

УДК 669.183.218.5

ДЕФОРМАЦІЯ ВІЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ МЕТАЛЕВОЇ КРАПЛІ В ЕКСПЕРИМЕНТІ ПО ЕЛЕКТРОМАГНІТНІЙ ЛЕВІТАЦІЇ¹

О. О. Малишок

*Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”*

У роботі описані експериментальні і чисельні дослідження форми і перехідної деформації вільної поверхні рідкої краплі сплаву 80 % Ni — 20 % Cr під час левітаційної плавки. З використанням швидкісної візуалізації і обробки зображень визначенні частоти коливання вільної поверхні краплі.

В работе описаны экспериментальные и численные исследования формы и переходной деформации свободной поверхности жидкой капли сплава 80 % Ni — 20 % Cr во время левитационной плавки. С использованием скоростной визуализации и обработки изображений определены частоты колебания свободной поверхности капли.

The article describes experimental and numerical research of form and transient deformation of 80 % Ni — 20 % Cr liquid alloy drop free surface during levitation melting. By using a high-speed visualization and image processing there have been assessed fluctuation frequencies of drop's free surface

Вступ

Одним з головних аспектів в описанні масопереносу між рідкою краплею металу та оточуючим газовим середовищем заключається в дослідженні геометрії зваженої краплі, що, в свою чергу, визначає міжфазну поверхню. Основну увагу в даній роботі приділяли саме цьому аспекту, дослідження якого послужило першим етапом побудови повної моделі експерименту по левітації.

Постановка задачі дослідження

Дослідити вплив таких факторів як температура, величина струму, частота на деформацію вільної поверхні рідкої металевої краплі.

¹ - роботу виконано під керівництвом В.В.Лакомського, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України і к.т.н. доцента Ремізова Г.О., Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”

Методика проведення експерименту

На рис. 1 представлено експериментальну установку. Експерименти проводили в кварцовій трубці діаметром 17,4 мм. Навколо трубки встановлювали індукційну котушку з 6 витків, при цьому зверху були розміщені 2 зустрічних витка. Живлення котушки забезпечувалося генератором частотою 66 кГц і вихідною потужністю 7 кВт. У даній роботі використовували сплав 80 % Ni - 20 % Сг. Зразки важили приблизно 1 г і мали початковий діаметр 3 мм. Рух і форму зваженого зразка реєстрували з використанням швидкісної відеокамери (1000 кадр/с, 768×768 пікселів), розміщеної перед установкою для левітації. Збоку під кутом 45° встановлювали дзеркало для одночасної візуалізації фронтальної і поперечної поверхонь зразка. Це дозволило отримати деяку інформацію про тривимірні геометричні характеристики краплі. Температуру поверхні рідкого металу вимірювали пірометром, поміщеним над зразком. Спостереження проводили при трьох температурах - 1650, 1700 і 1750 °С, відповідно. В процесі плавлення навколо зразка підтримували атмосферу інертного газу (Ar) для запобігання попаданню домішок в рідкий метал унаслідок реакції з навколишнім середовищем. З метою кількісного визначення геометрії і динаміки зваженої краплі використовували фірмову комп'ютерну програму, розроблену для подальшої обробки відеозображень. Ця програма дозволяє автоматично визначати краї краплі на кожному цифровому зображенні, а також розраховувати площу і координати центру тяжіння на поверхні, обмеженій вказаними краями (тобто поперечний переріз краплі, що здається, в площині спостереження). Потім проводили спектральний аналіз розвитку останніх параметрів в часі з метою визначення характеристичних частот динаміки системи.

Зважена крапля відрізняється складними динамічними характеристиками. Форма краплі сильно спотворюється в порівнянні з сферичною. Крапля піддається безперервним коливанням на вільній поверхні, а також періодичним поступальним переміщенням в декількох напрямках по відношенню до рівноважного положення і, в певних умовах, обертанню. У даному розділі представлені основні результати нашого дослідження характеристик вільної поверхні.

На рис. 2 приведений приклад тимчасових змін на фронтальній і поперечній поверхнях перетину краплі. Також приведені відеозображення фронтальної і поперечної поверхонь краплі в різні моменти часу. Слід зазначити, що на фронтальному зображенні відсутня нижня частина краплі, що обумовлене блокуванням зображення котушкою. Результати, представлені на рис. 2, відносяться до спостережень в ході експерименту, який проводився при температурі 1700 °С. Площі поперечного перерізу швидко мінялися з часом, при цьому коливання зображень фронтальної і

поперечної поверхонь не співпадали по фазі. Амплітуда коливань має тільки відносне значення.

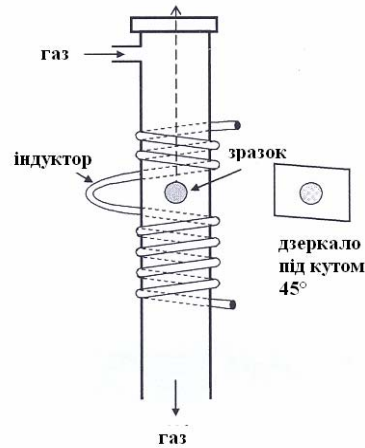


Рис.1 Експериментальна установка для плавлення у зваженому стані

Такі коливання площі поперечного перерізу відображають коливання вільної поверхні краплі, викликані силами поверхневого натягу, впливом магнітного тиску і конвекцією рідкого металу. Спектральний аналіз коливань (виконаний з урахуванням 3000 кадрів) показав наявність подібного домінуючого піку при частоті приблизно 39 Гц на зображеннях фронтальної і поперечної поверхонь. Слід зазначити, що безпосередні спостереження за частотним спектром показують, фактично, наявність серії частотних піків, розташованих близько один до одного і рівних приблизно 39 Гц (по 8 піків для зображень фронтальної і поперечної поверхонь). Наявність безлічі таких піків указує на складну динаміку коливань краплі. Як видно із зображень, приведених на рис. 2, миттєва геометрія краплі сильно відрізняється від сферичної і є неосесиметричною. Перерізи фронтальної і поперечної поверхонь можна апроксимувати як еліптичні. У напівперіоді велика вісь фронтального перерізу коливається між двома похилими перпендикулярними напрямками.

У таблиці 1 приведені виміряні значення частоти коливань площі перерізу для трьох різних температур рідкого металу. Слід зазначити, що дані для температури 1650 і 1700 °С є усередненими результатами по двох серіях вимірювань. Як видно з даних, приведених в таблиці 1, в обмеженому діапазоні досліджень температура не має істотного значення. Розкид результатів знаходиться в межах експериментальної невизначеності.

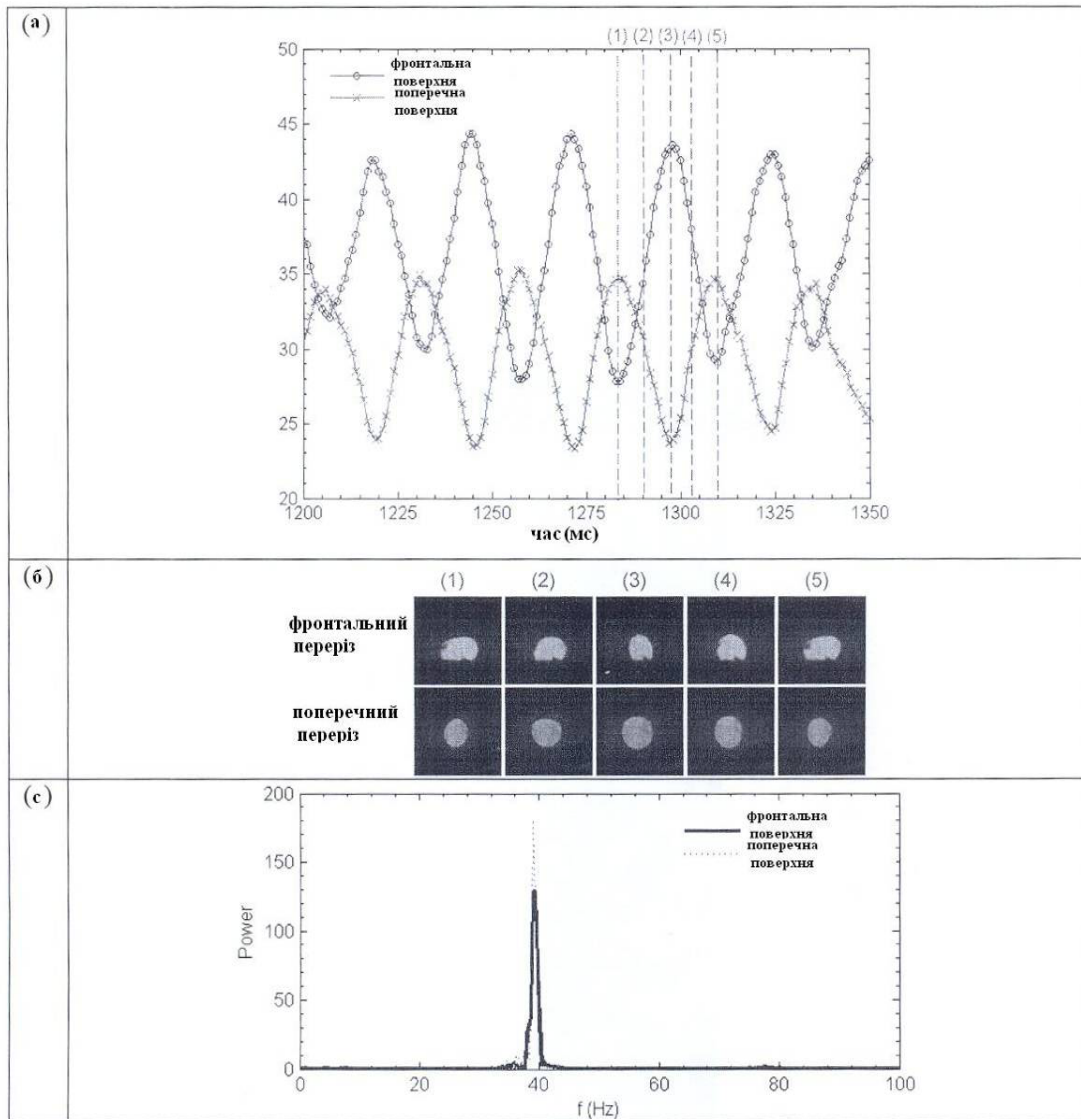
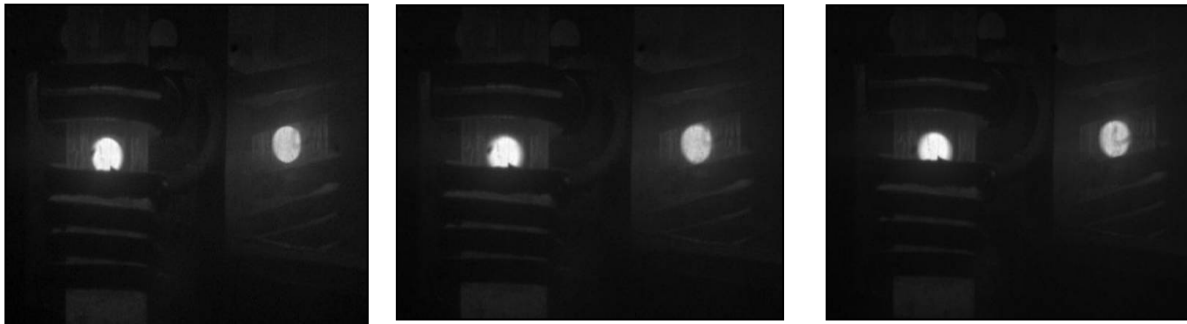


Рис.2 Фронтальний та поперечний переріз краплі: (а) зміни коливань в часі; (б) відеозображення в різні моменти часу; (с) енергетичні спектри коливань Фур'є

Таблиця 1 Вплив температури металу на частоту коливань площі поперечного перерізу краплі. Результати при температурах 1650 і 1700°C

Температура металу	Частота коливань(Гц)	
	Фронтальний переріз	Поперечний переріз
1650°C	40,5	40,5
1700°C	37,7	37,5
1750°C	39	39

На рис. 3 приведені відеозображення фронтальної і поперечної поверхонь краплі при трьох різних температурах, усереднені по декількох періодах коливань площі поперечного перерізу. Ці зображення були отримані шляхом усереднювання 400 послідовних кадрів (відповідних тимчасовому періоду 0,4 с). Цікаво відзначити, що після усереднювання фронтальні і поперечні поверхні краплі стають дуже схожими одна на одну, так що середня геометрія краплі відносно близька до осесиметричної. Встановлено, що в дослідженому температурному діапазоні температура не надає явної дії на середню форму краплі. Проте температура робить відчутний вплив на середнє положення краплі. На рис. 3 видно, що з підвищенням температури зменшується висота краплі в котушці. Це пояснюється зниженням потужності живлення котушки з підвищенням температури (7,5; 6,9; і 6 кВт при 1650, 1700 і 1750 °С, відповідно).



1650°С

1700°С

1750°С

Рис.3 Вплив температури металу на середню форму краплі (зліва – вид фронтальної поверхні; справа – вид поперечної поверхні)

Результати дослідження і їхнє обговорення

У цьому контрольному прикладі розглядається левітація краплі алюмінію радіусом 5 мм в умовах невагомості при використанні одного струмового контуру, розташованого в площині екватора. Ефективне значення струму в котушці - 200 А при частоті струму в котушці 9,6 кГц. Властивості матеріалу ідентичні вказаним вище, за винятком в'язкості, яка встановлена рівною штучному високому значенню 2,38 кг/м·с, що б потік, що розраховується, залишався ламінарним. Електропровідність рідкого алюмінію складає $3,85 \cdot 10^6 \text{ } \Omega^{-1} \text{ м}^{-1}$. Крок часу вибирається рівним 1 мкс, і розмір сітки в поверхневому електромагнітному шарі рівний 90 мкм. Наші результати узгоджуються з результатами, представленими в роботі Бояревича. Кінцева амплітуда деформації краплі, передбачена моделлю,

дуже близька до амплітуди, розрахованою Бояревичем [1]. Проте слід зазначити, що, згідно нашому моделюванню, перехідний етап виявився дещо коротшим.

І, нарешті, модель використовувалася для імітації експерименту по левітації, описаного в попередньому розділі. Краплю хромонікелевого сплаву поміщали в умовах нормальної гравітації в котушці для левітації, показаної на рис. 1. Радіус краплі — 3.1 мм. Властивості матеріалу були наступними: $\gamma = 1,75$ Н/м, $\rho_1 = 8400$ кг/м³, $\mu_1 = 5 \cdot 10^{-3}$ кг/м/с і $\sigma = 10^6 \text{ } \Omega^{-1} \cdot \text{м}^{-1}$. Спочатку металева крапля знаходилася в стані спокою. Крок часу складав 5 мкс, і розмір сітки в електромагнітному шарі був рівним 110 мкм. Важливим параметром в моделі є реальна сила електричного струму, що проходить в котушці. На жаль, цей параметр не визначається приборами установки, і його неможливо зміряти або розрахувати в ході експерименту.

Після серії дослідів з моделюванням було встановлено, для левітації краплі струм в котушці повинен бути в діапазоні 1250 -5625 А. Рівноважну форму зваженої краплі, передбачену моделлю (для $I = 1250$ А), порівнювали (див. рис. 4) з відеозображеннями краплі, записаними в ході експерименту. В цьому випадку була вибрана величина струму 1250 А, оскільки вона забезпечує оптимальну відповідність експериментальних і розрахункових результатів. Розрахункову рівноважну форму отримували шляхом усереднювання різних форм краплі, розрахованих протягом перших 3 секунд моделювання. Відеозображення є результатом усереднювання 400 кадрів. Хороша відповідність спостерігається між розрахунковою формою і фронтальним і поперечним перерізами краплі, спостережуваними експериментально. Модель також добре прогнозує рівноважну висоту краплі. Величина струму робить великий вплив на коливання поверхні. Як показано, коливання поверхні краплі відбуваються в двох різних режимах, залежно від струму в котушці. При низьких струмах (1250 і 2500 А) крапля продовжує коливатися по діаметру протягом тривалого періоду часу з різними амплітудами. Амплітуда цих коливань збільшується з пониженням струму. При високих струмах (5000 і 5625 А) початкові коливання швидко затухають і зникають після 100 – 200 мс.

Висновки

Представлено дослідження перехідної деформації рідкої зваженої краплі із сплаву Ni-Cr під впливом електромагнітних сил. Спостереження, проведені з використанням швидкісної відеозйомки, показали наявність миттєвої асиметричної форми краплі і безперервні коливання її вільної поверхні. Частоту цих коливань визначали за допомогою обробки

зображень. Встановлено, що в дослідженому температурному діапазоні (1650 і 1750 °С) температура металу не робить істотного впливу на цю частоту.

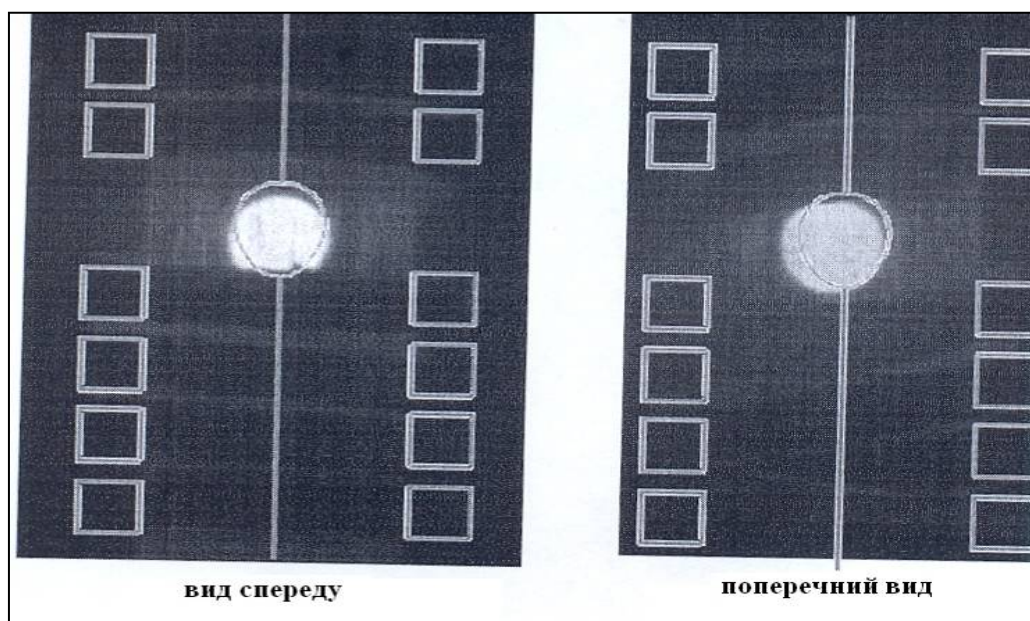


Рис. 4 Порівняння розрахункової та експериментальної спостерігаємої форми зваженої рідкої краплі Ni – Cr в експериментальній установці, представлений на рис.1. 1 – вид спереду; 2 – поперечний вид.

Литература

1. Fromm E Electromagnetic forces and power absorption in levitation melting// J. Appl. Phys.1965 Vol.16-p.653-663.
2. Booth R., Charles J. A. Levitation Melting Apparatus for Phase Equilibria Studies// Nature 1966 Vol.212, N12-p.750 – 751.