

PACS numbers: 47.61.-k, 47.80.Jk, 61.25.Mv, 68.15.+e, 68.18.Fg, 81.30.Fb, 83.60.Np

Структура металевої діамagnetної краплі, що тверднула, розтікаючись по немагнетній підкладинці у магнетному полі

О. В. Середенко, В. О. Середенко

*Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України,
бульв. Академіка Вернадського, 34/1,
03142 Київ, Україна*

З'ясовано, що розтікання та тверднення металевої краплі на підкладинці є базовим у ряді прогресивних і новітніх технологій та активно вивчається в світі. Математичний апарат прогнозування внутрішніх течій і технічні засоби прямого спостереження за швидкоплинним процесом одночасного розтікання рідкої краплі з переходом у тверду пластинчасту частинку, зокрема під дією постійного магнетного поля, вельми ускладнені. Через це набуває актуальності розробка способів одержання інформації про еволюційні картини даного процесу, що визначає ефективність технології. Розроблено методику візуалізації картин течії рідкого емульсованого стопу Bi-Zn за одночасного розтікання, охолодження та тверднення діамagnetної краплі на немагнетній металевій підкладинці під впливом постійного магнетного поля. Візуалізаторами картин внутрішніх течій розтопу, що був істотно збурений і стратифікований по температурі, були емульсовані вкраплення й оксидні плівки. Виявлено, що постійне магнетне поле, накладене перпендикулярно підкладинці, вплинуло на динаміку розтопу, що проявилася в істотному (до 10 разів) зменшенні дефектів у структурі частинок. Визначено дію магнетного поля на структуру стопу, яка супроводжувалася підвищенням у 2 рази однорідності розподілу емульсованих вкраплень і появою нових форм утворень, які не спостерігались у частинках, необроблених полем. Показано, що постійне магнетне поле перспективно застосовувати у виробництві масиву крапель (нане-

Corresponding author: Olena Volodymyrivna Seredenko
E-mail: mhdptima@gmail.com

*Physico-Technological Institute of Metals and Alloys, N.A.S. of Ukraine,
34/1 Academician Vernadsky Blvd., UA-03142 Kyiv, Ukraine*

Citation: O. V. Seredenko and V. O. Seredenko, The Structure of a Metal Diamagnetic Droplet That Solidified as It Spreads over a Non-Magnetic Substrate in a Magnetic Field, *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.*, 45, No. 11: 1253–1268 (2023) (in Ukrainian).
DOI: [10.15407/mfint.45.11.1253](https://doi.org/10.15407/mfint.45.11.1253)

сенні покриттів, спреї-процесі тощо) й поодинокі крапель (адитивних технологіях, змочуванні мікрооб'єктів тощо), а також виробів зі швидко-охолоджених перспективних стопів, наприклад систем на основі міді з залізом, алюмінію з рідкісноземельними металами, схильних до формування неоднорідних і грубих структур.

Ключові слова: діамagnetна металева крапля, лита структура частинки, магнетне поле, візуалізація замороженої течії.

As found, the spreading and solidification of a metal droplet on a substrate is basic in a number of advanced and new technologies and is actively studied in the world. The mathematical apparatus for predicting internal flows and the technical means of direct observation of the rapid process of simultaneous spreading of a liquid droplet with the transition into a solid lamellar particle, in particular, under the action of a constant magnetic field, are very complicated. Because of this, the development of ways to obtain information about the evolution pictures of this process, which determines the effectiveness of the technology, becomes relevant. A technique for visualizing melt-flow pictures of an emulsified Bi-Zn alloy under the conditions of simultaneous spreading, cooling and solidification processes of a diamagnetic droplet on a non-magnetic metal substrate under the influence of a constant magnetic field is developed. Emulsified inclusions and oxide films are visualizers of pictures of internal flows of the melt, which is significantly disturbed and stratified by temperature. As found, a constant magnetic field applied perpendicular to the substrate affects the dynamics of the melt, which is manifested in a significant (up to 10 times) reduction of defects in the particle structure. The effect of the magnetic field on the structure of the alloy is determined, which is accompanied by 2 times' increase in the homogeneity of the distribution of emulsified inclusions and the appearance of new forms of formations, which are not observed in samples not treated by the field. As shown, a constant magnetic field can be used promisingly in the fabrication of an array of droplets (coating, spray process, *etc.*) and single droplets (additive technologies, wetting of microobjects, *etc.*), as well as products from fast-cooled advanced alloys, for example, systems based on copper with iron, aluminium with rare-earth metals, prone to the formation of heterogeneous and rough structures.

Key words: diamagnetic metal drop, cast particle structure, magnetic field, frozen flow visualization.

(Отримано 7 червня 2023 р.; остаточн. варіант — 15 липня 2023 р.)

1. ВСТУП

Задача керування розтіканням, формою та структурою крапель металевих розтопів на поверхні твердого тіла є вельми актуальною, оскільки вони застосовуються у прогресивних технологічних процесах — нанесенні покриттів, змочуванні мікролінз, синтезі капсул, лютуванні, зварюванні, у тому числі в інтелектуальній техно-

логії зварювального виробництва (IWMT), в системах охолодження, пристроях перетворення енергії термоядерної синтези «токамак», спреї-процесі формування композиційних матеріалів з металевою матрицею [1–6]; також під час одержання швидкоохолоджених стрічок, малих металевих частинок, зокрема пластинчастих, гранул, порошку [7–11]. Особливо актуальною ця задача стає у розвитку новітньої адитивної технології крапельного 3D-друку (у процесі DoD — drop-on-demand) відповідальних складних електронних компонентів, гнучких схем, металевих деталей з одного або декількох металів, а також у нанесенні лютців [12–15].

Виробництво металевих крапель є нелінійним, нерівноважним і нестационарним процесом, в якому джерело тепла миттєво входить у контакт з певною підкладкою, що супроводжується фазовим перетворенням рідина–тверде тіло. Через це вельми проблематичним є створення адекватного аналітичного моделю процесу [16]. Для цього необхідні істотні обчислювальні зусилля, які потребують реалізації мультифізичного моделю для поєднання опису динаміки рідини всередині краплі, теплопередачі та механіки твердого тіла. Тому інтенсивних обчислюваних зусиль запобігають використанням прямого експериментального спостереження морфології поверхні крапель. Але у аналізі конвекційних ефектів у краплі через їхні вельми вузькі часові та просторові масштаби досі проблематичною є технічна реалізація візуалізації руху рідини. Тому на даний час для аналізу переміщення рідини у краплі використовується математичний модель з рядом припущень [13].

Кривина та хвилястість поверхні крапель приводять до значного зростання її площі. Застосування хемічно активного охолоджувача приводить, зокрема, до підвищення окиснення та виникнення гідридів на поверхні частинок [10]. Під час 3D-друку та поєднання таких частинок можуть виникати пори та пустоти, викривлення поверхні через усадку металу, що призводить до короблення виробу [12, 14, 15]. В процесі експлуатації та деформації через це розвиваються дефекти (розшарування, неоднорідність структури).

Натепер новітні технології часто комерціалізуються швидше розвитку фундаментальних фізичних уявлень, на яких вони базуються [17]. Тому увагу багатьох дослідницьких груп спрямовано на вивчення поведінки окремої металевої краплі від її осадження до тверднення, як базової одиниці в засобах керування її розтіканням, від чого напряму залежить успішність технології [12, 14].

Розтікання краплі по твердій поверхні проходить за двома основними режимами — з виплеском і без нього [18]. Згідно зі спрощеним підходом [19], розтікання краплі по твердій поверхні без виплеску відбувається у 3 етапи: 1) крапля перетворюється у шар, 2) речовина краплі розтікається у тонкий шар (формується ламеля), 3) відбуваються різке гальмування та зупинка процесу розтікання.

Під час удару та розтікання краплі рідкого металу по холодній поверхні процеси її розтікання й охолодження відбуваються одночасно. В зоні контакту з підкладкою частина об'єму розтопу твердне, а на неї натікають шари рідкого металу. В результаті на поверхні краплі генеруються несталості та формується характерний рельєф [20]. Такий рельєф є наслідком дії несталостей Релея–Тейлора та Кельвіна–Гельмгольца [21]. Через різке гальмування рідини краплі на кромках ламелі можуть виникати завихрення [22]. Несталості є причиною виникнення дефектів литих пластинчастих частинок.

Відомо, що для підвищення якості литої структури металевих заготовок використовується постійне магнетне поле. На даний час у світі активно ведуться дослідження керування за допомогою магнетного поля розтіканням крапель ферромагнетних рідин [2, 23], парамагнетних розчинів [24], діямагнетного живосрібла [19], металевого стопу галінстану, що залишався рідким в умовах експерименту та складався з парамагнетних Ga, Sn та діямагнетного In і потребував захисту від окиснення [1, 6]. Досліджується розтікання крапель по горизонтальних або з нахилом підкладках з різними електричними та магнетними властивостями. В потоці електропровідної рідини, що перетинає силові лінії однорідного магнетного поля, відбуваються глибокі зміни його інтегральних і локальних характеристик [25]. Виражена дія постійного магнетного поля на металеві краплі пов'язана з їхньою високою електропровідністю внаслідок генерування Льорентцевої сили. В роботі [26] відмічено вплив магнетного поля на форму краплі, що розтікалася з виплеском. Авторами [19] виявлено зменшення швидкості розтікання краплі у магнетному полі, яке було спрямовано перпендикулярно напрямку розтікання. Швидкість розтікання краплі зменшувалася зі збільшенням Гартменового числа, яке прямо пропорційно залежить від величини індукції магнетного поля. Магнетне поле сприяло утворенню меншого діаметра розтікання краплі та збільшеної висоти її вершини [23], істотно змінювало характер течії металевої краплі [6] та перерозподіл рідини в її об'ємі, збільшувало контактний кут між краплею та підкладкою [1], запобігало утворенню потовщень на краю ламелі [2].

Аналіза літературних даних показала, що на даний час основну увагу досліджень спрямовано на вивчення форми поверхні крапель, що розтікаються, а внутрішню структуру потоків металу у краплях, зокрема сформовану під час розтікання та тверднення під дією постійного магнетного поля, вивчено недостатньо, у тому числі через складність прямого експериментального спостереження та математичного апарату для опису цього процесу.

Мета даної роботи полягала у забезпеченні візуалізації впливу постійного магнетного поля на течію розтопу всередині діямагнетної металевої краплі, що розтікалася без виплеску та тверднула на немагнетній підкладці за допомогою мікроемульсованого стопу

Bi-Zn, в якому візуалізаторами слугували емульсовані вкраплення й оксидні плівки, що своїм розташуванням у структурі твердої частинки відтворювали картини руху розтопу під час формування з краплі пластинчастої частинки.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МЕТОДИКА

Для візуалізації течії розтопу всередині краплі, яка охолоджувалася та тверднула, був застосований низькотемпературний стоп монотектичної системи Bi-Zn з температурно-концентраційною зоною незмішування в рідкому стані та діямагнетними властивостями. Склад стопу Bi-25% мас. Zn відповідав зоні незмішування, де виникали краплі на основі Zn в рідкій матриці на основі Bi. Стоп масою у 10 г виплавлявся у печі електроопору, був перегрітий вище температури зони незмішування до однофазного стану. З охолодженням розтопу в зоні незмішування формувалися краплі металоемульсії, які з подальшим охолодженням до температури монотектики тверднули, і розтоп становився суспензією. Як було показано в роботі [27], з охолодженням плівок з емульсованого розтопу у їхньому об'ємі формувалися характерні зони з боку підкладинки та повітря, а також центральна зона між ними. Ці зони були візуалізовані завдяки різниці розмірів і розподілу емульсованих вкраплень. Зі збільшенням швидкості охолодження центральна зона вироджувалася.

Рідкий бісмут схильний до утворення шару оксидів на поверхні в контакті з повітрям, і в даній роботі це також було використано для візуалізації картини внутрішніх течій. Процеси розтікання й охолодження розтопу краплі перебігали разом, й у локальних потоках у краплі виникали емульсовані вкраплення, розмір і розподіл яких відображали температурний і динамічний режими окремого мікрооб'єму.

Об'єм розтопу для формування однієї краплі (масою до 0,05 г) брався з печі лопаткою та скидався під кутом на металеву підкладинку. Згідно з відомим рівнянням взаємодії струменя рідини з твердою поверхнею, зворотнє розтікання є мінімальним за кутів зустрічі рідини з підкладинкою $< 30^\circ$, що було забезпечено у роботі. Підкладинку було зроблено з немагнетної неіржавійної криці. Дослідження проводилися в атмосфері повітря за кімнатної температури. Форма краплі розтопу різко змінювалася за її падіння на підкладинку. Під час підльоту до підкладинки локальні об'єми в краплі мали середню енергію руху краплі у $7 \cdot 10^{-5}$ Дж. Під час розтікання енергія в краплі перерозподілялася нерівномірно між її локальними об'ємами. Це приводило до інтенсивного перемішування розтопу. Були одержані частинки без і під дією постійного магнетного поля, спрямованого перпендикулярно підкладинці. Оскільки магнетна проникність діямагнетних матеріалів є близькою до 1, а підкладин-

ка була немагнетною, силові лінії магнетного поля не зазнавали викривлення з переходом із середовища підкладинки до краплі.

З метою аналізу наслідків удару краплі об тверду підкладинку та наступного розтікання (у вигляді ламелі, утворення корони, розриву, виплеску тощо) було використано безрозмірні числа подібності, що визначали співвідношення сил, які діяли на краплю. Для загальної характеристики процесу розтікання краплі в роботі використано співвідношення: сили інерції до поверхневого натягу — Віберове число ($We = (\rho V^2 D) / \sigma$, де ρ — густина, кг/м^3 , V — швидкість, м/с , D — діаметр ламелі, м , σ — поверхневий натяг, Н/м); сили в'язкості до поверхневого натягу — число Онезорге ($Oh = \eta / (\rho \sigma D)^{0.5}$, де η — динамічна в'язкість, $\text{Па}\cdot\text{с}$), сили інерції до сили в'язкості — Рейнольдсове число ($Re = (\rho V l) / \eta$, де l — характерний розмір, м). Для оцінки особливостей розтікання обрано: параметер виплеску $K = We^{0.5} Re^{0.25}$ (зادля прогнозування можливості утворення корони), число капілярності $Ca = Oh / Re^{0.5}$ (задля прогнозування можливості виникнення виплеску) [4, 12, 18, 21]). Через удар об поверхню підкладинки рідина у краплі здійснює коливання. У початковий період розтікання різко змінюється характерний розмір краплі, що сприяє виникненню несталостей. Шерсткість поверхні, по якій розтікається рідина, також є причиною генерування несталостей усередині краплі та турбулізації її рідини [21, 28]. Для визначення впливу властивостей поверхні підкладинки на еволюцію краплі застосовано безрозмірний діаметер розтікання $b \sim Re^2 Oh$ [28]. Інтегральна дія постійного магнетного поля на потік рідкого металу під час формування частинки з краплі (Гартменів ефект — сплюснення профілю швидкості потоку) характеризувалася Гартменовим числом (відношення електромагнетної сили до сили в'язкості) — $Ha = (Bl) / (\rho^e \eta)^{0.5}$, де B — індукція магнетного поля, Тл , ρ^e — питомий електроопір, $\text{Ом}\cdot\text{м}$. Ефект локальної дії магнетного поля на характер руху розтопу (пригнічення тривимірних турбулентних вихорів у рідині та перетворення їх у двовимірні) визначався величиною комплексу Ha / Re [25].

Структура пластинчастих частинок досліджувалась у вертикальному перерізі, перпендикулярному підкладинці вздовж напрямку руху потоку розтопу. Візуалізатори виявлялися за допомогою цвавлення 1% -розчином плавикової кислоти у суміші етилового спирту та дистильованої води як темні об'єкти на світлому фоні основи. Вкраплення металоємulsionі мали округлу форму; оксидні плівки на площині шліфа виявлялися як лінії з різноманітним контуром.

Швидкість охолодження пластинчастих частинок на крицевих підкладинках з певною шерсткістю було розраховано за методикою [27]. Для розрахунку безрозмірних чисел подібності, що характеризували процес розтікання краплі та швидкості її охолодження, фізичні характеристики були взяті з [29] з урахуванням зміни їх з

пониженням температури.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

Одержані частинки мали товщину від 120 до 450 мкм, яка вимірювалась у їхній середній частині, і довжину до 6 мм. Швидкість охолодження становила від $9,5 \cdot 10^4$ до $3,6 \cdot 10^5$ К/с. Встановлено, що формування пластинчастої частинки з металевої краплі перебігало наступні етапи: 1) момент торкання краплею підкладинки, 2) початкова стадія розтікання, що тривала до моменту переходу турбулентного режиму руху розтопу у ламінарний, 3) кінцева стадія розтікання за різкого пониження швидкості потоку розтопу та його температури, 4) гальмування течії розтопу та його перехід у повзкий режим до зупинки.

Швидкість краплі на 1-му етапі було визначено за відомою формулою Торрічеллі та складала 0,5 м/с і понижувалася до 0,05 м/с на 3-му етапі згідно з [30] і до 0 м/с — на 4-му етапі. Розтікання краплі по підкладинці характеризувалося величиною числа $Oh = 2 \cdot 10^{-4}$, яке було $< 2 \cdot 10^{-3}$, що вказувало на збереження цілісності сформованої пластинки (ламельі) згідно з [23]. Значення $We = 34$, і виконання умови < 60 підтверджувало, що крапля після розтікання мала форму ламелі, обмеженої ободом [28]. Відповідність $Oh \ll 1$ [12] і $We > 1$ [28] вказувала на переважання дії сили інерції над силою поверхневого натягу під час утворення частинки. Розтікання краплі відбувалося без виплеску ($(Ca)^{0,5} = 2 \cdot 10^{-3}$, що $< 0,35$ [18]), а також без утворення корони ($K = 40$, що $< 57,7$ [4]). На етапах 1–4 значення чисел Re дорівнювали: 15000, 2300, 125 і 1 відповідно. Поверхня підкладинки впливала на процес розтікання краплі — генерувала несталості всередині краплі на етапах її розтікання 1–3, оскільки умова $b < 1$ виконувалася тільки для 4-го етапу [28]. На етапах (1 і 2) торкання та початку розтікання краплі розтоп рухався по підкладинці у турбулентному режимі ($Re \geq 2300$ [25]). У міру розтікання краплі змінювалася як швидкість, так і висота потоку, пов'язані умовою нерозривності. Ці параметри визначають величину чисельника у виразі числа Re . В процесі розтікання й охолодження розтопу на етапах 2 і 3 відбувалось істотне (в 1,8 рази) підвищення його в'язкості (знаменник у формулі числа Re). Під час розтікання розтопу через різні умови тепловіддачі на поверхнях контакту з газовим середовищем і металевою підкладинкою потік стратифікувався за температурою. Водночас внаслідок турбулентності відбувався обмін локальними об'ємами між стратифікованими шарами. В результаті в'язкість шарів стратифікованого потоку осцилювала. В таких умовах течія шарів розтопу з різною температурою послідовно переходила у ламінарний режим ($Re < 2300$). Згідно з [31], за великих значень числа Re (до $1 \cdot 10^3$) режим течії потоку може бути

квазиламінарним, якщо у вузькій придонній частині потоку генеруються несталості малої інтенсивності, а рух основного об'єму над нею є ламінарним. З урахуванням значення b режим розтікання краплі на етапі 3 був квазиламінарним. Таким чином, значення безрозмірних чисел, що характеризують режим руху розтопу, показали, що збурення всередині краплі генерувалися на 1-му, 2-му та 3-му етапах її розтікання.

Аналіза структури частинок, одержаних без дії постійного магнетного поля, підтвердила, що всередині краплі по всій протяжності були присутні неоднорідності структури, що виникли внаслідок збурень розтопу та були візуалізовані емульсованими вкрапленнями й оксидними плівками. Перемішування стратифікованих шарів під час розтікання приводило до замішування оксидних плівок в об'єм частинок, утворення вихорів, неоднорідностей структури в зонах взаємочину об'ємів із різною температурою, каверн і нерівностей на поверхні. На рисунку 1, *a* показано несталість у зоні контакту стратифікованих шарів, візуалізовану замішаною в об'єм пластинки оксидною плівкою хвилястої форми. В структурі частинок також були присутні оксидні плівки, що формували кільцеві контури й охоплювали вихри. Їхня довжина була від 15 до 300 мкм. Також на рисунку 1, *a* представлено неоднорідність структури, візуалізовану скупченням вкраплень на основі Zn. Ця неоднорідність складної форми виникла внаслідок взаємочину спарених вихрів (див. рис. 1, *a*, позиція 2). Такі неоднорідності мали розміри у 5–36 мкм. На рисунку 1, *a* видно оксидну плівку (позиція 5), розташовану по контуру вихору (позиція 3) та локальні скупчення вкраплень округлої форми та вигнутих ланцюжків. Вірогідно, округлі скупчення вкраплень візуалізатора з розмірами у 5–10 мкм відображали дрібні тривимірні турбулентні вихри. Вигнуті ланцюжки, що мали протяжність у 2–2,5 рази більшу, ніж діаметер округлих скупчень, були розташовані на поверхнях крупніших вихрів.

Рисунок 1, *б* ілюструє ділянку частинки з нерівностями на її поверхні, які виникли в результаті розвитку несталостей Кельвіна–Гельмгольца та Релея–Тейлора з максимальною амплітудою у 12 мкм. В структурі була присутня викривлена розгалужена оксидна плівка, на поверхні якої скупчилися вкраплення візуалізатора. Несталості привели до формування в об'ємі частинки каверн — компактних і з витягнутою формою розташованих біля поверхонь частинки. Розміри каверн мали діяпазон 30–120 мкм. По всій площині шліфа були розсіяні скупчення візуалізатора округлої форми (позиція 6).

Дія постійного магнетного поля на розтоп, що рухався під час розтікання краплі, характеризувалася значеннями Ha і Ha/Re відповідно етапам: 1) 5,2 і $3,5 \cdot 10^{-4}$, 2) 0,8 і $3,5 \cdot 10^{-4}$, 3) 0,58 і $4,6 \cdot 10^{-3}$, 4) 0,58 і 0,58. Згідно з [19], помітний вплив ($> 10\%$) на вирівнювання

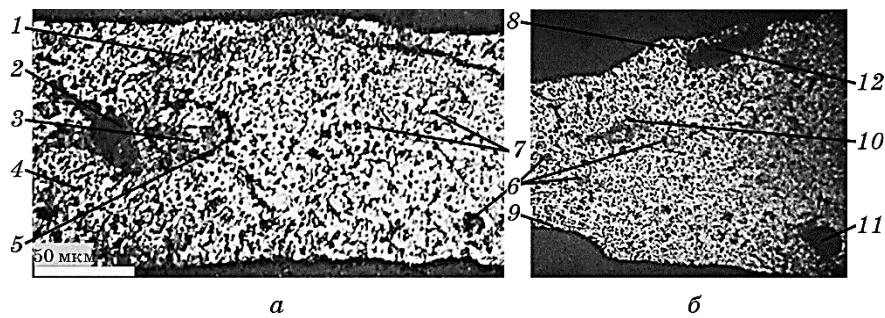


Рис. 1. Структури пластинчастих частинок, одержаних без дії магнетного поля: ділянка частинки з однаковою товщиною (*a*), ділянка частинки з різною товщиною та вираженими нерівностями на поверхні (*б*): 1 — оксидна плівка хвилястої форми, 2 — неоднорідність структури, візуалізована скупченням вкраплень Zn, 3 і 4 — спарені вихри, 5 — оксидна плівка, що охоплювала вихор, 6 — локальні округлі скупчення вкраплень, 7 — локальне скупчення вкраплень візуалізатора у вигляді вигнутих ланцюжків, 8 — несталість Кельвіна-Гельмгольца, 9 — несталість Релея-Тейлора, 10 — розгалужена оксидна плівка, 11 — каверна компактної форми, 12 — каверна витягнутої форми.

Fig. 1. Structures of lamellar particles obtained without the magnetic field action: a particle part with the same thickness (*a*), a particle part with different thickness and pronounced irregularities on the surface (*b*): 1—wavy oxide film, 2—structure heterogeneity visualized by clustering inclusions of Zn, 3 and 4—paired vortices, 5—oxide film covering the vortex, 6—local rounded clusters of inclusions, 7— local visualizer-inclusions' cluster in the curved-chains' form, 8—Kelvin-Helmholtz instability, 9—Rayleigh-Taylor instability, 10—branched oxide film, 11—compact cavern, 12—elongated cavern.

епюри швидкостей у потоці під час розтікання діямагнетної краплі масою до 0,05 г відбувається для $Ha > 0,2$. Таким чином, магнетне поле ефективно діяло на епюру швидкостей на всіх етапах розтікання краплі. З переходом на 3-й етап реалізувалася умова $Ha/Re \geq 4,0 \cdot 10^{-3}$, згідно з якою істотно збільшується вплив постійного магнетного поля на перетворення вихрів, а з 3-го на 4-й етап — умова $Ha/Re \geq 15 \cdot 10^{-3}$, яка вказувала на повне пригнічення збурень у потоці [25].

Всередині стратифікованого потоку розтопу магнетне поле диференційовано діяло на кожний локальний об'єм в залежності від характеру його руху. На рисунку 2 показано структуру пластинчастих частинок, одержаних під дією постійного магнетного поля. Як видно з цього рисунку, під час розтікання й охолодження краплі розтопу в магнетному полі стратифікація шарів і утворення вихрів були істотно послаблені в порівнянні з частинками, необробленими полем. Це проявилось у відсутності візуалізованого відокремлення

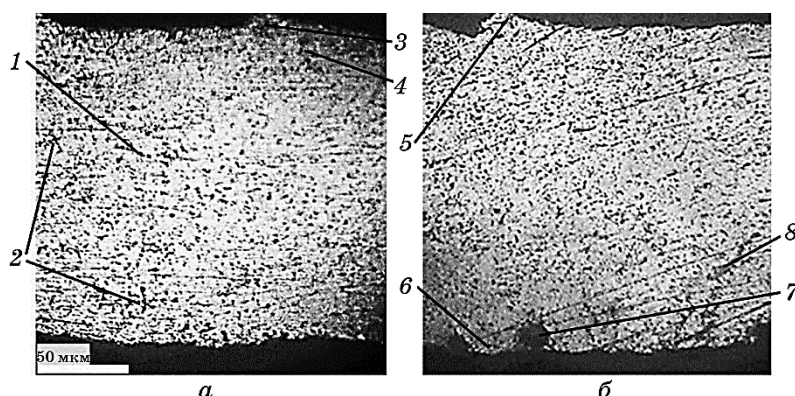


Рис. 2. Структура пластинчастих частинок, оброблених постійним магнетним полем: ділянка пластинчастої частинки з дрібними неоднорідностями структури (а), ділянка пластинчастої частинки з дефектами в структурі (б): 1 — скупчення вкраплень візуалізатора у вигляді майже прямих ланцюжків, 2 — складні форми з ланцюжків вкраплень візуалізатора, 3 — округлі скупчення вкраплень візуалізатора, 4 — скупчення подовженої форми з вкраплень візуалізатора, 5 — несталість Кельвіна-Гельмгольца, 6 — несталість Релея-Тейлора, 7 — каверна, 8 — оксидна плівка.

Fig. 2. The structure of lamellar particles treated with a constant magnetic field: a lamellar particle section with small structure inhomogeneities (a), a lamellar particle section with defects in the structure (b): 1—visualizer-inclusions' cluster in the almost-straight-chains' form, 2—complex forms of chains of visualizer inclusions, 3—rounded visualizer-inclusions' clusters, 4—elongated visualizer-inclusions' cluster, 5—Kelvin-Helmholtz instability, 6—Rayleigh-Taylor instability, 7—cavern, 8—oxide film.

замішаними оксидними плівками локальних об'ємів з різними структурами, що, вірогідно, було пов'язане з Гартменовим ефектом. Округлі та витягнуті скупчення візуалізатора, аналогічні утворенням у частинках, необроблених магнетним полем, виникли внаслідок дії вихрів, але послаблених магнетним полем. В результаті ці неоднорідності стали вдвічі меншими та світлішими через пониження в них кількості емульсованих вкраплень у порівнянні з подібними неоднорідностями, представленими на рис. 1, а (див. позицію 2). Кількість даних неоднорідностей понизилася до 10 разів. На відміну від структури крапель, що не піддавалися впливу поля, ці скупчення були розташовані не по всій площині шліфа, а поблизу верху частинки. Їхню форму не було перетворено магнетним полем, вірогідно, через те, що вони виникли на початкових етапах розтікання краплі (комплекс Na/Re не досяг характерної величини) та були рознесені потоком по довжині частинки.

На рисунку 2, а в правій верхній частині фото вкраплення візуалізатора були в основному розосереджені. У лівій нижній частині

рис. 2, а зафіксовано локальні скупчення вкраплень візуалізатора у вигляді майже прямих ланцюжків і складних форм їхнього поєднання. Протяжність цих ланцюжків була співрозмірна зі скупченнями вкраплень візуалізатора округлої форми в структурі частинок, необроблених магнетним полем (див. рис. 1, позиція 6 і рис. 2, позиції 1 і 2). Вірогідно, ланцюжки, що виникли в структурі частинки, одержаної під дією постійного магнетного поля, відображали перехід від виражених тривимірних вихрів до близьких до двовимірних, утворених за реалізації умови $Ha/Re \geq 4,0 \cdot 10^{-3}$. Наявність інших ланцюжкових форм, вірогідно, була наслідком особливостей кристалізаційного процесу емульсованого розтопу, що перебігав у метастабільних умовах під дією поля.

Під впливом магнетного поля довжина хвиль несталостей Релея–Тейлора та Кельвіна–Гельмгольца на поверхні частинок зменшилася до 2 разів (рис. 2, б). На амплітуду несталостей Релея–Тейлора впливу поля не виявлено, оскільки їхній рух відбувався паралельно його силовим лініям. Амплітуда хвиль типу Кельвіна–Гельмгольца понизилася в 1,3 рази. Каверни стали компактними й округлими, їхня кількість скоротилася до 5 разів, розміри — у 2,6 рази. Дія магнетного поля привела до вираженої трансформації хвилястих оксидних плівок, замішаних у розтоп. Їхня форма наближалася до прямої лінії (див. рис. 2, б, позиція 8), а довжина скоротилася в 1,7 рази. Відмінності в структурах, наведених на рис. 2, а та б пов'язані з різними фазами осциляцій швидкісних і теплових параметрів потоку. Перебудова структури течії розтопу магнетним полем привела до зменшення кількості нерівностей на поверхні пластинок у 1,5 рази. Пригнічення вихрів у розтопі магнетним полем (зменшення їхньої кількості до 5 разів і зникнення крупних розміром у $\cong 50$ мкм) спричинило збільшення однорідності розподілу мікрівкраплень емульсії у 2 рази. В пластинчастих частинках, необроблених магнетним полем, дефекти структури розташовувались як в об'ємі, так і на поверхнях контакту з повітрям і підкладкою. В частинках, одержаних під дією поля, дефекти були зосереджені біля поверхонь, а в об'ємі зафіксовано тільки поодинокі.

Таким чином, за допомогою візуалізаторів одержано інформацію про характер внутрішніх течій у розтопі під час розтікання краплі. Виявлено позитивний вплив постійного магнетного поля на пригнічення несталостей у розтопі, пониження дефектів структури, підвищення однорідності розподілу емульсованої фази, утворення інших форм структурних складових, пов'язаних з динамікою розтопу та його кристалізацією.

4. ВИСНОВКИ

Висвітлено, що процес розтікання та тверднення металевої краплі

на підкладинці активно досліджується як базовий у прогресивних і новітніх технологіях з метою вивчення особливостей формування поверхневої та внутрішньої структур крапель для вдосконалення засобів керування ними. Показано, що, через вельми ускладнені математичний апарат прогнозування внутрішніх течій і технічні засоби прямого спостереження за швидкоплинним процесом розтікання краплі з її одночасним твердненням, актуальною є розробка способів одержання інформації про картини еволюції потоку розтопу під час переходу краплі з рідкого стану у тверду пластинчасту частинку.

Розроблено методику візуалізації картин течії розтопу в умовах одночасних процесів розтікання й охолодження краплі шляхом використання стопу на основі Vi , схильного до утворення оксидних плівок, з емульсованими вкрапленнями Zn . За допомогою аналізу характеру розташування в об'ємі затверділої частинки емульсованих вкраплень і оксидних плівок було зафіксовано та візуалізовано картини руху локальних об'ємів розтопу в краплі.

Встановлено, що розтікання краплі на всіх етапах переходу від компактної форми до пластинчастої, окрім останнього етапу перед зупинкою розтопу, супроводжувалося генеруванням несталостей на її поверхні й у об'ємі. Через різні умови охолодження на поверхнях контакту з газовим середовищем і металевою підкладинкою потік стратифікувався за температурою. Внаслідок дії несталостей відбувалася турбулізація розтопу, а через це — обмін локальними об'ємами між стратифікованими шарами. Хвилясті оксидні плівки показували, що відбувалося замішування поверхневих шарів в об'єм розтопу. Наявність округлих скупчень з емульсованих вкраплень, розташованих по всьому об'єму частинки, свідчила про інтенсивне розповсюдження турбулентних вихрів. Несталості на поверхнях частинки спричиняли захват повітря і, як наслідок, виникнення подовжених та округлих каверн.

Визначено, що, через стратифікацію потоку розтопу діамagnetного металу під час розтікання й охолодження на немагнетній підкладинці, постійне магнетне поле, накладене перпендикулярно на потік розтопу, диференційовано діяло на локальні об'єми й інтегровано на усю структуру частинки, що формувалася. Виявлено, що постійне магнетне поле вплинуло як на динаміку, так і на кристалізацію розтопу. Дія поля на динаміку розтопу проявилася в істотному (у 5–10 разів) зменшенні неоднорідностей в структурі частинок, на що вказувала відсутність хвилястих оксидних плівок в об'ємі частинки та наявність лише поодиноких округлих скупчень з емульсованих вкраплень, розташованих біля її поверхні. Під дією постійного магнетного поля оксидні плівки мали незначне викривлення, а округлі скупчення емульсованих вкраплень (тривимірні вихри) перетворились у майже прямі ланцюжкові утворення (вихри, близькі за формою до двовимірних). Магнетне поле пригнічувало збурення

на поверхні частинки, оскільки довжина їхніх хвиль зменшилася вдвічі, подовжені каверни зникли, а кількість округлих скоротилась у п'ятеро. Вплив магнетного поля на структуру стопу, що охолоджувався та тверднув, супроводжувався підвищенням у 2 рази однорідності розподілу емульсованих вкраплень і появою нових форм утворень, які не спостерігались у частинках, необроблених полем.

З'ясовано, що в умовах нестационарного швидкоплинного процесу розтікання металевої краплі розтопу під час формування пластинчастої частинки з її одночасним охолодженням фізичні характеристики розтопу (густина, в'язкість, питома електрична провідність та ін.) змінюються складним чином. Тому необхідні подальші дослідження взаємного впливу теплових і магнетогідродинамічних процесів на формування структури пластинчастих частинок у постійному магнетному полі. Показано, що постійне магнетне поле може сприяти пониженню дефектності (каверн, замішування поверхневих шарів в об'єм, неоднорідного розподілу фаз), і її вплив перспективно застосовувати для виробництва масиву крапель у технологіях нанесення покриттів, спреї-процесі тощо. Також дія постійного магнетного поля в індивідуальному нанесенні крапель (в адитивних технологіях (DoD-процесі), змочуванні мікрооб'єктів тощо) доцільна для пригнічення хвилястості поверхні за коливання краплі під час сходження з сопла, розтікання по підкладинці та перебудови внутрішньої течії з метою усунення фестончатої форми краплі. Поведінка емульсованих вкраплень візуалізатора, зокрема під впливом поля, моделювала процеси, що перебігатимуть під час формування литої структури швидкоохолоджуваних перспективних стопів, фази яких схильні до утворення грубих форм і неоднорідного розподілу, наприклад емульсованих, — систем на основі Cu–Fe, суспензійованих (з утворенням первинних інтерметалідів у рідкій основі), — систем Al–PЗМ.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. C. Karcher and Z. Lyu, *Techn. Messen.*, **3**: 0046 (2023).
2. J.-X. Zhou, H.-W. Xiao, Y.-P. Wang, A. Khan, X.-D. Niu, M.-F. Wen, M.-F. Chen, D.-C. Li, and H. Yamaguchi, *Phys. Fluids*, **34**, No. 12: 122117 (2022).
3. S. H. A. Jaffery, M. F. M. Sabri, S. Rozali, S. W. Hasan, M. H. Mahdavi-fard, D. A. S. AL-Zubiady, and B. R. Ravuri, *Microel. Reliab.*, **139**: 114802 (2022).
4. L. Yang, Z. Li, T. Yang, Y. Chi, and P. Zhang, *Langmuir*, **37**: 10838 (2021).
5. S. Yang, Y. Xing, F. Yang, and J. Cao, *Shock and Vibration*, **2020**: 6650155 (2020).
6. J.-C. Yang, T.-Y. Qi, T.-Y. Han, J. Zhang, and M.-J. Ni, *Phys. Fluids*, **30**, No. 1: 012101 (2018).
7. M. Kamal and U. S. Mohammad, *A Review: Chill-Block Melt Spin Technique, Theories and Applications* (Bentham Science: 2022), p. 42.
8. B. Li, E. J. Lavernia, Y. Lin, F. Chen, and L. Zhang, *Reference Module in Mate-*

- rials Science and Materials Engineering* (Elsevier: 2016), p. 617.
9. Д. А. Калашник, В. А. Шаповалов, И. В. Шейко, Ю. А. Никитенко, В. В. Якуша, *Современная электрометаллургия*, **120**, № 3: 27 (2015).
 10. К. В. Чуистов, А. П. Шпак, А. Е. Перекос, А. Д. Рудь, В. Н. Уваров, *Успехи физики металлов*, **4**: 235 (2003).
 11. А. Ф. Белов, А. А. Бочвар, *Металловедение и обработка цветных сплавов* (Москва: Наука: 1992).
 12. N. Gilani, N. T. Aboulkhair, M. Simonelli, M. East, and I. A. Ashcroft, *Add. Manuf.*, **55**: 102827 (2022).
 13. N. Gilani, N. T. Aboulkhair, M. Simonelli, M. East, I. Ashcroft, and R. J. M. Hague, *Add. Manuf.*, **48**: 102402 (2021).
 14. D. Zhang, L. Qi, J. Luo, H. Yi, W. Xiong, and Y. Mo, *J. Mater. Proc. Techn.*, **264**: 234 (2019).
 15. J. Luo, W. Wang, W. Xiong, H. Shen, and L. Qi, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **122**: 47 (2017).
 16. Y. Chao, L. Qi, H. Zuo, J. Luo, X. Hou, and H. Li, *Int. J. Mach. Tools and Manuf.*, **69**: 38 (2013).
 17. H. Brauer, J. M. Otterbach, M. Ziolkowski, H. Toepfer, M. Graetzel, and J. P. Bergmann, *AIP Conference Proc.*, **2102**, Iss. 1: 080004 (2019).
 18. R. V. Wal, G. M. Berger, and S. D. Mozes, *Exp. Fluids*, **40**, No. 1: 53 (2006).
 19. В. З. Канчуков, Б. С. Карамурзов, В. А. Созаев, В. В. Чернов, *Теплофиз. высоких температур*, **40**, № 4: 563 (2002).
 20. M. V. Gelen, R. Ruter, R. B. J. Koldeneij, D. Lose, J. H. Snoeijer, and H. Gelderblom, *J. Fluid Mech.*, **883**, No. 25: A32 (2020).
 21. N. Ashgriz, *Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications* (Springer: 2011).
 22. C. Josserand and S. Thoroddsen, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **48**: 365 (2016).
 23. M. R. Hassan and C. Wang, *Langmuir*, **37**, No. 45: 13331 (2021).
 24. J. A. Quirke, P. Stamenov, M. E. Möbius, and J. M. D. Coey, *Phys. Fluids*, **34**: 112116 (2022).
 25. Ю. М. Гельфгат, О. А. Лиелаусис, Е. В. Щербинин, *Жидкий металл под воздействием электромагнитных сил* (Рига: Зинатне: 1975).
 26. D. Ren, S. Wu, J. Yang, and M. Ni, *Phys. Fluids*, **32**: 053311 (2020).
 27. В. О. Середенко, О. В. Середенко, О. А. Паренюк, *Металлознание та обробка металів*, № 3: 39 (2014).
 28. M. Qin, C. Tang, S. Tong, P. Zhang, and Z. Huang, *Int. J. Multiph. Flow*, **117**: 53 (2019).
 29. К. Дж. Смитлз, *Металлы: Справочник* (Москва: Металлургия: 1980) (пер. з англ.).
 30. Т. В. Захарова, *Растекание расплавленных металлов по твёрдым поверхностям, смачивание, адсорбция и адгезия фаз* (Автореф. дис. д-ра хим. наук) (Екатеринбург: Институт металлургии РАН: 1997).
 31. J. H. Vaas, L. B. James, J. Peakall, and M. Wang, *J. Sedimentary Res.*, **79**, Nos. 3–4: 162 (2009).

REFERENCES

1. C. Karcher and Z. Lyu, *Techn. Messen.*, **3**: 0046 (2023).
2. J.-X. Zhou, H.-W. Xiao, Y.-P. Wang, A. Khan, X.-D. Niu, M.-F. Wen, M.-

3. F. Chen, D.-C. Li, and H. Yamaguchi, *Phys. Fluids*, **34**, No. 12: 122117 (2022).
4. S. H. A. Jaffery, M. F. M. Sabri, S. Rozali, S. W. Hasan, M. H. Mahdavi, D. A. S. AL-Zubiady, and B. R. Ravuri, *Microel. Reliab.*, **139**: 114802 (2022).
5. L. Yang, Z. Li, T. Yang, Y. Chi, and P. Zhang, *Langmuir*, **37**: 10838 (2021).
6. S. Yang, Y. Xing, F. Yang, and J. Cao, *Shock and Vibration*, **2020**: 6650155 (2020).
7. J.-C. Yang, T.-Y. Qi, T.-Y. Han, J. Zhang, and M.-J. Ni, *Phys. Fluids*, **30**, No. 1: 012101 (2018).
8. M. Kamal and U. S. Mohammad, *A Review: Chill-Block Melt Spin Technique, Theories and Applications* (Bentham Science: 2022), p. 42.
9. B. Li, E. J. Lavernia, Y. Lin, F. Chen, and L. Zhang, *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* (Elsevier: 2016), p. 617.
10. D. A. Kalashnik, V. A. Shapovalov, I. V. Sheyko, Yu. A. Nikitenko, and V. V. Yakusha, *Sovremennaya Ehlektrometallurgiya*, **120**, No. 3: 27 (2015) (in Russian).
11. K. V. Chuistov, A. P. Shpak, A. E. Perekos, A. D. Rud', and V. N. Uvarov, *Prog. Phys. Met.*, **4**: 235 (2003) (in Russian).
12. A. F. Belov and A. A. Bochvar, *Metallovedenie i Obrabotka Tsvetnykh Splavov* [Metallography and Processing of Non-Ferrous Alloys] (Moskva: Nauka: 1992) (in Russian).
13. N. Gilani, N. T. Aboulkhair, M. Simonelli, M. East, and I. A. Ashcroft, *Add. Manuf.*, **55**: 102827 (2022).
14. N. Gilani, N. T. Aboulkhair, M. Simonelli, M. East, I. Ashcroft, and R. J. M. Hague, *Add. Manuf.*, **48**: 102402 (2021).
15. D. Zhang, L. Qi, J. Luo, H. Yi, W. Xiong, and Y. Mo, *J. Mater. Proc. Techn.*, **264**: 234 (2019).
16. J. Luo, W. Wang, W. Xiong, H. Shen, and L. Qi, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **122**: 47 (2017).
17. Y. Chao, L. Qi, H. Zuo, J. Luo, X. Hou, and H. Li, *Int. J. Mach. Tools and Manuf.*, **69**: 38 (2013).
18. H. Brauer, J. M. Otterbach, M. Ziolkowski, H. Toepfer, M. Graetzel, and J. P. Bergmann, *AIP Conference Proc.*, **2102**, Iss. 1: 080004 (2019).
19. R. V. Wal, G. M. Berger, and S. D. Mozes, *Exp. Fluids*, **40**, No. 1: 53 (2006).
20. V. Z. Kanchukov, B. S. Karamursov, V. A. Sozaev, and V. V. Chernov, *Teplofiz. Vysokikh Temperatur*, **40**, No. 4: 563 (2002) (in Russian).
21. M. V. Gelen, R. Ruter, R. B. J. Koldeneij, D. Lose, J. H. Snoeijer, and H. Gelderblom, *J. Fluid Mech.*, **883**, No. 25: A32 (2020).
22. N. Ashgriz, *Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications* (Springer: 2011).
23. C. Josserand and S. Thoroddsen, *Ann. Rev. Fluid Mech.*, **48**: 365 (2016).
24. M. R. Hassan and C. Wang, *Langmuir*, **37**, No. 45: 13331 (2021).
25. J. A. Quirke, P. Stamenov, M. E. Möbius, and J. M. D. Coey, *Phys. Fluids*, **34**: 112116 (2022).
26. Yu. M. Gel'fgat, O. A. Lielausis, and E. V. Shcherbinin, *Zhidkiy Metall pod Vozdeystviem Ehlektromagnitnykh Sil* [Liquid Metal under the Influence of Electromagnetic Forces] (Riga: Zinatne: 1975) (in Russian).
27. D. Ren, S. Wu, J. Yang, and M. Ni, *Phys. Fluids*, **32**: 053311 (2020).
28. V. O. Seredenko, O. V. Seredenko, and O. A. Parenjuk, *Metaloznavstvo ta Obrobka Metaliv*, No. 3: 39 (2014) (in Russian).

28. M. Qin, C. Tang, S. Tong, P. Zhang, and Z. Huang, *Int. J. Multiph. Flow*, **117**: 53 (2019).
29. C. J. Smithells, *Metally: Spravochnik* [Metals: Reference Book] (Moskva: Metallurgiya: 1980) (Russian translation).
30. T. V. Zakharova, *Rastekanie Rasplavlennykh Metallov po Tverdym Poverkhnostyam, Smachivanie, Adsorbtsiya i Adgeziya Faz* [Spreading of Molten Metals over Solid Surfaces, Wetting, Adsorption and Adhesion of Phases] (Thesis of Disser. for Dr. Chem. Sci.) (Ekaterinburg: Institut Metallurgii RAN: 1997) (in Russian).
31. J. H. Baas, L. B. James, J. Peakall, and M. Wang, *J. Sedimentary Res.*, **79**, Nos. 3–4: 162 (2009).