

УДК 621.3:537.528:621.745.56
DOI [https://doi.org/10.15589/znp2024.4\(497\).13](https://doi.org/10.15589/znp2024.4(497).13)

EXPERIMENTAL STUDY OF THE ELECTRICAL CHARACTERISTICS OF THE DISCHARGE DURING CONDUCTIVE ELECTRIC CURRENT TREATMENT OF THE MELT

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОЗРЯДУ ПРИ КОНДУКЦІЙНІЙ ЕЛЕКТРОСТРУМОВІЙ ОБРОБЦІ РОЗПЛАВУ

Artem V. Ivanov¹
artiomsan@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3247-6121

Marina V. Turty²
turtymarina3@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3442-9679

Iryna L. Vinnychenko²
i.l.vinnychenko@gmail.com
ORCID: 0000-0002-3768-1060

Andrii V. Obrubov²
andrii.obrubov@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0001-9667-1703

Volodymyr M. Ryabenkiy²
optron2@gmail.com
ORCID: 0000-0002-6998-746X

Yeugen M. Vereshchago²
venmkua@gmail.com
ORCID: 0000-0002-4370-7706

Oleksandr O. Ushkarenko²
oleksandr.ushkarenko@nuos.edu.ua
ORCID: 0000-0002-3159-330X

А. В. Іванов¹,
канд. техн. наук, ст. наук. співр.

М. В. Турти²,
канд. техн. наук, доцент

І. Л. Вінніченко²,
канд. техн. наук, доцент

А. В. Обрубов²,
д-р техн. наук, доцент

В. М. Рябенський²,
д-р техн. наук, професор

Є. М. Верещаго²,
канд. техн. наук, доцент

О. О. Ушкаренко²,
д-р техн. наук, професор

¹*Institute of Pulse Processes and Technologies The National Academy of Science of Ukraine, Mykolaiv*

²*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolaiv*

¹*Інститут імпульсних процесів і технологій Національної академії наук України, м. Миколаїв*

²*Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова, м. Миколаїв*

Abstract. The method of conductive electric current treatment (CECT) of metal melt using electric discharges has shown to be highly effective in improving the quality of cast metal. The studies performed, both by physical experiment and mathematical modeling of the processes occurring at CECT, have allowed us to build the basic provisions of the relevant theory. However, for its further development, the task of experimental study of the time dependence of the electrical characteristics of the discharge is urgent. The aim of this work is to experimentally determine the electrical characteristics of a discharge on liquid metal in an RLC circuit, such as time dependences of current, voltage, melt resistance, and power, at different parameters of the discharge circuit. The discharge was performed on the melt of AL7 alloy at a temperature of 750 °C. The measuring complex of the author's design was used. The inductive component of the voltage was compensated by both physical and mathematical methods. The time dependences of the active resistance, power, discharge energy, and efficiency are based on the time dependences of voltage and current obtained during the measurement. It is shown that an increase in the discharge voltage with constant circuit capacitance and pulse repetition rate has virtually no effect on the amplitude values of the active resistance. But, at the same time, the efficiency of active energy conversion decreases, which is explained by an increase in the value of the reactive resistance. The obtained experimental data will make it possible to narrow the range of variation of input parameters in the simulation modeling of a set of processes at CECT of the melt, which will be based on the real values of electric power characteristics.

Key words: electric current treatment; melt; aluminum-silicon alloys; electric discharge; time dependence of electrical characteristics; high voltage measurements.

Анотація. Метод кондукційної електрострумової обробки (KECO) металевого розплаву за допомогою електричних розрядів показав високу ефективність для підвищення якості литого металу. Виконані дослідження, як методами фізичного експерименту, так і математичним моделюванням процесів, які відбуваються при KECO, дозволив наразі збудувати основні положення відповідної теорії. Але для подальшого її розвитку актуальною постає задача експериментального дослідження часових залежностей електричних характеристик розряду. **Мета роботи** – експериментальне визначення електричних характеристик розряду на рідкий метал у RLC-колі, таких як: часові залежності струму, напруги, опору розплаву, потужностей, за різних параметрів розрядного контуру. Визначення к.к.д. перетворення енергії, яка запасється в ємнісному накопичувачі. Дослідження виконано за допомогою спеціально створеного експериментального стенду. Розряд виконували на розплав сплаву АЛ7 при температурі 750 °С. Застосовано вимірювальний комплекс авторської розробки. Компенсацію індуктивної складової напруги зроблено як фізичним, так і математичним методами. Часові залежності активного опору, потужності, розрядної енергії, а також к.к.д. виконано на базі отриманих при вимірюванні часових залежностей напруги та струму. В роботі показано, що збільшення величини розрядної напруги при незмінних ємності кола та частоті слідування імпульсів практично не впливає на амплітудні значення активного опору. Але, при цьому к.к.д. перетворення активної енергії зменшується, що пояснюється зростанням величини реактивного опору. Отримані експериментальні дані дозволяють при імітаційному моделюванні комплексу процесів при KECO розплаву звужити діапазон варіювання вхідних параметрів, які будуть спиратися на реальні значення електроенергетичних характеристик.

Ключові слова: електрострумова обробка; розплав; алюмінієво-кремнієві сплави; електричний розряд; часові залежності електричних характеристик; вимірювання на високій напрузі.

ВСТУП

Розвиток методів обробки розплаву шляхом накладення зовнішніх фізичних впливів є актуальною проблемою під час реалізації завдань спрямованого керування структурою і властивостями литого металу [1–4]. Одним із таких порівняно нових способів обробки є метод обробки імпульсним електричним струмом за безпосереднього пропускання розрядного струму від ємнісного накопичувача енергії через рідкий метал у ковші, так звана кондукційна електрострумова обробка (KECO) [5–9]. Застосування цієї термінології дозволяє відрізнити такий метод від електромагнітного впливу, який генерується індукційним принципом. Для визначення функціональних можливостей і можливих шляхів удосконалення цього методу обробки необхідне чітке уявлення про процеси, що відбуваються в технологічному вузлі (об'єкті обробки), та їх зв'язок з параметрами розрядного контуру ємнісного накопичувача енергії (ЄНЕ). Ця проблема передбачає широкомасштабні багатфакторні теоретичні та експериментальні дослідження, у першу чергу електричних характеристик розряду на рідкий метал в RLC-колі.

МЕТА ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою цієї роботи є експериментальне визначення електричних характеристик розряду на рідкий метал у RLC-колі, таких як: часові залежності струму, напруги, опору розплаву, потужностей за різних параметрів розрядного контуру. Визначення к.к.д. перетворення енергії, яка запасється в ємнісному накопичувачі.

Отримані за допомогою фізичного моделювання процесів при KECO дані дозволяють, по-перше, визначати та верифікувати характеристики енергетичного портрету зовнішніх структуро-формуєчих параметрів,

а, по-друге, виконувати адекватну постановку відповідних задач математичного моделювання.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

Як об'єкт енергетичного навантаження було обрано ливарний алюмінієвий сплав АЛ7, який виплавляли при температурі 750 °С. Для проведення цих досліджень було створено експериментальний стенд для фізичного моделювання високовольтної електроімпульсної обробки розплавів. Блок-схему експериментального стенду наведено на рис. 1. Даний стенд може мати широкий діапазон варіювання енергетичними параметрами обробки, але у даній роботі було обрано наступні параметри: зарядна ємність $C_0 = 1$ мкФ; зарядна напруга U_0 дорівнювала 7; 10; 14 кВ; частота проходження імпульсів $f = 2$ Гц. Амплітуда зарядної напруги (U_0) реєструвалась кіловольтметром С196. Виконувалась одночасна реєстрація електричних та температурних характеристик процесів електроімпульсного навантажування [10]. Електричний розряд реалізовано на електродну систему типу «стрижень-площина» з міжелектродним проміжком, який дорівнював 10 см. Для позитивного електрода-стрижня використовували металевий пруток діаметром 5 мм. Він занурювався у розплав на глибину 5 мм. Негативним електродом слугувало нефутероване днище ємності. Сплав АЛ7 масою 0,7 кг виплавляли у тигельній плавильній печі опору до температури 720 °С. Саме при цій температурі і проводили обробку струмом. Температуру контролювали хромель-алюмелевою термопарою та терморегулятором Тк-4к Компанії DigiTop. В якості датчика струму використовувався коаксіальний низькоомний шунт з рівномірним розподілом струму за перерізом і з малоіндуктивним приєднанням вимірювальних кабелів. Для реєстрації напруги в процесі розряду використовували змішані (резистивно-ємнісні) малоіндуктивні екрановані подільники напруги, які

приєднували до клеми позитивного електрода навантаження.

У табл. 1 наведено параметри експерименту.

Енергія, яка запасється у конденсаторній батареї, вираховувалась за формулою

$$W_0 = U_0^2 \cdot C_0 / 2, \quad (1)$$

сумарне падіння напруги на міжелектродному проміжку дорівнює

$$u = ir + L \frac{di}{dt}, \quad (2)$$

де u – миттєве значення падіння напруги на розплаві, В;

i – миттєве значення розрядного струму, А;

r – миттєве значення опору розплавленого металу, Ом;

L – власна індуктивність контуру, Гн.

Таблиця 1. Матриця експерименту

№ режиму	1	2	3
C_0 , мкФ	1	1	1
U_0 , кВ	7	10	14
f , Гц	2	2	2
T_p , мкс	8,4	8,4	8,4
W_{03} , Дж	24,5	50	98

ЗП – зарядний пристрій; C_0 – ємнісний накопичувач; КР – керований розрядник; БКР – блок керування розрядником; ПН – подільник напруги; Ш – шунт; ТР – терморегулятор; ТП – термопара; $E_{стр}$ – електрод-стрижень; $E_{пл}$ – електрод-площина; К – ківш; ПП – плавильна піч опору.

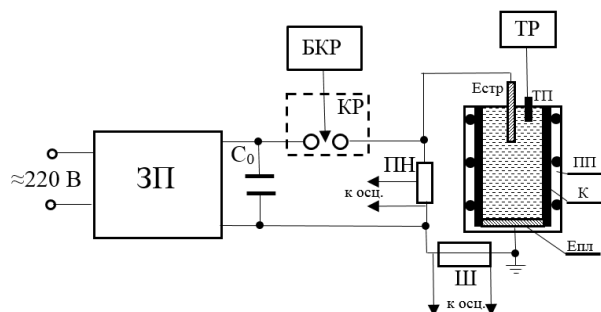


Рис. 1. Блок-схема експериментального стенду

У формулі 2 перший член визначає падіння напруги на активному опорі, а другий – на реактивному. Тому, при реєстрації $U(t)$ та $I(t)$ на екрані осцилографа їх нульові значення не співпадають. Для виокремлення активної складової падіння напруги необхідно компенсувати член $L \frac{di}{dt}$, амплітуда якого пропорційна швидкості зміни струму в розрядному колі. Цю процедуру можливо виконати двома способами: фізична компенсація та математична. Для реалізації першого способу у вимірювальний тракт вводиться компенсаційна рамка, яка являє собою

повітряний трансформатор струму, і компенсація $L \frac{di}{dt}$ здійснюється шляхом підсумовування з вихідним сигналом з повітряного трансформатора струму $\alpha \frac{di}{dt}$, де α – індуктивність компенсаційного кола.

Таким чином на вхід осцилографа подається сигнал

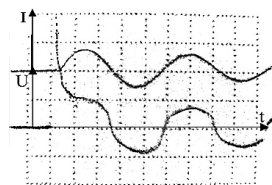
$$u = ir + L \frac{di}{dt} + \alpha \frac{di}{dt}. \quad (3)$$

Величину α підбирають так, щоб сума $\alpha + L$ звернулася в нуль. При цьому на екрані осцилографа досягається ситуація одночасних нульових значень $U(t)$ та $I(t)$.

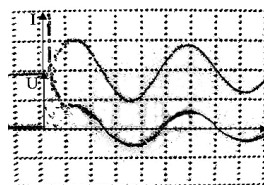
Математична компенсація проводиться за такою ж процедурою, але не потребує ускладнень експериментальних вимірювань. У роботі виконано компенсацію обома методами. Результати практично точно співпали.

На рис. 2 наведені результати вимірювання часових залежностей $I(t)$ – верхня крива та $U(t)$ – нижня крива. Режими 1, 2, 3 позначені у табл. 1.

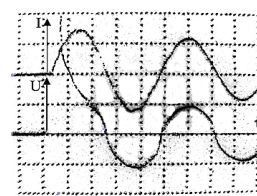
Як бачимо, розряд на рідкометалевий провідник має суттєво коливальний характер.



а



б

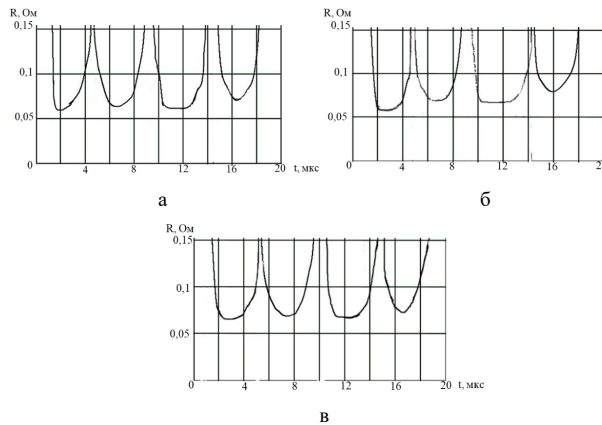


в)

а – режим № 1 ($mI=50$ В/под., $mU=1$ В/под., $mt=2$ мкс/под.); б – режим № 2 ($mI=50$ В/под., $mU=2$ В/под., $mt=2$ мкс/под.); в – режим № 3 ($mI=50$ В/под., $mU=1$ В/под., $mt=2$ мкс/под.).

Рис. 2. Осцилограми струмів і напруг за різних енергетичних параметрів навантаження

За осцилограмами розрядного струму і напруги (рис. 2), використовуючи залежність $u = ir$, знаходимо миттєві значення опору розплаву металу $R(t) = U(t)/I(t)$ (рис. 3). Це дасть нам змогу надалі під час проектування макетів промислових установок правильно узгоджувати навантаження з генератором, з огляду на масштабні коефіцієнти, а також здійснювати розрахунки термодинамічних процесів, що відбуваються в розплаві під час високовольтної електроімпульсної обробки розплаву.



а – режим № 1, режим № 2, режим № 3.

Рис. 3. Часові залежності активного опору розплавленого металу під час проходження імпульсу розрядного струму

Активна потужність (P_a), яка виділяється у розплав під час проходження імпульсу струму, визначається за виразом

$$P_a(t) = U(t) \cdot I(t). \quad (4)$$

Тоді електрична енергія, яка вводиться у розплав при розряді за один імпульс,

$$W_p = \int_0^{\tau} P_a(t) dt. \quad (5)$$

Електрична енергія, яка водиться у розплав за час обробки

$$W_m = \sum_i W_{pi}, \quad (6)$$

де i – загальна кількість імпульсів струму, які введено у розплав за час обробки τ , $i = \tau f$.

Тоді к.к.д. перетворення енергії, що запасється в ємнісному накопичувачі за час розряду на рідкий метал,

$$\text{к.к.д.} = \frac{W_m}{W_0}, \quad (7)$$

де W_0 – енергія, що запасється запасена в конденсаторній батареї.

Результати розрахунків наведено в таблиці 2.

Як видно з табл. 2, при зростанні величини U_0 та, відповідно, W_0 та W_m величина к.к.д. зменшується.

Таблиця 2. Результати розрахунку к.к.д. перетворення енергії, що запасється в ємнісному накопичувачі за час розряду на рідкий метал

№ режиму	C, мкФ	U_0 , кВ	W_0 , Дж	W_m , Дж	к.к.д.
1	1	7	24,5	12,9	0,526
2	1	10	50	25,3	0,51
3	1	14	98	39,8	0,41

Це пояснити можливо тим, що, як свідчить рис. 3, величина активного опору практично не змінюється. У той самий час амплітуда струму зростає так, що $L \frac{di}{dt}$ також зростає. Тобто реактивна складова реакції рідкометалевої системи на електромагнітне навантаження зростає. В роботі [11] висунуто припущення, що саме вона відіграє ключову роль у зміні термодинамічного стану рідкометалевої системи, покращуючи її кристалізаційну здатність. Тому логічно запропонувати для реалізації технології КЕСО у ливарному виробництві імпульси струмів з більш крутим фронтом, наприклад, за допомогою застосування індуктивного накопичувача енергії.

ВИСНОВКИ

1. У роботі шляхом вимірювань часових залежностей струму та напруги при електричному розряді на рідкий металевий провідник отримано залежності активного опору, потужності, енергії розряду, а також величина к.к.д. при трьох режимах навантаження.

2. Результат зменшення величини к.к.д. при зростанні напруги пояснено тим, що при цьому зростає амплітуда розрядного струму, збільшуючи значення реактивної складової реакції рідкометалевого провідника на електромагнітне навантаження. Тому запропоновано для реалізації технології КЕСО у ливарному виробництві використовувати імпульси струмів з більш крутим фронтом.

3. Отримані експериментальні дані дозволяють при імітаційному моделюванні комплексу процесів при КЕСО розплаву звзвити діапазон варіювання вхідних параметрів, які будуть спиратися на реальні значення електроенергетичних характеристик.

REFERENCES

- [1] Metody pidvyshchennya rivnya vlastyvostey splaviv [Methods of improving the properties of alloys] (2001). *Visnyk of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 1, 22-23 [in Ukrainian].
- [2] Dmitry G. Eskin, Mi Jiawei. (2018). *Solidification Processing of Metallic Alloys Under External Fields*. Springer Series in Materials Science <https://doi.org/10.1007/978-3-319-94842-3>
- [3] Gui Wang, Matthew Dargusch, Mark Easton, David StJohn (2018). Fundamentals of Aluminium Metallurgy. Chapter 9 – Treatment by External Fields, 279-332. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102063-0.00009-6>
- [4] Balasubramani, N., Xu, Y., Zhang, Y. et al. (2021). Investigating the Grain Refinement Mechanisms of Pulsed Electric Current, Ultrasonic and Melt Stirring Solidification of Pure Aluminium. *JOM*, 73, 3873–3882. <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04904-7>
- [5] Dirk Rübiger, Yunhu Zhang, Vladimir Galindo, Sven Franke, Bernd Willers, Sven Eckert (2014). The relevance of melt convection to grain refinement in Al–Si alloys solidified under the impact of electric currents, *Acta Materialia*, 79, 327-338, <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.07.037>
- [6] Prigunova A.G. (2020). Phase transformations during the crystallization of the AK7 alloy, neutralization of the harmful effect of iron by treating the melt with a pulsed electric current. *Metal science & treatment of metals*. 26(4), 17-29. <https://doi.org/10.15407/mom2020.04.017>

- [7] Bao X, Ma Y, Xing S, Liu Y, Shi W. Effects of Pulsed Magnetic Field Melt Treatment on Grain Refinement of Al-Si-Mg-Cu-Ni Alloy Direct-Chill Casting Billet. *Metals*. 2022; 12(7):1080. <https://doi.org/10.3390/met12071080>
- [8] Zhao, Z., Li, X., Shan, D., Qi, J., Wang, B., Liu, L., & Ma, X. (2019). Effect of Electric Pulse Treatment on the Corrosion Resistance of HA152-2 Aluminum Brass. *Materials Research*. 22(3), <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0884>
- [9] Liang, C.-L., Lin, K.-L. (2018). The microstructure and property variations of metals induced by electric current treatment: A review. *Material Characterization*, 145, 545-555. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.08.058>
- [10] Vovchenko O.I., Tsurkin V.M. (2004). *Вимірювання імпульсних струмів і напруг при електричному розряді в рідині. Методичні вказівки*. [Measurement of pulse currents and voltages during electrical discharge in liquids. Methodological instructions]. Mykolaiv. [in Ukrainian].
- [11] Zaporozhets, Yu. M., Ivanov, A. V., Kondratenko, Yu. P., & Tsurkin, V. M. (2021). The Features of Controlled Conductive Electric Current Treatment of Liquid Metals. *Advances in Engineering Research*. New-York: Nova Science Publishers, 44, 1-114.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] (2001). Методи підвищення рівня властивостей сплавів. *Вісник НАН України*. № 1. С. 22-23.
- [2] Dmitry G. Eskin, Mi Jiawei. (2018). Solidification Processing of Metallic Alloys Under External Fields. *Springer Series in Materials Science*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-94842-3>
- [3] Gui Wang, Matthew Dargusch, Mark Easton, David StJohn. (2018). *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*. Chapter 9 – Treatment by External Fields, P. 279-332. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102063-0.00009-6>
- [4] Balasubramani, N., Xu, Y., Zhang, Y. et al. (2021). Investigating the Grain Refinement Mechanisms of Pulsed Electric Current, Ultrasonic and Melt Stirring Solidification of Pure Aluminium. *JOM*. Vol.73. P. 3873–3882. <https://doi.org/10.1007/s11837-021-04904-7>
- [5] Dirk Rübiger, Yunhu Zhang, Vladimir Galindo, Sven Franke, Bernd Willers, Sven Eckert. (2014). The relevance of melt convection to grain refinement in Al–Si alloys solidified under the impact of electric currents, *Acta Materialia*. Vol. 79. P. 327-338. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2014.07.037>
- [6] Пригунова, А.Г. (2020). Фазові перетворення при кристалізації сплаву АК7, нейтралізація шкідливого впливу заліза обробленням розплаву імпульсним електричним струмом. *Металознавство та обробка металів*. Т 26, № 4. С. 17-29. <https://doi.org/10.15407/mom2020.04.017>
- [7] Bao X, Ma Y, Xing S, Liu Y, Shi W. (2022). Effects of Pulsed Magnetic Field Melt Treatment on Grain Refinement of Al-Si-Mg-Cu-Ni Alloy Direct-Chill Casting Billet. *Metals*. Vol.12, no.7:1080. <https://doi.org/10.3390/met12071080>
- [8] Zhao, Z., Li, X., Shan, D., Qi, J., Wang, B., Liu, L., & Ma, X. (2019). Effect of Electric Pulse Treatment on the Corrosion Resistance of HA152-2 Aluminum Brass. *Materials Research*. Vol. 22(3). <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2017-0884>
- [9] Liang, C.-L., Lin, K.-L. (2018). The microstructure and property variations of metals induced by electric current treatment: A review. *Material Characterization*. Vol. 145, pp. 545-555. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2018.08.058>
- [10] Вовченко, О.І., Цуркін, В.М. (2004). Вимірювання імпульсних струмів і напруг при електричному розряді в рідині. Методичні вказівки. Миколаїв 31 с.
- [11] Zaporozhets, Yu. M., Ivanov, A. V., Kondratenko, Yu. P., & Tsurkin, V. M. (2021). The Features of Controlled Conductive Electric Current Treatment of Liquid Metals. *Advances in Engineering Research*. New-York: Nova Science Publishers, 44, P. 1-114.

© Іванов А. В., Турти М. В., Вінніченко І. Л., Обрубів А. В.,
Рябенський В. М., Верещаго Є. М., Ушкаренко О. О.
Дата надходження статті до редакції: 24.10.2024
Дата затвердження статті до друку: 06.11.2024