

УДК 621.7.044.4

Олександр Мельник

melnikaleksandr908@gmail.com

ORCID: 0000-0002-9778-4109

м. Миколаїв

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОГІДРОІМПУЛЬСНОЇ ОБРОБКИ РОЗПЛАВУ

Розроблено математичну модель розповсюдження пружних хвиль в рідкому металі при його електрогідроімпульсній обробці для визначення ступеня впливу імпульсного навантаження на процеси, що протікають в розплаві. За результатами теоретичних досліджень виявлено додаткові можливості керування механізмом імпульсної дії на оброблюваний розплав для підвищення якості виливків.

Ключові слова: електрогідроімпульсна обробка, розплав, імпульсне навантаження, хвиля тиску, якість виливків

Постановка проблеми

Фундаментальні та прикладні проблеми створення високоякісних литих матеріалів та методи їх обробки ставлять ряд задач, спрямованих на підвищення якості виливків з різних металевих сплавів. Саме якість і позначає фундаментальну проблему сучасного ливарного виробництва. Актуальним науковим напрямком в цьому плані для ливарного виробництва є використання різних технологічних прийомів впливу на рідкі метали і сплави та такі, що кристалізуються. При імпульсних методах обробки розплаву ефективність такого впливу досяжна лише у випадках сприятливої адаптації цих технологій, як до конкретних технологічних прийомів, так і до різних умов металургійного переділу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Проблема підвищення якості литого металу вирішується сукупністю технологічних прийомів, що використовуються на всіх стадіях металургійного переділу. Причому обробка рідкого металу поза пічного агрегату дозволяє як суттєво нівелювати негативний вплив металургійної спадковості, так і забезпечити його ефективнішу кристалізацію і затвердіння, вирівнювання хімічного складу в об'ємі литого

металу, видалення шкідливих домішок і т.п. Умовою розширення функціональних можливостей методів позапічної обробки розплаву є подальший розвиток наукових уявлень про механізми впливу і шляхи підвищення його ефективності [1, 2]. Методи, засновані на зовнішньому фізичному впливі на розплав, також, як інші прийоми обробки рідкого металу, не є універсальними, але їх багатофункціональність забезпечує їм широкий набір технологічних можливостей [1-3]. У їх числі імпульсні методи обробки розплаву, що характеризуються імпульсом досить високої потужності, широкосмуговим спектром частот, що генерується в розплав імпульсом тиску і регульованими параметрами впливу. Внаслідок різних імпульсних впливів рідкий метал піддається фізичним процесам, які призводять до підвищення якості литої продукції [1]. Таким чином, дослідження фізичних процесів, що виникають в розплаві при його обробці імпульсними методами, представляють практичний інтерес для ливарного виробництва.

До імпульсних методів відноситься електрогідроімпульсна обробка (ЕГІО) розплаву в ковші, що є одним з видів рідкофазної обробки і проводиться з метою поліпшення властивостей кінцевого продукту – металевих злитків і виливків, що криста-

лізувалися. Джерелом збурень при такому способі обробки є електророзрядний генератор пружних коливань (ЕРГПК) [4], що зображено на рис. 1. Вплив на рідкий метал або на такий, що кристалізується, здійснюється за допомогою акустичних хвиль через передавальний пружний або пружно-рухливий елемент – мембрану з хвилеводом. У загальному випадку ЕРГПК являє собою розрядну камеру у вигляді товстостінного циліндра з верхнім жорстким і нижнім пружним основами, заповнену робочою рідиною. Між електродом, розташованим на осі камери, і пружною основою відбувається електричний розряд. При цьому в робочій рідині камери виникає хвиля тиску, яка деформує нижню основу. У свою чергу нижня основа передає енергію хвилеводу, зануреному в ківш з розплавом. Таким чином, збурення від хвилеводу генерують в рідкому металі нестационарне поле тисків, яке формує в розплаві фізичні процеси, що надають позитивний вплив на якість структури виливків.

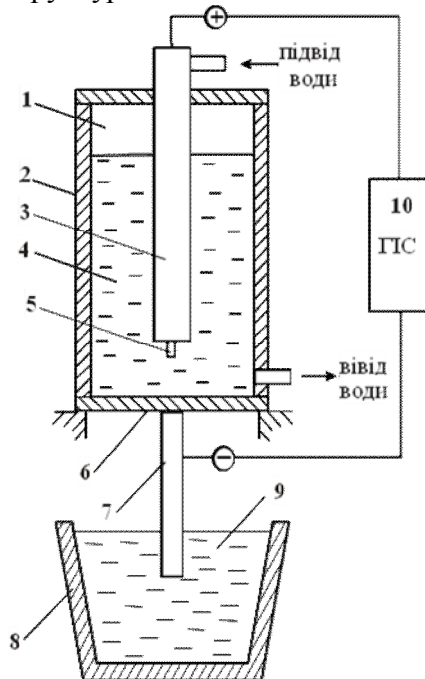


Рис. 1. Загальний вид ЕРГПК:

- 1 – повітряна порожнина; 2 – розрядна камера; 3 – електрод; 4 – робоча рідина; 5 – струмовід; 6 – мембрана; 7 – хвилевід; 8 – ківш; 9 – розплав; 10 – генератор імпульсних струмів

Теоретичним і експериментальним дослідженням ЕРГПК як інструменту інтенсифікації ЕГЮ розплаву присвячено ряд робіт [4-9]. У той же час, в наукових виданнях не в достатній мірі відображено відомості про функціональні можливості зовнішніх структуро-формуючих параметрів.

Функціональні можливості визначаються формуванням в розплаві потенційно реалізованих інструментом обробки фізичних процесів – внутрішніх структурно-кінетичних змін, сукупність яких призводить до зміни його структури і властивостей [10]. В якості цих факторів виступають нестационарне поле тисків, акустична кавітація, розвиток локальних акустичних потоків і течій і т.п. Вони сприяють дегазації, рафінуванню від шкідливих домішок, гомогенізації розплаву, активації потенційних центрів зародкоутворення.

Параметрами навантаження при ЕГЮ є вихідні характеристики ЕРГПК: амплітуда і швидкість переміщення торця хвилеводу; тиск на його торці; тривалість і частота послідовних імпульсів; час обробки. Як показує практичний досвід застосування ЕРГПК [4], основними факторами, що впливають на зовнішні структуро-формуючі параметри, є: характеристики розрядного контуру; геометричні розміри і форма розрядної камери, мембрани і хвилеводу; властивості робочої рідини, що заповнює розрядну камеру; система і режим прокачування рідини в розрядній камері; об'єм повітря у верхній частині розрядної камери; способи монтажу корпусу розрядної камери. Тому дослідження ступеня впливу характеристик ЕРГПК на формування зовнішніх структуро-формуючих параметрів, що передають збурення в розплав, та сприяє виникненню внутрішніх структурно-кінетичних змін в об'єкті обробки є актуальними.

Формулювання цілей

Метою роботи є моделювання фізичних процесів, що відбуваються в розплаві під впливом електрогідроімпульсної обробки.

бки. Це дозволить оцінити ефективність такого фізичного впливу на якість литого металу. Крім того, при обчислювальному експерименті можна віртуально змінювати не тільки параметри технологічного режиму, а й конструктивні параметри технологічної установки, тобто застосовувати методи геометричного моделювання.

Основний матеріал

Для цього необхідно вирішити наступні задачі: розглянути динамічну модель електророзрядного генератора пружних коливань, що описується диференціальним нелінійним рівнянням другого порядку; розробити математичну модель осесиметричної задачі про розповсюдження збурень у розплаві (акустичному середовищі) у двовимірній постановці; провести моделювання процесів впливу на якість виливків, що відбуваються в розплаві при електрогідроімпульсній обробці; на основі отриманих результатів оцінити ефективність режимів обробки.

Методами чисельного моделювання гідродинамічних процесів, що відбуваються в розплаві під впливом робочих параметрів ЕРГПК визначимо нестационарне поле тисків, що виникає в оброблюваному металі на післярозрядній стадії обробки.

Прийmemo постановку плоскої двовимірної осесиметричної задачі (рис. 2) про розповсюдження збурень в акустичному середовищі – розплаві Al . Оскільки швидкість руху торця хвилеводу замала в порівнянні зі швидкістю звуку в металевому розплаві [4], а величина тиску розрідження обмежується механізмом утворення кавітаційних процесів, будемо описувати рух розплаву в акустичному наближенні за допомогою хвильового рівняння в потенціалах швидкості за умови виникнення кавітації:

при $P > P_{кр}$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} - c_0^2 \left[\frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) \right] = 0; \quad (1)$$

при $P \leq P_{кр}$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} + \frac{P_{кр} - P}{\rho_0} = 0, \quad (2)$$

де $\psi(r, z, t)$ – потенціал швидкості;
 $V_z = \frac{\partial \psi}{\partial z}$, $V_r = \frac{\partial \psi}{\partial r}$ – осьова і радіальна

складова швидкості; ρ_0 , c_0 – густина і швидкість звуку в рідкому незбуреному металі відповідно; r, z – просторові координати; t – час; P и $P_{кр}$ – тиск і напруження при статичному розтягуванні в розплаві відповідно.

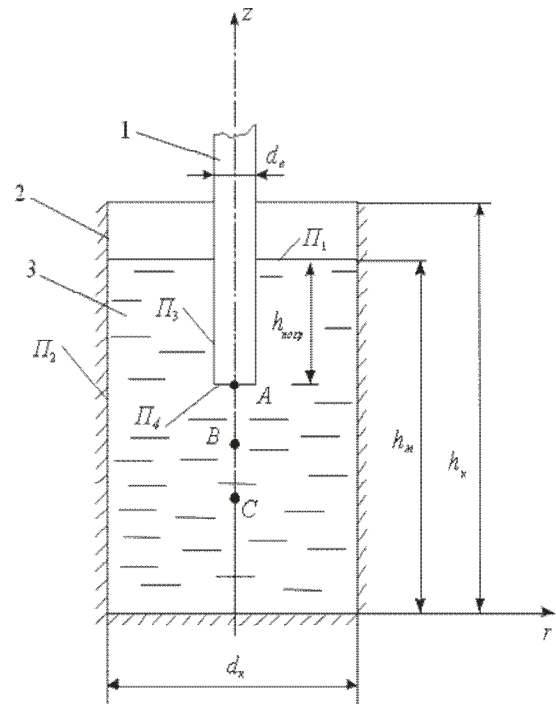


Рис. 2. Геометрична схема ЕГЮ розплаву в ковші:

1 – хвилевід; 2 – ківш; 3 – розплав

Тиск в зоні розвинутої кавітації дорівнює тиску насичених парів рідини, тому для зручності розрахунків прийmemo допущення $P_{кр} = 0$.

Зв'язок потенціалу швидкості з тиском виражається залежністю:

$$P = -\rho \frac{\partial \psi}{\partial t}. \quad (3)$$

На стінках ковша Π_2 , бічних поверхнях хвилеводу Π_3 і насадки Π_4 ставляться граничні умови непротікання (нормальні компоненти швидкості дорівнюють нулю): $\frac{\partial \psi}{\partial \vec{n}} = 0$, де \vec{n} – нормаль до поверхні. На

вільній поверхні розплаву Π_1 надлишковий тиск дорівнює нулю, тобто виконується умова $\frac{\partial \psi}{\partial t} = 0$. Початковими умовами є значення швидкості торця хвилеводу, розраховані при дослідженні динаміки аналогічної хвилевідно-випромінювальної системи в роботі [9]. Відзначимо, що рівняння (1) враховує також явище відбиття хвиль від стінок ковша, бічній поверхні хвилеводу, а також вільної поверхні розплаву.

При моделюванні процесів впливу ЕГЮ в якості основного критерію ефективності обробки прийнято характер пульсацій газових пухирців в акустичному полі, що генерується хвилеводом. Динаміку коливань пухирця в розплаві описано моделлю Херінга-Фліна, що враховує великі швидкості на стадії захоплення [12]:

$$(1-2M)R\ddot{R} + \frac{3}{2}\left(1 - \frac{4}{3}M\right)\dot{R}^2 + \frac{P_n}{\rho} + \frac{R}{\rho c_0}(1-M)\dot{P}_n = 0, \quad (4)$$

де R – радіус пухирця, $M = \frac{\dot{R}}{c_0}$ – число Маха, P_n – повний тиск на стінці пухирця, що включає в себе зовнішній тиск хвилі, що генерується хвилеводом, тиск газу в

пухирці, поверхневий натяг і тиск Стокса [11]. Точкою над символами позначено диференціювання по часу.

Рівняння описаної вище математичної моделі розв'язувалися чисельними методами. Інтегрування рівнянь коливань пухирця проводилося методом Рунге-Кутти, хвильове рівняння – явною трьохшаровою схемою «хрест». Порядок апроксимації за часом і просторовим змінним у всіх рівняннях – не нижче другого.

Для аналізу режимів обробки обрано найбільш типові для промислових умов параметри хвилевідної системи, електродної системи і ковша: довжина хвилеводу – 2 м, висота ковша – 2 м, радіус ковша – 1 м, радіус хвилеводу – 0,075 м, довжина міжелектродного проміжку (довжина каналу розряду) $l_k = 60$ мм. Зазвичай на промислових установках напруга на міжелектродному проміжку становить 50 кВ, індуктивність розрядної ланцюга $L = 1$ мкГн, а енергія, що запасується в батареї конденсаторів змінюється в межах 1,25÷5 кДж, це при заданому значенні напруги відповідає зміні ємності розрядного ланцюга в межах 1÷4 мкФ. Відповідно до цього були взято 4 режими обробки, що представлено в табл. 1:

Табл. 1. Режими обробки розплаву

Номер режиму	Напруга U , кВ	Індуктивність L , мкГн	Ємність C , мкФ
1	50	1	1
2	50	1	1,5
3	50	1	2
4	50	1	4

Колівання газових пухирців розраховувалися на осі під хвилеводом в трьох точках: а) безпосередньо на торці хвилеводу; б) на відстані 15 см від хвилеводу; в) на відстані 30 см від хвилеводу. Початковий радіус пухирця – 0,1 мм. Вибір початкового радіуса пов'язаний з тим, що пухирці такого і більшого розмірів здатні до коагуляції і спливання на поверхню, забезпечуючи ефект дегазації [3]. Фізичні константи для матеріалу хвилеводу відповідають властивостям вуглецевої сталі [8]. У обраних трьох точках

при всіх режимах розраховувалися часові залежності тиску в розплаві і відносного радіуса пухирця. Максимальний ефект обробки досягається при кавітаційному режимі коливань пухирців, коли після кількох пульсацій з великою амплітудою пухирці захоплюються. При захопленні може відбуватися дроблення пухирця на більш дрібні з їх подальшою коагуляцією. У такому режимі виникають найбільші локальні тиски і найбільш високий ефект дегазації внаслідок випрямовуючої дифузії. Менш ефективний

нелінійний режим коливань без захоплення. У цьому режимі коливань пухирець проводить більшу частину часу в фазі розширення, внаслідок чого відбувається його наповнення газом з наступним спливанням. Режим обробки вважається неефективним, якщо коливання пухирців у всіх зонах ковша носять лінійний, гармонійний характер.

Нижче наведено результати розрахунків для деяких з прийнятих вище чотирьох режимів. На рис. 3-4 суцільна лінія – тиск в акустичному полі P , пунктирна – відносний радіус пухирця R/R_0 . Результати, що наведено на рис. 3 відповідають режиму 1. За обраним вище критерієм дегазація досить слабка навіть поблизу хвилеводу, оскільки пухирці здійснюють практично гармонійні коливання і не наповнюються газом. Досить інтенсивний режим обробки (режим 4), при якому поблизу торця хвилеводу досягається кавітаційний характер коливань пухирця ілюструє рис. 4. Істотно нелінійні коливання мають місце до зони, що віддалена на 0,4 м від торця хвилеводу.

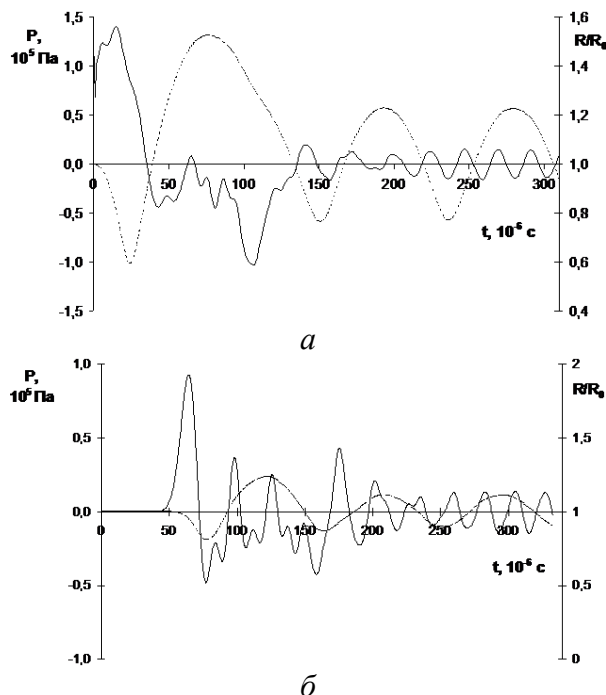


Рис. 3. Тиск та відносний радіус пухирця на торці хвилеводу (режим 1):
а) торець хвилеводу;
б) 15 см від торця хвилеводу

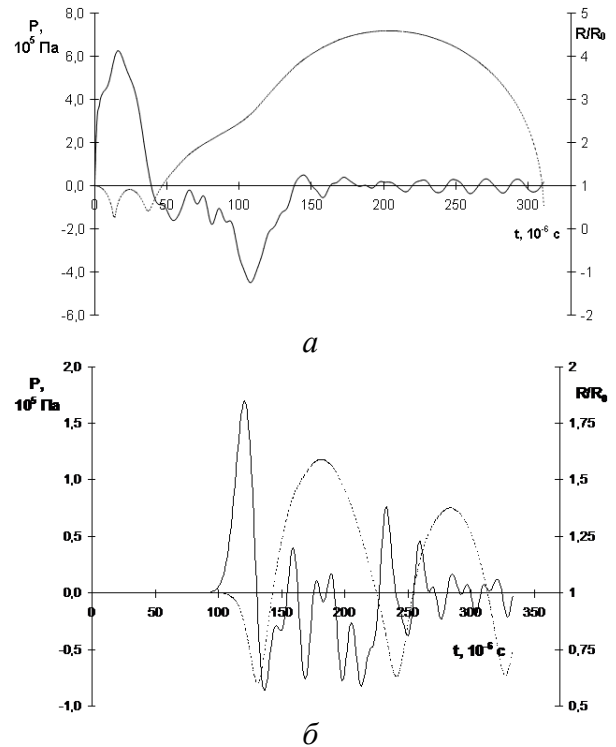


Рис. 4. Тиск та відносний радіус пухирця на торці хвилеводу (режим 4):
а) торець хвилеводу;
б) 30 см від торця хвилеводу

Висновки і перспективи досліджень

Таким чином, у роботі розглянуто модель хвильових та гідродинамічних процесів в розплаві з урахуванням кавітаційних явищ. Проведений аналіз результатів дозволив зробити наступні висновки та рекомендації:

Обробку слід вважати порціонною, оскільки ефект досить швидко згасає при видаленні від хвилеводу. У зв'язку з цим найбільш ефективно обробляти невеликі об'єми розплаву. При обробці же великих об'ємів, ЕГЮ бажано поєднувати з іншими методами перемішування розплаву, які забезпечуватимуть зміну ефективно оброблюваних порцій металу. Зокрема, використовувати переміщення хвилеводу в розплаві. Це досягається, наприклад, розміщенням розрядної камери з хвилеводом на пружній основі, що забезпечує при розрядах їх коливальне переміщення з великою амплітудою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Найдек, В.Л. Процессы внеагрегатной обработки металлических расплавов массового использования [Текст] / В.Л. Найдек // Сучасне матеріалознавство XXI сторіччя. – Киев: Наукова думка, 1998. – С.133-154.
2. Ефимов, В.А. Физические методы воздействия на процессы затвердевания сплавов [Текст] / В.А. Ефимов, А.С. Эльдарханов. – М.: Металлургия, 1995. – 272 с.
3. Грабовый, В.М. Экономичность и эффективность способов внешнего физического воздействия на расплав [Текст] / В.М. Грабовый // Материалы V Международной научной школы-семинара «Импульсные процессы в механике сплошных сред». – Николаев: Атолл, 2003. – С.88-90.
4. Электроразрядные генераторы упругих колебаний [Текст] / Поздеев В.А., Царенко П.И., Бутаков Б.И., Малюшевский П.П. – Киев: Наук. думка, 1985. – 176 с.
5. Галиев, Ш.У. Взаимодействие электроразрядного генератора колебаний с жидким металлом в ковше [Текст] / Ш.У. Галиев, Г.А. Барбашова, Ю.С. Билянский, М.В. Жирнов, В.М. Косенков // Проблемы прочности. – 1991. – № 11. – С.78-82.
6. Цуркин, В.Н. Исследование амплитуды перемещения передающего элемента электроразрядного генератора упругих колебаний [Текст] / В.Н. Цуркин, А.В. Мельник // Электронная обработка материалов. – 2003. – №6 (224). – С.63-69.
7. Цуркин, В.Н. Анализ спектральных характеристик электроразрядного генератора упругих колебаний [Текст] / В.Н. Цуркин, А.В. Мельник, В.М. Грабовый // Зб. наук. праць НУК. – 2005. – № 2 (401). – С.106-112.
8. Цуркин, В.Н. Влияние геометрических характеристик электроразрядного генератора упругих колебаний на перемещение рабочего элемента на послеразрядной стадии [Текст] / В.Н. Цуркин, А.В. Мельник // Электронная обработка материалов. – 2006. – №1 (237). – С.63-69.
9. Цуркин, В.Н. Процессы и характер нагружения расплава электроразрядным генератором колебаний на упругих элементах. Часть I. (Динамика волновода) [Текст] / В.Н. Цуркин, А.В. Мельник // Электронная обработка материалов. – 2008. – №4 (252). – С.82-92.
10. Цуркин, В.Н. Функциональные возможности электрогидроимпульсной обработки расплава в ковше [Текст] / В.Н. Цуркин, В.М. Грабовый, А.В. Синчук // Электронная обработка материалов. – 2006. – № 5 (241). – С.55-61.
11. Основы физики и техники ультразвука [Текст] / Б.А. Агранат, М.Н. Дубровин, Н.Н. Хавский, Г.Н. Эскин. – М: Высшая школа, 1987. – 352 с.

Olexandr MELNIK

Mykolayiv

MODELING OF THE PROCESS OF ELECTROHYDROPULSE TREATMENT OF MELT

The mathematical model of the propagation of elastic waves in a liquid metal with its electrohydroimpulse processing for the determination of the impact of the pulsed loading on the processes occurring in the melt is developed. According to the results of theoretical studies, additional possibilities of controlling the mechanism of impulse action on the processed melt are found for improving the quality of castings.

Keywords: electrohydroimpulse treatment, melt, impulse load, pressure wave, quality of castings.

Александр Мельник

Николаев

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРОГИДРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА

Разработана математическая модель распространения упругих волн в жидком металле при его электрогидроимпульсной обработке для определения степени влияния импульсной нагрузки на процессы, протекающие в расплаве. По результатам теоретических исследований выявлены дополнительные возможности управления механизмом импульсного воздействия на обрабатываемый расплав для повышения качества отливок.

Ключевые слова: электрогидроимпульсная обработка, расплав, импульсная нагрузка, волна давления, качество отливок

Стаття надійшла до редколегії 21.10.2017