

А. В. Иванов, Н. А. Федченко

Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЭЛЕКТРОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВОВ НА РЕЗУЛЬТАТ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИ ЧИСТОГО АЛЮМИНИЯ

Експериментально досліджено вплив енергетических и временных параметров высоковольтной электроимпульсной обработки на результат кристаллизации технического чистого алюминия.

Ключевые слова: расплав, высоковольтная электроимпульсная обработка, кристаллизация, технически чистый алюминий.

Експериментально досліджено вплив енергетических та часових параметрів високовольтної електроімпульсної обробки на результат кристалізації технічно чистого алюмінію.

Ключові слова: розплав, високовольтна електроімпульсна обробка, кристалізація, технічно чистий алюміній.

It has been experimentally found that power and time parameters of a high-voltage electropulse machining effects on the result of the crystallization of pure aluminum.

Keywords: melt, high-voltage electropulse treatment, crystallization, pure aluminum.

Введение

На сегодняшний день использование алюминия и литейных сплавов на его основе неуклонно увеличивается [1]. Вместе с тем повышаются также требования к экономичности и экологичности технологий, позволяющих обеспечивать необходимый уровень качества литых изделий. Одним из перспективных направлений в сфере тенденций развития методов, позволяющих решать комплекс задач повышения качества литого металла, в том числе сокращение использования химических реагентов при выплавке алюминиевых сплавов, является применение внешних физических воздействий на обрабатываемый металл, в частности электрического тока, непосредственно пропускаемого через обрабатываемый расплав. Данный метод хорошо зарекомендовал себя в лабораторных исследованиях и при решении ряда технологических задач [2]. Однако его широкое распространение сдерживается рядом причин, основная из которых – отсутствие чёткой взаимосвязи в системе «параметры тока-механизмы воздействия-структура и свойства отливки». И хотя существует довольно большое количество работ, как отечественных, так и зарубежных исследователей, процедура взаимодействия электрического тока и жидкометаллической среды, процесс формирования благоприятной структуры литого металла при таком внешнем воздействии представляют собой пока «чёрный ящик». Например, известны работы [3, 4], где управление кристаллизацией, рост и подплавление ветвей дендритов обусловлены прохождением в расплаве электрического тока. Известны работы, где воздействие объясняется влиянием тока на фазы в момент их образования [5-7]. Однако, в этих моделях рассматривали лишь узкие длинные проводники, в которых распределение тока или равномерно по сечению, или близко к нему. В реальных же случаях распределение по сечению, даже постоянного, не говоря уже о переменном и импульсном электрическом токах, далеко от равномерного. Возникающие при этом градиенты температур по сечению отливки, гидродинами-

ческие процессы, воздействие пондеромоторных сил, волновые процессы [8-10] в совокупности с описанными выше механизмами воздействия не позволяют точно определить, а зачастую и выделить, наиболее значащие факторы воздействия в определённых ситуациях. Поэтому многие из полученных на сегодняшний день экспериментальных данных по эффективности обработки с определённым набором управляющих параметров нужно перепроверять, или не применимы в технологиях, либо же не позволяют подтвердить теоретические положения. В связи с этим экспериментальные исследования, особенно в случае высокочастотного переменного и импульсного электроточковых воздействий, направленные на то, чтобы в натурном эксперименте установить значащие факторы обработки или показать влияние на тот, либо иной аспект формирования благоприятной структуры и свойств отливок из алюминиевых сплавов, являются актуальной научно-практической задачей.

Цель данной работы – например технически чистого алюминия экспериментально показать влияние высоковольтной электроимпульсной обработки на подавление транскристаллизации и уменьшение зоны столбчатых кристаллов.

Идея исследований

Интерес авторов в данной работе к росту столбчатых кристаллов и появлению транскристаллизации в отливках из алюминиевых сплавов связан с задачей формирования благоприятной макроструктуры получаемых отливок. Чистый алюминий в силу высокой скорости кристаллизации склонен к образованию обширной зоны столбчатых кристаллов и соответственно к транскристаллизации. Поэтому, на его примере наиболее удобно применить эффект высоковольтной электроимпульсной обработки (ВЭО). Формирующаяся макроструктура во многом определяет образование пористости в отливках, прочность и пластичность, а также влияет непосредственно на положительные изменения в других структурных уровнях, получаемого литого изделия, и наоборот [11, 12].

Относительное распределение в объёме слитка зоны столбчатых и равноосных кристаллов имеет большое практическое значение. Зона столбчатых кристаллов обладает высокой плотностью и прочностью. Но поскольку в местах стыка столбчатых кристаллов скапливается большое количество неметаллических включений и нерастворимых примесей, металл приобретает малую пластичность, и при последующей горячей обработке давлением в этих местах могут появиться трещины. Степень развития столбчатых кристаллов зависит, главным образом, от химического состава металла, степени его перегрева, формы и температуры изложницы, а также температуры и толщины её стенок. Известные теории [13] не могут указать надёжные способы устранения зоны столбчатых кристаллов в отливках и слитках конструкционных сплавов.

Идея данного исследования состояла в том, что зарождение кристаллов начинается в тонком приповерхностном слое расплава, по которому в силу скин-эффекта протекает импульс разрядного тока. В силу происходящих при импульсном воздействии нестационарных электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов в периферийной области проводника предполагалось придать процессу кристаллизации объёмный характер за счёт взаимодействия указанных выше факторов с уже образовавшимися кристаллами и уменьшить температурный градиент по сечению слитка (модель термостата).

Экспериментальные исследования и обсуждение результатов

На первом этапе работы с использованием алюминия технической чистоты исследовали возможность подавления роста равноосных кристаллов при направленной кристаллизации с дна ёмкости с расплавом. После расплавления в печи сопротивления (ПС) расплав переливали в холодные формы (1) (рис. 1), которые были расположены на массивной медной платформе. Она служила и отрицательным электродом, и охладителем. Роль второго холодильника выполнял верхний электрод (2), помещённый в расплав. Масса алюминия в формах составляла

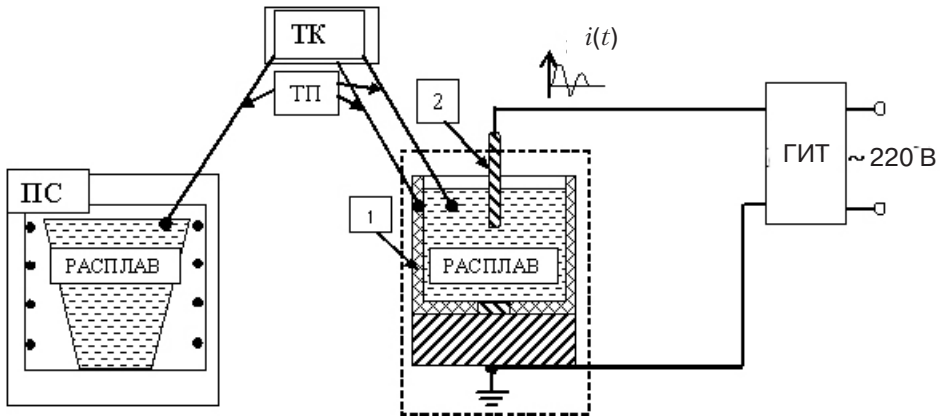


Рис. 1. Блок-схема экспериментального стенда

340 гр. Температуру контролировали с помощью созданного на базе измерителя регулятора ОВЕН ТРМ202 термографического комплекса (ТК) с передачей данных на персональный компьютер. Измерение температуры расплава и регистрацию кривых охлаждения производили малоинерционными хромель-алюмелевыми термопарами (ТП) (ГОСТ 3044-94). Параметры генератора импульсных токов (ГИТ) в данном эксперименте: выходное напряжение ГИТ (U_0) – 7 кВ; частота следования разрядных импульсов (f) – 2 Гц.

На рис. 2 представлена кривая охлаждения алюминия. Руководствуясь этими данными, варьировали длительность обработки τ в температурных интервалах (табл. 1), определяемых согласно рис. 2.

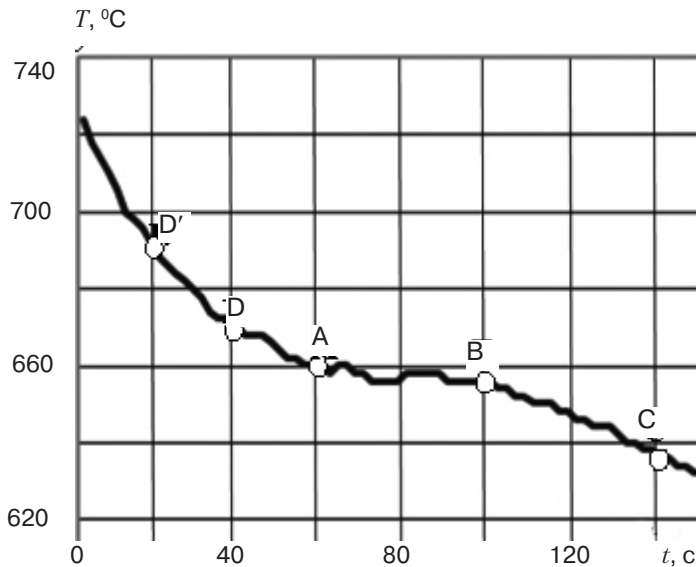


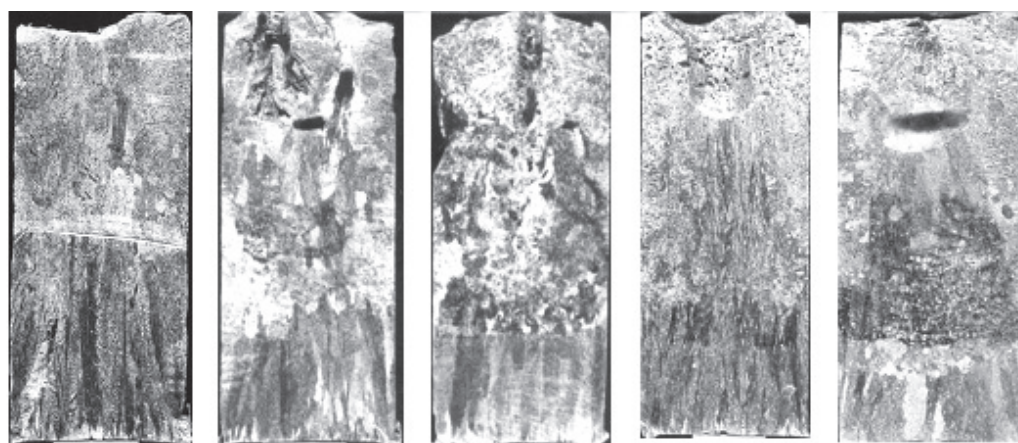
Рис. 2. Кривая охлаждения алюминия у дна формы (возле медного холодильника)

Таблица 1. Длительность обработки на различных температурных интервалах

Номер образца	1	2	3	4
τ , с	40	80	60	100
Температурный интервал обработки	AB	AC	DB	DC

Получение и обработка расплавов

Макроструктура полученных контрольных, то есть без обработки, слитков (рис. 3, табл. 2) характеризуется наличием чётко выраженной нижней зоны столбчатых кристаллов. Центральная часть образцов представляет собой зону равноосного зерна. ВЭО способствует сужению нижней столбчатой зоны и измельчению макроструктуры, хотя полностью подавить направленный рост зерна не удалось. Так, в обработанном металле уменьшение высоты зоны столбчатых кристаллов составляет в среднем 50 %. Макроструктура алюминия, не подвергнутого ВЭО, как в зоне столбчатых, так и в зоне равноосных кристаллов, отличается грубодендритным строением с размером осей первичных дендритов от 8 до 10 мм, в отдельных случаях – до 20 мм. Структура отливок из обработанного расплава хотя и имеет дендритное строение, но развитие дендритов значительно слабее, а размер осей дендритов составляет в среднем 3 мм. Пористость, имеющая в контрольном металле характер макротрещин, в опытных образцах имеет вид мелких пор, равномерно расположенных по телу отливки, что даёт возможность их устранения при последующей обработке. Заметим, что макроструктуру можно улучшить по мере расширения интервала обработки, когда ВЭО начинается немного выше температуры плавления и частично захватывает область твёрдого состояния. Положительный эффект воздействия тока на расплав выше температуры плавления можно объяснить тем, что после обработки расплав становится более однородным и это приводит к зарождению большего, по сравнению с необработанным расплавом, количества центров кристаллизации [10, 14].



Без обработки

1

2

3

4

Рис. 3. Слитки алюминия технической чистоты, закристаллизовавшиеся в условиях направленного теплоотвода

Таблица 2. Показатели макроструктуры отливок

Номер образца	без обработки	1	2	3	4
Ширина зоны столбчатых кристаллов, мм	35	30	22	21	22
Диаметр столбчатых зёрен, мм	5,6	4,7	4,3	3,7	3,7
Диаметр равноосных зёрен, мм	5,7	4,7	4,2	3,6	2,7

На втором этапе обработку алюминия осуществляли в температурном интервале, соответствующем жидкому состоянию расплава. Такая обработка с технологической точки зрения имитирует обработку в печи или в промежуточной ёмкости перед разливкой. Металл подвергали ВЭО в промежуточной ёмкости в температурном интервале $D'A$ (рис. 2), время обработки заняло 40 с. Масса металла в промежуточной

Получение и обработка расплавов

ёмкости – 1100 гр. Затем обработанный металл переливали в массивные металлические формы. Масса металла в форме 100 гр, масса самой формы более чем в 30 раз превышает массу заливаемых образцов. В этом случае обеспечивали наличие трёхстороннего охладителя. Варьировали амплитуду импульса тока, реализуя это путём изменения напряжения U_0 (7, 10, 14 кВ), что соответственно меняло амплитуду разрядного тока в 1,5 и 2 раза. Частоту следования импульсов поддерживали постоянной $f = 2$ Гц, температура заливки расплава в промежуточную ёмкость – 700 °С. Данные металлографического анализа приведены на рис. 4 и в табл. 3.

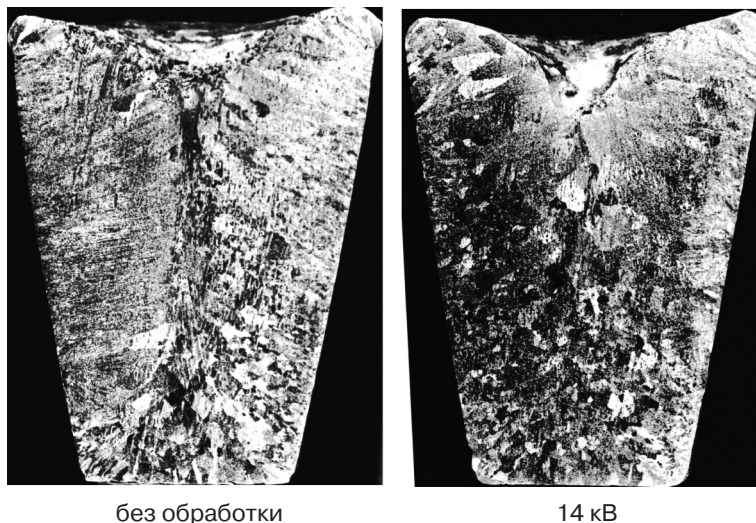


Рис. 4. Макроструктуры необработанного и обработанного образцов, закристаллизовавшихся в массивной металлической форме

Таблица 3. Количественный анализ макроструктуры образцов алюминия технической чистоты

Номер образца	Диаметр равно- осных зёрен, мм	Ширина зоны столбча- тых зёрен, мм	Диаметр столбчатых зёрен, мм
Без обработки	–	транскристаллизация	1,8
7 кВ	–	транскристаллизация	3,0
10 кВ	–	транскристаллизация	2,8
14 кВ	3,3	2,9	1,6

Анализируя полученные данные можно констатировать, что транскристаллизация подавляется лишь при 14 кВ, уступая место в центральной области образца равноосным кристаллам.

Полученные результаты подтверждают выдвинутую ранее гипотезу, что для обработки жидкого металла с частотой следования разрядных импульсов 1 Гц требуется увеличение амплитуды разрядного тока и более мощные энергетические режимы, что подтверждается данными работы [14]. Таким образом, экспериментально доказано, что ВЭО однозначно влияет на результат кристаллизации расплава. Также установлено, что полное предотвращение столбчатой кристаллизации и управление процессом кристаллизации с помощью электроимпульсной обработки можно осуществлять разными методами. А именно – повышением мощности воздействия за счёт силы тока и за счёт частоты следования

импульсов тока, соизмеряя её с линейной скоростью роста межфазной поверхности, варьируя температурный интервал ВЭО при фиксированных энергетических параметрах.

Выводы

- В работе экспериментально установлено влияние высоковольтной электроимпульсной обработки расплавов на результат кристаллизации технически чистого алюминия, процесс образования транскристаллизации и рост зоны столбчатых кристаллов.

- Установлено, что с помощью температурного интервала обработки, при неизменных энергетических параметрах, можно уменьшить высоту зоны столбчатых кристаллов в среднем на 50 %. Размер дендритов в литых образцах из обработанного расплава уменьшается более, чем в 2,5 раза, по сравнению с образцами из необработанного металла.

- Установлено, что пористость в необработанном металле имеет характер макротрещин, а в подвергнутом воздействию разрядных импульсов – вид мелких пор, равномерно расположенных по телу отливки, что даёт возможность их устранения при последующей обработке.

- Установлено, что управлять процессами формирования макроструктуры слитка можно путём изменения амплитуды разрядного тока, частоты следования импульсов тока, температурного интервала обработки. Так, при ВЭО с напряжением на конденсаторной батарее 14 кВ, при обработке в жидком состоянии, полностью убрана транскристаллизация в слитке и обеспечено его равномерное мелкодендритное строение.



Список литературы

1. Фридляндер И. Н. Алюминиевые сплавы – перспективный материал в машиностроении / И. Н. Фридляндер // Машиностроение и инженерное образование. – 2004. – № 1. – С. 11-15.
2. Ivanov A. V. Electric current treatment of liquid and crystallizing alloys in casting technologies / A. V. Ivanov, V. N. Tsurkin, A. V. Sinchuk // Surf. Eng. Appl. Elect. – 2011. – Vol. 46, №5. – P. 456-464.
3. Xiliang Liao. Effects of electric current pulse on stability of solid/liquid interface of Al-4.5 wt.% Cu alloy during directional solidification / Liao Xiliang; Zhai Qijie; Song Changjiang; Chen Wenjie; Gong Yongyong // Materials Science and Engineering. – 2007. – Vol. 466. – P. 56-60.
4. Zhang Yunhu. Influence of Electric-Current Pulse Treatment on the Formation of Regular Eutectic Morphology in an Al-Si Eutectic Alloy / Yunhu Zhang, Chanjiang Song, Liang Zhu, Hongxing Zheng, Honggang Zhong, Qingyou Han, and Qijie Zhai // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2011. – Vol. 42, № 3. – P. 604-611.
5. Деев В. Б. Влияние электрического тока на кристаллизацию алюминиевых сплавов, содержащих железо / В. Б. Деев, И. Ф. Селянин, Н. В. Башмакова // Литейщик России. – 2007. – № 8. – С. 12-15.
6. Миненко Г. Н. Механизм обработки металлического расплава электрическим током в процессе модифицирования / Г. Н. Миненко // Электронная обработка материалов. – 1990. – № 6. – С. 42-44.
7. Дорофеев А. В. Обработка алюминиевых расплавов электротоком / А. В. Дорофеев, А. Б. Килин, А. С. Тортишников // Литейщик России. – 2002. – № 2. – С. 19-21.
8. Ivanov A. V. A Study of the Electromagnetic and Hydrodynamic Processes in a Liquid-Metal Conductor Exposed to Current Pulses / A. V. Ivanov, A. V. Sinchuk, A. S. Bogoslavskaya // Surf Eng Appl Electrochem. – 2011. – 47 (1). – P. 28-34.
9. Ivanov A. V. Effect of the Technological Parameters of the Melt Treatment by a Electric Pulse Current on the Mixing Process / A. V. Ivanov, A. V. Sinchuk, A. S. Ruban // Surf Eng Appl Electrochem. – 2012. – 48 (2). – P. 180-186.
10. Борисов Г. П. О высоковольтной электроимпульсной обработке расплава / Г. П. Борисов, В. Н. Цуркин, А. В. Синчук, А. В. Иванов // Металлургия машиностроения. – 2010. – № 5. – С. 33-39.

11. Цуркін В. Н. Вплив електрогідроімпульсної обробки розплаву на елементи різних структурних рівнів в металі / В. Н. Цуркін, Г. В. Волков, А. В. Сінчук // Металознавство та обробка металів. – 2004. – № 4. – С. 37-43.
12. Цуркин В. Н. Влияние системы структуры металлического расплава на его физические свойства / В. Н. Цуркин // Вісник українського матеріалознавчого товариства. – 2011. – Вип. № 4. – С. 11-19.
13. Бялік О. М. Структурний аналіз металів / О. М. Бялік, С. Є. Кондратюк, М. В. Кіндрачук, В. С. Черненко. – К.: «Політехніка», 2006. – 326 с.
14. Цуркин В. Н. Кондукционная электротоксовая обработка расплава сплава А390 / В. Н. Цуркин, А. В. Иванов, Н. А. Федченко, С. С. Череповский, Н. А. Васянович, М. Л. Фещук / Процессы литья. – 2014. – № 6. – С. 32-40.



References

1. Fridliander I. N. (2004). Aluminiumiievyye splavy – perspektivnyi material v mashinostroiinii [*Aluminium alloys – a promising material in mechanical engineering*]. Mashinostroiienie i inzhenernoie obrazovanie, № 1, pp. 11-15 [in Russian].
2. Ivanov A. V., Tsurkin V. N., Sinchuk A. V. (2011) Electric current treatment of liquid and crystallizing alloys in casting technologies. Surf. Eng. Appl. Elect. Vol. 46, № 5, pp. 456-464 [in English].
3. Xiliang Liao, Qiiie Zhai; Changiiang Song; Weniie Chen; Yongyong Gong. (2007). Effects of electric current pulse on stability of solid/liquid interface of Al-4.5 %wt. Cu alloy during directional solidification. Materials Science and Engineering, vol. 466, pp. 56-60 [in English].
4. Zhang Yunhu, Song Chaniiang, Zhu Liang, Zheng Hongxing, Zhong Honggang, Han Qingyou, and Zhai Qiiie (2011). Influence of Electric-Current Pulse Treatment on the Formation of Regular Eutectic Morphology in an Al-Si Eutectic Alloy. Metallurgical and Materials Transactions B. Vol. 42, № 3, pp. 604-611 [in English].
5. Deiev V. B., Selianin I. F., Bashmakova N. V. (2007). Vliianie elektricheskogo toka na kristallizaciiu aluminiumiievyykh splavov, sodержashchih zhelezo. [*Influence of electric current on the crystallisation of aluminum alloys containing iron*]. Liteishchik Rossii, № 8, pp. 12-15 [in Russian].
6. Minenko G. N. (1990). Mehanizm obrabotki metallicheskogo rasplava elektricheskim tokom v protsesse modifitsirovaniia [*The mechanism current treatment of metal melt during modification*]. Elektronnaia obrabotka materialov, № 6, pp. 42-44 [in Russian].
7. Dorofeiev A. V., Kilin A. B., Tortishnikov A. S. (2002). Obrabotka aljuminiumiievyykh raspлавov jelektrotokkom [*Current treatment of aluminum alloys*]. Liteishchik Rossii, № 2, pp. 19-21 [in Russian].
8. Ivanov A. V., Sinchuk A. V., Bogoslavskaiia A. S. (2011). A Study of the Electromagnetic and Hydrodynamic Processes in a Liquid-Metal Conductor Exposed to Current Pulses. Surf. Eng. Appl. Electrochem, 47 (1), pp. 28-34 [in English].
9. Ivanov A. V., Sinchuk A. V., Ruban A. S. (2012). Effect of the Technological Parameters of the Melt Treatment by a Electric Pulse Current on the Mixing Process. Surf. Eng. Appl. Electrochem, 48 (2), pp. 180-186 [in English].
10. Borisov G. P., Curkin V. N., Sinchuk A. V., Ivanov A. V. (2010). O vysokovol'tnoi elektroimpul'snoi obrabotke raspлава [*On the high-voltage electropulse machining of melt*]. Metallurgiiia mashinostroiinii, № 5, pp. 33-39 [in Russian].
11. Tsurkin V. N., Volkov H. V., Sinchuk A. V. (2004). Vplyv elektrohidroimpul'snoi obrobky rozплаву na elementy riznykh strukturykh rivniv v metali [*The impact of electrohydropulse machining of melt on elements of different structural levels in metal*] Metaloznavstvo ta obrobka metaliv, № 4, pp. 37-43 [in Ukrainian].
12. Curkin V. N. (2011). Vliianie sistemy struktury metallicheskogo raspлава na yego fizicheskie svoistva [*Effect of the structure metallic alloy on its physical properties*] Visnyk ukrains'koho materialoznavchoho tovarystva. Is. № 4, pp. 11-19 [in Russian].
13. Bialik O. M., Kondratiuk S. Ye., Kindrachuk M. V., Chernenko V. S. (2006). Strukturnyi analiz metaliv [*Structural analysis of metals*] Kyiv: Politekhnik, 326 p. [in Ukrainian].
14. Curkin V. N., Ivanov A. V., Fedchenko N. A., Cherepovskii S. S., Vasianovich N. A., Feshchuk M. L. (2014). Kondukcionnaia elektrotoksovaia obrabotka raspлава сплава А390 [*Conduction current treatment of melt alloy А390*]. Protsessy lit'ia, № 6, pp. 32-40 [in Russian].

Поступила 15.03.2016