментально встановлено, що при діаметрі отвору в насадці, рівному 10 мм, в каналі МДУ під насадком утворювалось розрідження 10-12 кПа, а в рідкометалевому струмені, що вільно витікав в цю зону із каналу насадки, спостерігалось стійке явище пінч-ефекту (щільність струму при цьому складала  $\geq 21 \text{ А/мм}^2$ ), при значенні масової витрати металу через зону МГД-дії, рівній 0,7-0,8 кг/с. При цьому загальна маса рідкого металу, що проходила через зону обробки протягом 15 хв, становила 600-700 кг.

Відомо, що температура в розрядному проміжку ( $\sim 3000 \text{ К}$ ) при повному розриві рідкометалевого провідника істотно перевищує температуру металу в МДУ, тиск газів в цій зоні різко підвищується (до 50-100 атм), а протягом циклу розрив-замкнення провідника – змінюється.

Для проведення металографічних та досліджень на міцність з одержаних циліндричних алюмінієвих марки АК7ч виливків вирізалися поздовжні осьові темплети. Встановлено, що мікроструктура вихідного металу (рис. 5, а) відповідає

типовій структурі силуміну: дендритна структура, а всередині зерен спостерігаються точкові виділення розміром до 1 мкм. Середнє значення міжосьової відстані дендритів -твердого розчину алюмінію знаходиться в межах 12,5 мкм. Зерна Si дрібні з межзеренної евтектикою формою кута закруглені. По межах зерен розташовані скупчення кремнію розміром 18-60 мкм.

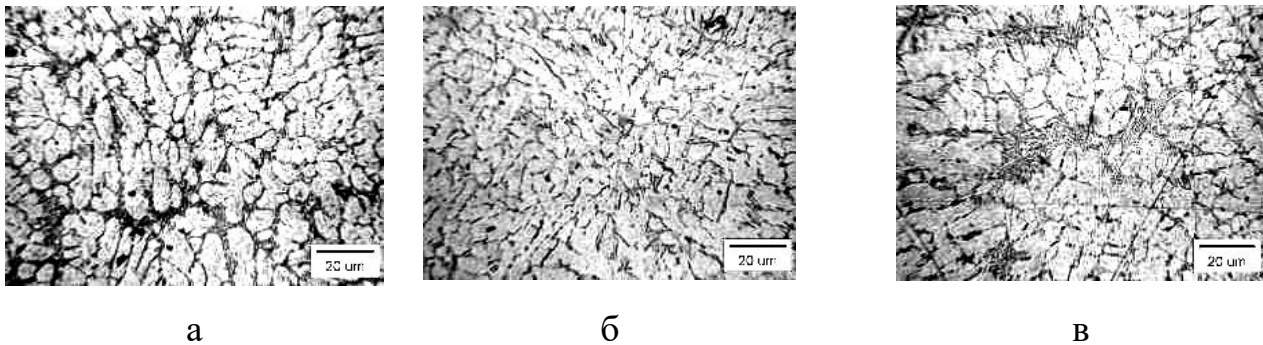


Рис. 5. Мікроструктура вторинного алюмінієвого сплаву АК7 (травлення,  $\times 400$ ):  
а – вихідного; б – після 15 хв; в – після 30 хв комплексної обробки

Так, після комплексної обробки протягом 15 хвилин в режимі циркуляційного прокачування металу через зону локального розрідження та ініціювання пінч-ефекту (рис. 5, б), було відзначено подрібнення зерен твердого розчину алюмінію до 7-10 мкм. При цьому скупчення Si, що знаходяться у вихідному металі, зменшилися в розмірах до 10-15 мкм і рівномірно розподілені, хоча при цьому залишилися гострі кути. У  $\alpha$ -твердому розчині виділилася вторинна фаза, що складається з темно-сірих включень, рівномірно розподілених структурою в кількості 1,5%. Розмір цих включень від 16 до 30 мкм. Утворені включення, що представляють собою світлі скелети у вигляді ієрогліфів, відповідають фазі  $Al_8Si_6Mg_3Fe$ .

Внаслідок обробки металу протягом 30 хв (рис. 5,в) розмір зерен  $\alpha$ -твердого розчину алюмінію зменшився до 5-8 мкм. Включення Si стали коротшими і компактнішими. Також у зернах  $\alpha$ -твердого розчину спостерігається 2-3% великих (розміром до 20 мкм) темних вторинних включень.

Механічні випробування зразків металу, що відбиралися у процесі обробки, показали, що після 15 хв впливу показник відносного подовження збільшився в 3-3,5 рази до 2,4% після обробки. При цьому міцність на розрив збільшилася в 1,4-1,5 рази – з 90 МПа до 125-130 МПа. При обробці сплаву протягом 30 хв було відзначено зниження величини відносного подовження, яке становило 1,4-1,6% за збереження колишнього рівні міцності на розрив. При обробці розплаву протягом 45 хв відносне подовження зменшилося до 1,2-1,4% за збереження міцності на розрив лише на рівні 125-130 МПа.

Встановлено, що комплексна обробка рідкого алюмінієвого сплаву шляхом багаторазового циркуляційного прокачування через зону локального розрідження забезпечувала видалення розчиненого в розплаві водню з 0,6 до 0,05 см<sup>3</sup>/100 г металу, а додатковий теплосиловий вплив, який обумовлений проявом ефекту кавітації при розвитку пінч-ефекту, сприяє переходу заліза з фази Al<sub>3</sub>Fe у фазу Al<sub>8</sub>Si<sub>6</sub>Mg<sub>3</sub>Fe, яка у вигляді світло-сірих скелетоподібних пластин, розміщується по межах зерен α-твердого розчину алюмінію та сприяє дробленню скупчень первинного кремнію та власне подрібненню мікрозерна.

**Смірнова Я. О., Гурія І. М.**

*(КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ)*

**ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ШАРУВАТИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ  
МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ БРОНЕЗАХИСТУ**

E-mail: yana.luschay@gmail.com

Актуальність питання ефективного бронезахисту спричинена постійним вдосконаленням та розвитком боєприпасів. Сучасний бронезахист, як для військового так і для цивільного застосування, вимагає використання облегшених, порівняно з традиційними, матеріалів. Так, використання гомогенної сталі як бронезахисту може збільшити загальну вагу бойової машини на 15-20%, що змінює її рухливість, маневреність, паливну економічність та вимагає потужніших двигунів та міцніших гальмівних механізмів [1].