

**Kyung-Hyun Kim**<sup>1</sup>, Ph.D., Principal Researcher, e-mail: khkim3332@hanmail.net

**Sim Hyum Suk**<sup>2</sup>, President, e-mail: hs8388@dscastr.co.kr

**В.Н. Цуркин**<sup>3</sup>, канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., e-mail: dpta@iipr.com.ua

**А.В. Иванов**<sup>3</sup>, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: artiomsan@gmail.com

**А.Д. Зайченко**<sup>3</sup>, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: a.d.zaichenko@gmail.com

**А.А. Жданов**<sup>3</sup>, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: zhdanoff.aleksander@gmail.com

**Н.В. Честных**<sup>3</sup>, мл. науч. сотр., e-mail: dpta42@gmail.com

<sup>1</sup>Korea Institute of Materials Science, Changwon, Korea

<sup>2</sup>Dongsan Tech Co., Ltd, Changwon, Korea

<sup>3</sup>Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, г. Николаев, Украина

## Влияние энергетической обработки расплава на механические свойства алюминиевого сплава В95пч

*Для обработки расплава сплава В95пч использованы различные методы: реагентами, энергетически и комплексно. При энергетическом воздействии использовали три режима электрического тока (переменный, постоянный пульсирующий и импульсный), а также электрогидравлическую обработку. При определенных параметрах импульсного электрического тока после обработки реагентами получено увеличение  $\sigma_{\text{в}}$  более чем в 3 раза. Микроструктура претерпевает позитивные изменения в контексте ее модифицирования, характеризуется однородностью.*

**Ключевые слова:** расплав, реагентная обработка, энергетическая обработка, микроструктура, свойства.

**И**з деформируемых сплавов системы Al-Zn-Mg-Cu полуфабрикаты получают методом непрерывной разливки. Проблемы качества при этом решают как доводкой расплава в печи или в промежуточном ковше, так и на последующих этапах кристаллизации и твердения, а также при термообработке уже в твердом состоянии. На первом этапе можно использовать реагентные методы обработки, вводя различные добавки химических элементов, а также методы энергетической обработки, воздействуя на расплав полями различной физической природы. Как известно, металлические системы обладают признаками наследственности, поэтому обработка расплава играет важную роль при решении проблемы повышения качества конечного продукта. Прежде всего, это повышение служебных свойств за счет модифицирования структуры и дегазации сплава. В этом плане актуальной является задача повышения показателей качества полуфабриката после непрерывной разливки, что в дальнейшем приведет к требуемым показателям качества готовых к эксплуатации изделий.

**Цель данной работы** – показать функциональные возможности обработки расплава сплава системы Al-Zn-Mg-Cu при пропускании электрического тока и его электрогидроимпульсной обработки в повышении показателей качества литого полуфабриката.

Заявленные в цели работы методы энергетической обработки хорошо себя зарекомендовали при воздействии на литейные алюминиевые расплавы [1–3]. В случае деформируемых сплавов функциональные возможности этих методов мало изучены. Поэтому в данной работе сделана попытка с по-

мощью одного экспериментального стенда изучить влияние на расплав различных принципов энергетической обработки, в том числе в комплексе с реагентной обработкой.

Выплавку сплава В95пч одинаковой массы (400 г) проводили в шахтной печи сопротивления при температуре 740 °С. После изотермической выдержки в течение 15 минут проводили обработку или переменным током, или выпрямленным пульсирующим током, или высоковольтным импульсным током. Также использовали электрогидроимпульсную обработку (ЭГИО). Для электротокерной обработки (ЭТО) использовали параллельные электроды, для ЭГИО – титановый волновод. Варьировали время обработки и частоту следования импульсов при обработке импульсным током и ЭГИО. Энергетические характеристики воздействия выдерживали постоянными.

Кроме того, выполняли реагентную обработку лигатурой AlTi5B1 и солью NaCl, которые вводили колокоточником с перемешиванием после термической выдержки. Комплексную обработку расплава выполняли по схеме: изотермическая выдержка – реагентная обработка – энергетическая обработка.

Все виды обработок выполняли в печи, выдерживая температуру выплавки. Заливку выполняли при температуре 720 °С в две формы. Первая – цилиндрический кокиль с температурой окружающей среды. Вторая форма предназначалась для получения образцов, которые использовали для изучения свойств ( $\sigma_{\text{в}}$  и  $\delta$ ), она предварительно нагревалась до 220 °С. Таким образом, мы имели две скорости охлаждения: 30 и 6 °С/сек, соответственно.

Анализировали параметры микроструктуры по методикам, изложенным в работе [4]. Значения  $\sigma_B$  и  $\delta$  определяли на стандартных образцах по ГОСТ 1497-84. Твердость определяли методом Бринеля.

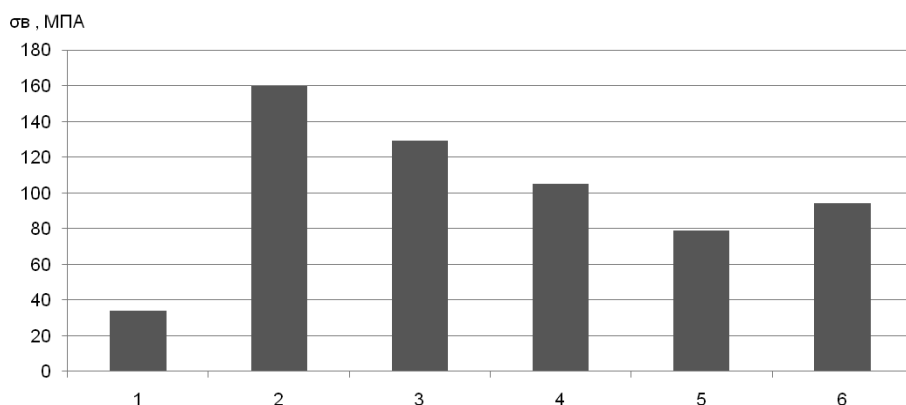
Всего выполнено 62 плавки. Результаты, которые показывают сравнение функциональных возможностей описанных методов обработки, представлены в таблице. Отметим, что сплавы системы Al-Zn-Mg-Cu в литом состоянии имеют значения  $\sigma_B$  в 3–4 раза меньше, чем после деформирования и термообработки, а значения  $\delta$  не превышают 2 % [5]. Значения же уровня твердости для сплава В95 в литом состоянии, полученные в работе, соответствуют данным работы [6].

На рис. 1 для примера показаны микроструктуры некоторых образцов.

Сравнение исследуемых методов обработки расплава показало, что при выбранных параметрах воздействия, обработка переменным током не показала ожидаемого эффекта ни самостоятельно, ни в комплексе с реагентной. Наилучший результат по прочности получен после обработки импульсным током в комплексе с реагентной обработкой. ЭГИО показала промежуточный результат между обработкой импульсами тока и реагентной. На рис. 2 приведены

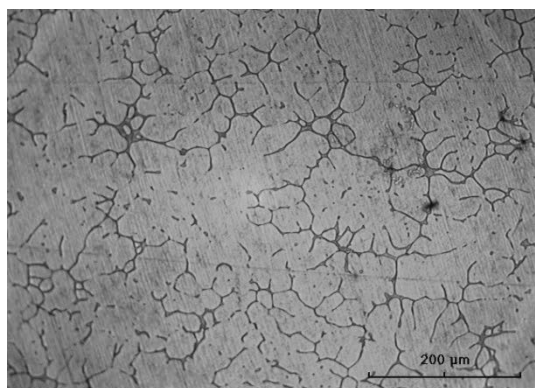
сравнительные данные по прочности образцов после различных методов обработки. После комплексной обработки с ЭГИО или с импульсным током, структура становится более упорядоченной, зерна  $\alpha$ -фазы принимают более округлую форму без резких изломов, колонии эвтектики утончаются. Такой результат не зависит от скорости охлаждения в обозначенных ранее пределах.

Идея и цель исследований не предусматривали определения технологических условий и параметров комплексной обработки. Но, как показывают полу-

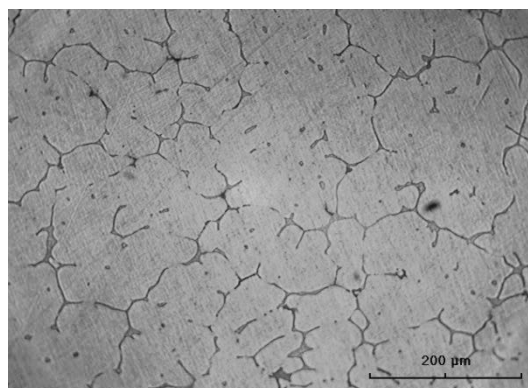


**Рис. 2.** Гистограмма величин прочности ( $\sigma_B$ ), полученных в образцах, подвергнутых различным способам обработки расплава сплава В95пч: 1 – без обработки; 2 – после термообработки литого образца (№ 827/2); 3 – ИЭТО после обработки лигатурой NaCl+AlTi5B1; 4 – ЭГИО после обработки лигатурой NaCl+AlTi5B1; 5 – обработка AlTi5B1; 6 – обработка NaCl+AlTi5B1

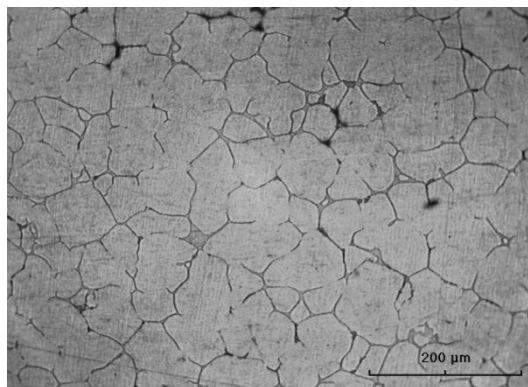
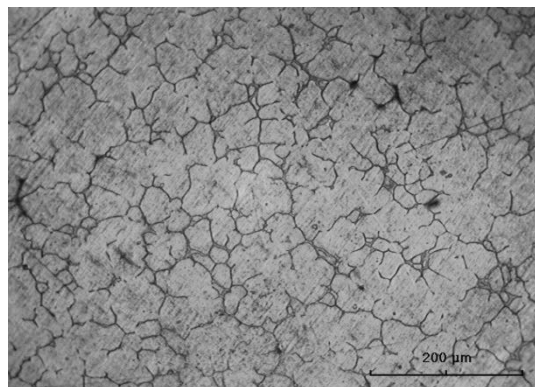
Быстрое охлаждение



Медленное охлаждение



а



б

**Рис. 1.** Микроструктура образцов: а – без обработки; б – после обработки: NaCl (1%) + AlTi5B1 (0,2% Ti) + ИЭТО ( $W_0 = 88$  Дж;  $f = 2$  Гц;  $\tau = 4$  минуты)

## Результаты экспериментов

№	Методы обработки	Показатели структуры				Прочность $\sigma_{в}$ , МПа	Относительное удлинение $\delta_{5}$ , %	Относительное сужение $\psi$ , %	Твердость НВ
		Микроструктура, размер зерна		Пористость					
		быстрое охлаждение (30 °С/с)	медленное охлаждение (6 °С/с)	быстрое охлаждение (30 °С/с)	медленное охлаждение (6 °С/с)				
1	Без обработки расплава	min = 5 мкм max = 93 мкм Эвтектика 9 %	min = 27 мкм max = 101 мкм Эвтектика 7 %	0,7	1,2	34	0	0	89
2	Без обработки расплава Термообработка в литом состоянии	–	–	–	–	160	0	0	120
3	Обработка: ЭГИО ( $W_0 = 88$ Дж; $f = 2$ Гц; $\tau = 4,5$ мин)	min = 4 мкм max = 60 мкм Эвтектика 9 %	min = 4 мкм max = 121 мкм Эвтектика 12 %	0,4	1,6	106	2	0	98
4	Обработка: NaCl (1%) + AlTi5B1 (0,2% Ti) + ЭГИО ( $W_0 = 88$ Дж; $f = 2$ Гц; $\tau = 4,5$ мин)	min = 3 мкм max = 82 мкм Эвтектика 6 %	min = 5 мкм max = 116 мкм Эвтектика 7 %	0,1	0,5	107	1	0	98
5	Обработка: ИЭТО ( $W_0 = 88$ Дж; $f = 2$ Гц; $\tau = 4$ мин)	min = 4 мкм max = 68 мкм Эвтектика 14 %	min = 11 мкм max = 118 мкм Эвтектика 11 %	0,1	0,4	46	0	0	107
6	Обработка: NaCl (1%) + AlTi5B1 (0,2% Ti) + ИЭТО ( $W_0 = 88$ Дж; $f = 2$ Гц; $\tau = 4$ мин)	min = 4 мкм max = 71 мкм Эвтектика 9 %	min = 5 мкм max = 103 мкм Эвтектика 12 %	0,6	0,6	129	0,8	1,2	107
7	Обработка: ППТО ( $I = 40$ А; $U = 1$ В; $f = 100$ Гц; $\tau = 5$ мин)	min = 3 мкм max = 52 мкм Эвтектика 12 %	min = 10 мкм max = 121 мкм Эвтектика 12 %	0,05	0,05	73	2	0	95
8	Обработка: NaCl (1%) + AlTi5B1 (0,2% Ti) + ППТО ( $I = 40$ А; $U = 1$ В; $\tau = 5$ мин)	min = 4 мкм max = 77 мкм Эвтектика 7 %	min = 21 мкм max = 98 мкм Эвтектика 6 %	0,1	0,5	64	0	0	101
9	Обработка: NaCl (1%) + AlTi5B1 (0,2% Ti)	min = 7 мкм max = 88 мкм Эвтектика 9 %	min = 16 мкм max = 100 мкм Эвтектика 11 %	0,4	0,6	94	0	0	95

### Примечания:

1. В таблице использованы сокращения:

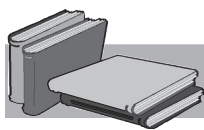
ЭГИО – электрогидроимпульсная обработка; ИЭТО – импульсная электротоковая обработка; ППТО – обработка пульсирующим постоянным током.

Обозначения:  $\tau$  – время обработки;  $W_0$  – запасаемая энергия;  $f$  – частота следования импульсов или частота импульсного тока;  $I$  – сила тока в расплаве при напряжении  $U$ .

2. Образец № 827/2 подвергался термообработке в литом состоянии по схеме (требования ВИАМ № 747-59: закалка при температуре  $470 \pm 5$  °С, выдержка 60 мин, охлаждение в проточной воде при температуре 30 °С; старение при температуре  $140 \pm 5$  °С, время выдержки 16 ч, охлаждение на воздухе.

ченые результаты лабораторных экспериментов, комплексная обработка позволила практически выйти на уровень прочности образца после термообра-

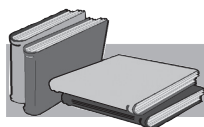
ботки, что показывает инновационную перспективу изучаемых методов обработки.



## ЛИТЕРАТУРА

1. *Ivanov A.V., Sinchuk A.V., Tsurkin V.N.* Electric current treatment of liquid and crystallizing alloys in casting technologies // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. – 2011. – № 5. – P. 456–464.
2. *Цуркин В.Н.* Проблемы и методы электротокковой обработки расплава в технологиях литейного производства // *Процессы литья*. – 2015. – № 5. – С. 3–11.
3. *Tsurkin V.N., Ivanov A.V., Cherepovskii S.S., Vasyanovich N.A.* Comparative analysis of functional possibilities of methods of pulse treatment of a melt // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. – 2016. – № 2. – P. 181–185.
4. *Салтыков С.А.* Стереометрическая металлография. – М.: Металлургия, 1984. – 528 с.
5. *Мондольфо Л.Ф.* Структура и свойства алюминиевых сплавов. – М.: Металлургия, 1979. – 640 с.
6. *Кулініч А.А., Горелкін Д.М., Титаренко А.О., Небога Д.В., Ясир Д.В.* Вплив лігатури AlTi6Cl на структуру та твердість сплаву B95 // Міжнародна наукова конференція «Матеріали для роботи в екстремальних умовах – 6». – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2016. – С. 280–281.

Поступила 19.10.2018



## REFERENCES

1. *Ivanov, A.V., Sinchuk, A.V., Tsurkin, V.N.* (2011). Electric current treatment of liquid and crystallizing alloys in casting technologies. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, no. 5, pp. 456–464 [in English].
2. *Tsurkin, V.N.* (2015). Problems and methods of the electric current treatment of melt in casting technologies. *Casting processes*, no. 5, pp. 3–11 [in Russian].
3. *Tsurkin, V.N., Ivanov, A.V., Cherepovskii, S.S., Vasyanovich, N.A.* (2016). Comparative analysis of functional possibilities of methods of pulse treatment of a melt. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, no. 2, pp. 181–185 [in English].
4. *Saltykov, S.A.* (1984). Stereometric metallography. Moscow: Metallurgiya, 528 p. [in Russian].
5. *Mondolfo, L.F.* (1979). Aluminum alloys: Structure and Properties. Moscow: Metallurgiya, 640 p. [in Russian].
6. *Kulinich, A.A., Gorelkin, D.M., Titarenko, A.O., Neboga, D.V., Yasir, D.V.* (2016). Influence of AlTi6Cl ligatures on the structure and hardness of the alloy B95. International scientific conference “Materials for use in extreme conditions – 6”. Kiev: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, pp. 280–281 [in Ukrainian].

Received 19.10.2018

### Анотація

**Kyung-Hyun Kim**<sup>1</sup>, Ph.D., Principal Reseacher, e-mail: khkim3332@hanmail.net; **Sim Hyum Suk**<sup>2</sup>, President, e-mail: hs8388@dscast.co.kr; **В.М. Цуркін**<sup>3</sup>, канд. фіз.-мат. наук, пров. наук. співр., e-mail: dpta@iipr.com.ua; **А.В. Іванов**<sup>3</sup>, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: artiomsan@gmail.com; **А.Д. Зайченко**<sup>3</sup>, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: a.d.zaichenko@gmail.com; **О.О. Жданов**<sup>3</sup>, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: zhdanoff.aleksander@gmail.com; **М.В. Честних**<sup>3</sup>, мол. наук. співр., e-mail: dpta42@gmail.com

<sup>1</sup>*Korea Institute of Materials Science, Changwon, Korea*

<sup>2</sup>*Dongsan Tech Co., Ltd, Changwon, Korea*

<sup>3</sup>*Інститут імпульсних процесів і технологій НАН України, м. Миколаїв, Україна*

## Вплив енергетичної обробки розплаву на механічні властивості алюмінієвого сплаву В95пч

Для обробки розплаву сплаву В95пч використано різні методи: реагентами, енергетично та комплексно. При енергетичному впливі використано три режими електричного струму (змінний, постійний пульсуючий та імпульсний), а також електрогідравлічну обробку. При визначених параметрах імпульсного електричного струму після обробки реагентами отримано збільшення  $\sigma_b$  більш ніж у три рази. Мікроструктура зазнає позитивних змін у контексті модифікування, характеризується однорідністю.

### Ключові слова

Розплав, реагентна обробка, енергетична обробка, мікроструктура, властивості.

### Summary

**Kyung-Hyun Kim**<sup>1</sup>, Ph.D., Principal Researcher, e-mail: khkim3332@hanmail.net; **Sim Hyum Suk**<sup>2</sup>, President, e-mail: hs8388@dscast.co.kr; **V.N. Tsurkin**<sup>3</sup>, Candidate of Physico-mathematical Sciences, Principal researcher, e-mail: dpta@iipt.com.ua; **A.V. Ivanov**<sup>3</sup>, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, e-mail: artiomsan@gmail.com; **A.D. Zaichenko**<sup>3</sup>, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, e-mail: a.d.zaichenko@gmail.com; **A.A. Zhdanov**<sup>3</sup>, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, e-mail: zhdanoff.aleksander@gmail.com; **N.V. Chestnykh**<sup>3</sup>, Junior Researcher, e-mail: dpta42@gmail.com

<sup>1</sup>Korea Institute of Materials Science, Changwon, Korea

<sup>2</sup>Dongsan Tech Co., Ltd, Changwon, Korea

<sup>3</sup>Institute of pulse processes and technologies of NAS of Ukraine, Mykolayiv, Ukraine

## Effect of energy treatment of the melt on the mechanical properties of the aluminum alloy В95пч

Various principles of treatment of the В95пч alloy melt were used: with reagents, energy treatment and in a complex way. In the energy treatment three modes of electric current were used (alternating current, direct pulsating current and pulse current), and electrohydropulse treatment. In certain parameters of the pulse electric current after treatment with reagents, an increase of  $\sigma_b$  more than 3 times is obtained. The microstructure is undergoing positive changes in the view of modification, characterized by homogeneity.

### Keywords

Melt, reagent treatment, energy treatment, microstructure, properties.