

УДК 621.745.4:669

DOI: 10.30987/1999-8775-2021-4-28-35

С.В. Дорофеев, А.Р. Войнов, А.В. Гончаров, Н.А. Славинская, К.В. Дорошенко

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБРАБОТКИ РАСПЛАВА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ИМПУЛЬСАМИ НА ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ СИЛУМИНА

Приведены данные внешнего физического воздействия на расплав силумина АК7ч (АЛ9) наносекундными электромагнитными импульсами (НЭМИ) с целью повышения его эксплуатационных свойств. Установлено повышение износостойкости сплава при абразивном изнашивании, с максимумом ее значения при 15-минутной длительности облучения расплава. Полученные данные хорошо коррелируют с установленными ранее зависимостями изменения физико-механических

свойств, эффектом изменения морфологии и дисперсности микроструктуры от продолжительности облучения расплава НЭМИ и позволяют разработать технологию плавки износостойких силуминов, предназначенных для работы в условиях абразивного изнашивания.

Ключевые слова: силумины, наносекундные электромагнитные импульсы, износостойкость, микроструктура, распределение, элементы.

S.V. Dorofeev, A.R. Voinov, A.V. Goncharov, N.A. Slavinskaya, K.V. Doroshenko

RESEARCH OF MELT PROCESSING IMPACT WITH ELECTROMAGNETIC PULSES UPON SILUMIN WEAR-RESISTANCE

To improve functional properties of pre-eutectic silumins there are used many different methods having a complex effect upon processes of structure formation and physical-mechanical properties of alloys.

In this paper there is offered a method for alloy operation characteristics increase by the example of wear-resistance by the impact of nanosecond electromagnetic pulses (NEMP) upon silumin melt АК7ч (AL9).

Melt illumination was carried out with the generator (NEMP) (GNI-01-1-6) submersible rod radiator. The melt was overheated to 900°C and processed with NEMP with the length up to 25 min after that it was cooled at a rate of 20°C/min. Slow cooling contributed to the formation of a structure close to equilibrium. Cylindrical ingots with a diameter of 0.06 m (60mm) and a height of 0.06 m (60 mm) were obtained. Wear-resistance was defined on a cross cut of ingots according to GOST 23.208-79. As a standard of comparison were used non-irradiated samples of silumin.

It is defined that melt NEMP processing changes considerably parameters of crystallization, structure formation and increases silumin properties. At abrasive wear, silumin wear-resistance changes from the duration of melt electro-pulse processing according to an extreme dependence with the evident maximum at melt irradiation in the course of 15 min. At that in the edge area of the ingot wear-resistance increases by 1.54 times, and in the central one – by 1.34 times.

This effect is explained by the fact that during melt NEMP processing during 15 min the characteristics of alloy micro-structure change considerably: morphology and dimensions of structural constituents. At that there is formed a qualitatively new fine structure of a non-dendritic type which ensures maximum values of alloy wear-resistance. The data obtained allow developing technology of wear-resistant silumin fusion intended for operation under abrasive wear conditions.

Key words: silumins, nanosecond electromagnetic pulses, wear-resistance, microstructure, distribution, elements.

Введение

Современный уровень развития машиностроения предъявляет к применяемым материалам высокие и постоянно растущие требования, что обуславливает возросшую потребность материалов с повышенными эксплуатационными характеристиками. В данных условиях динамично возрастает спрос на алюминиевые сплавы, которые позволяют решить проблему снижения массы при сохранении или повышении

эксплуатационных характеристик. Таким образом задача повышения функциональных характеристик сплавов на основе алюминия является весьма актуальной.

Функциональные характеристики материалов определяются физико-механическими свойствами формирующимися в предкристаллизационный и кристаллизационный периоды. Для повышения данных свойств применяют множество

различных методов, к числу которых можно отнести: термовременную и термоскоростную обработку расплавов [1–3], модифицирование [4–6], внешние физические воздействия [7–15]. В ряде работ исследовано применение в процессах плавки наносекундных электромагнитных импульсов (НЭМИ) [11–15]. Выявлено, что обработка расплава НЭМИ длительностью 10-15 ми-

нут существенно изменяет микроструктуру, физико-механические и эксплуатационные характеристики металлических сплавов.

В связи с вышеизложенным, изучение влияния обработки расплава НЭМИ на износостойкость алюминиевых сплавов вызывает немалый научный и практический интерес.

Материалы и методика исследования

Исходным материалом был выбран промышленный алюминиево-кремниевый сплав – доэвтектический силумин марки АК 7ч (АЛ9) имеющий состав: Si (6,0-8,0 %); Mg (0,2-0,4 %); Al (91,6-93,8%); примеси (не более 2 %). Чушковый силумин нарезали, после чего подвергали переплаву с обработкой НЭМИ на установке «Параболоид-4» в среде аргона в алундовом тигле, помещенном внутрь трубчатого графитового нагревательного элемента.

Методика обработки расплава НЭМИ. Расплав силумина перегревали до 900 °С, выдерживали 5 минут и изотермически облучали НЭМИ в течение 5, 10, 15, 20 и 25 минут. Обработка НЭМИ жидкой фазы осуществлялась погружным методом. Стержневой излучатель, выполнен-

ный из стального прутка диаметром 6 мм, помещали в кварцевую или алундовую трубку, прозрачную для НЭМИ, и вводили в расплав. Однополярные импульсы положительной полярности амплитудой 6кВ, длительностью до 1 нс и частотой повторности 1кГц излучались генератором ГНИ-01-1-6. После отключения генератора расплав медленно охлаждали со скоростью 20 °С/мин.

Получали цилиндрические слитки диаметром 0,030 м (30 мм) и высотой 0,060 м (60 мм). Слитки разрезали перпендикулярно оси на расстоянии 10 мм от нижнего торца, отступив от плоскости среза еще 10 мм, вырезали образцы, представляющие собой круглый диск диаметром 30 мм и высотой 10 мм (рис. 1).

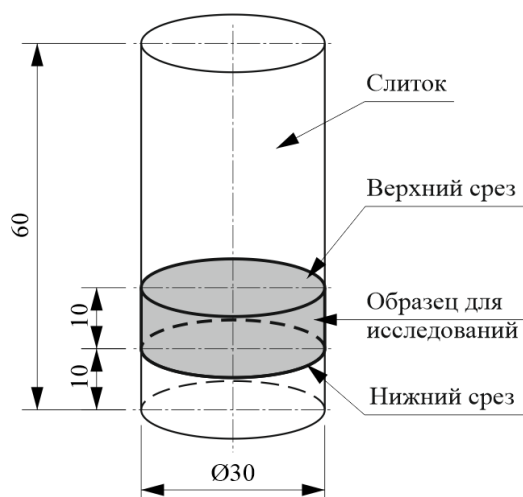


Рис. 1. Схема отбора образцов для испытаний на износостойкость и исследования микроструктуры

Торцевые срезы образцов служили поверхностью для проведения микроструктурного анализа и испытаний на износостойкость. Образцами сравнения, относительно которых отслеживались изменения исследуемых свойств, служили необлученные НЭМИ образцы силумина,

при плавке которых процедура облучения была заменена изотермической выдержкой при идентичных температурно-временных режимах.

Методика исследования износостойкости. Испытания на износ образцов из исследуемого и эталонного материалов

осуществлялись в соответствии с ГОСТ 23.208-79 «Обеспечение износостойкости изделий. Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы» на лабораторной установке собственного производства при постоянной нагрузке и одинаковых параметрах: частота вращения ролика 600 об/мин; путь трения за одно испытание составлял 108 м (700 оборотов ролика); радиальная нагрузка на ролик 78,4 Н (груз массой 8 кг). Образец закреплялся в держателе и прижимался консольно закрепленным грузом к вращающемуся резиновому ролику. В зону трения из дозатора по направляющему желобу равномерно подавался абразивный материал – электрокорунд зернистостью № 16-П по ГОСТ 3647-70 с относительным содержанием влаги не более 15%. В качестве эталона использовался исходный, необлученный НЭМИ образец силумина.

Величина износа исследуемого и эталонного материала определялась потерей массы, которую фиксировали взвешиванием на аналитических весах ВЛР-200 до и после испытания с точностью до

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследований износостойкости приведены в таблице и на рис. 2. Износостойкость оценивали в абсолютных значениях – по интенсивности изнашивания (величина, обратная износостойкости), измеренной по потере массы образцов за одно испытание, и в относительных величинах – по коэффициенту относительной износостойкости (для исходного образца равен 1,0). Сравнивали исходные (0 минут облучения) и облученные НЭМИ в течение 5–25 минут образцы. Первоначально исследовали износостойкость на верхней стороне образца (верхний срез – ближе к центру слитка). В результате исследований установлено, что изменение износостойкости силумина АК7ч (АЛ9) от продолжительности облучения расплава НЭМИ имеет немонотонный характер с максимумом значения при 15-минутном облучении (рис. 2, центр слитка). При этом обработка НЭМИ в течение 5–10 минут практически не влияет на износостойкость, но при дальнейшем

увеличении времени обработки происходит резкий скачок износостойкости – интенсивность изнашивания падает (потеря массы за испытание уменьшается на 0,029 г относительно исходного образца), а коэффициент относительной износостойкости соответственно растет и достигает значения 1,34 (прирост 34 % относительно необлученного образца), после которого с дальнейшим увеличением времени обработки расплава износостойкость так же резко снижается и остается на уровне 8% прироста относительно исходного необлученного образца.

Вторым этапом исследовали износостойкость на нижней стороне этих же образцов (торец образца ближе к краю – нижнему торцу слитка). Обнаружен аналогичный характер изменения износостойкости с резким максимумом в области 15-минутной продолжительности обработки расплава НЭМИ, при этом прирост относительной износостойкости составляет уже 54%, а потеря массы уменьшается

$$K_{ii} = \frac{\bar{q}_{\varepsilon} \rho_{ii} N_{ii}}{\bar{q}_{ii} \rho_{\varepsilon} N_{\varepsilon}}, \quad (1)$$

где \bar{q}_{ε} и \bar{q}_{ii} – потеря массы эталонного и исследуемого образцов, г; ρ_{ε} и ρ_{ii} – плотность эталонного и исследуемого образцов соответственно, г/см³; N_{ε} и N_{ii} – количество оборотов ролика при испытаниях эталонного и исследуемого образцов.

Методика исследования микроструктуры. Микроструктурный анализ исходного и облученных НЭМИ образцов силумина проводили на нижнем торцевом срезе образцов (рис. 1) на металлографическом микроскопе Микро-200. В качестве травителя использовали 0,5 % водный раствор плавиковой кислоты (1 мл плавиковой кислоты (48 %) на 200 мл воды).

увеличении времени обработки происходит резкий скачок износостойкости – интенсивность изнашивания падает (потеря массы за испытание уменьшается на 0,029 г относительно исходного образца), а коэффициент относительной износостойкости соответственно растет и достигает значения 1,34 (прирост 34 % относительно необлученного образца), после которого с дальнейшим увеличением времени обработки расплава износостойкость так же резко снижается и остается на уровне 8% прироста относительно исходного необлученного образца.

Вторым этапом исследовали износостойкость на нижней стороне этих же образцов (торец образца ближе к краю – нижнему торцу слитка). Обнаружен аналогичный характер изменения износостойкости с резким максимумом в области 15-минутной продолжительности обработки расплава НЭМИ, при этом прирост относительной износостойкости составляет уже 54%, а потеря массы уменьшается

на 0,036 г по сравнению с необлученным образцом (рис. 2, край слитка). Дальнейшее облучение расплава НЭМИ в течение 20–25 минут способствует монотонному падению износостойкости до 8% прироста относительно исходного образца.

Сравнение результатов потери массы при абразивном износе на разных сторонах образцов позволяет выявить не только большее значение прироста коэффициента

относительной износостойкости в краевой зоне слитка при 15-минутном облучении (54 % против 34 %), но также и разницу в абсолютных значениях потери массы образцов: износ в краевой зоне слитка меньше (износостойкость выше), чем в центральной, как при плавке без облучения, так и во всем диапазоне продолжительности облучения.

Таблица

Данные испытаний на абразивный износ верхнего и нижнего торца образца

| № образца | Продолжительность обработки НЭМИ, мин | Потеря массы образца за одно испытание, г | | Относительная износостойкость | |
|-----------|---------------------------------------|---|-------------|-------------------------------|-------------|
| | | Центр слитка | Край слитка | Центр слитка | Край слитка |
| 1 | 0 | 0,1123 | 0,1017 | 1,0000 | 1,0000 |
| 2 | 5 | 0,1063 | 0,0969 | 1,0560 | 1,0493 |
| 3 | 10 | 0,1130 | 0,0975 | 0,9934 | 1,0436 |
| 4 | 15 | 0,0838 | 0,0661 | 1,3403 | 1,5392 |
| 5 | 20 | 0,1035 | 0,0785 | 1,0845 | 1,2947 |
| 6 | 25 | 0,1058 | 0,0941 | 1,0615 | 1,0808 |

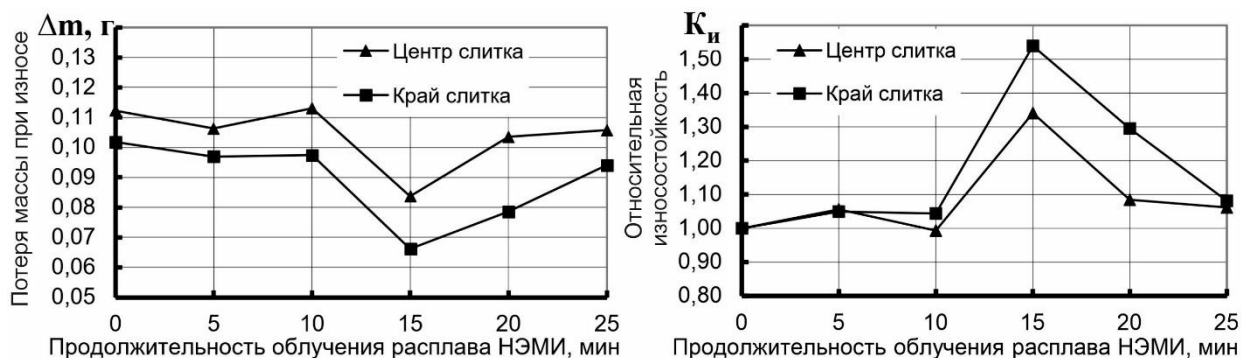


Рис. 2. Зависимость износостойкости силумина АК7ч (АЛ9) при износе на разных сторонах образца от продолжительности облучения расплава НЭМИ

Для объяснения данного явления повышения износостойкости следует обратиться к микроструктурному и элементно-фазовому анализу образцов, т.к. при прочих равных условиях (одинаковых химическом составе образцов, их шероховатости на поверхности трения и технологии предшествующей механической обработки) различие износостойкости определяется морфологией и размерами структурных составляющих, фазовым составом и распределением элементов по фазам. Данные микроструктурного и микрорентгено-спектрального анализа силумина АК7ч

(АЛ9), необлученного и облученного в жидком состоянии НЭМИ, приведены в работах [11, 15].

Микроструктура исходного, необлученного сплава имеет выраженное дендритное строение (рис. 3), характерное для литых промышленных силуминов, и представлена α -твердым раствором, эвтектикой и включениями интерметаллида $AlSiMnFe$, выделяющегося в необлученном образце в области кремнистой эвтектики и имеющего состав: Fe (22,39 мас. %), Mn (7,38 мас. %), Cr (0,22 мас. %), Si (9,15 мас. %) и Al (60,19 мас. %). В соот-

ветствии с диаграммой состояния бинарных сплавов $Al-Si$ в доэвтектических силименах кремний кристаллизуется в виде самостоятельной фазы – кристаллов в составе эвтектики. Но по данным микро-рентгеноспектрального исследования в кристаллах кремния промышленного силимена растворяется также алюминий (до 7,58 мас. %) и магний (до 0,08 мас. %) [13].

Облучение расплава в течение 5-10 минут способствует измельчению дендритов α -твердого раствора и кремнистой эвтектики, а кристаллы интерметаллидной железистой фазы выходят из зоны эвтектики и кристаллизуются в металлической основе обособленно в виде изолированных протяженных пластин (рис. 4). При этом в α -твердом растворе снижается содержание растворенных кремния и магния (Si – с 1,56 до 1,41 мас. %, Mg – до значения фона). В эвтектической кремнистой фазе растворимость алюминия существенно возрастает с 7,58 до 19,58 мас. %, а содержание кремния, наоборот, падает с исходных 92,34 до 80,42 мас. %. Растворимость элементов в железистой фазе меняется следующим образом: содержание железа увеличивается, алюминия уменьшается, кремния – повышается до 15 мас. % и остается на этом уровне. То есть происходит перераспределение кремния из

твердого раствора и эвтектики в интерметаллидную фазу.

При 15-минутном облучении расплава характер микроструктурного строения слитка резко меняется: формируется структура недендритного типа при значительном измельчении α -фазы и дисперсной эвтектики, кристаллы железистой фазы дробятся и приобретают компактную форму. Растворимость магния и кремния в твердом растворе повышаются и почти достигают значений необлученного образца, а характер распределения элементов в кремнистой фазе эвтектики меняется кардинально: содержание кремния резко увеличивается (до 96,64 мас. %), что превышает значение в необлученном образце, растворимость магния стремится к исходным значениям необлученного образца, а концентрация алюминия меняется по обратной зависимости (резко падает до 3,2 %). При этой же продолжительности облучения в железистой фазе содержание железа достигает максимума (26 мас. %), растворимость алюминия и кремния практически не изменяется. Данные существенные изменения микроструктуры и распределения элементов обеспечивают резкий рост износостойкости, приведенный выше, и твердости [15] с достижением максимума их значений при 15-минутной обработке.

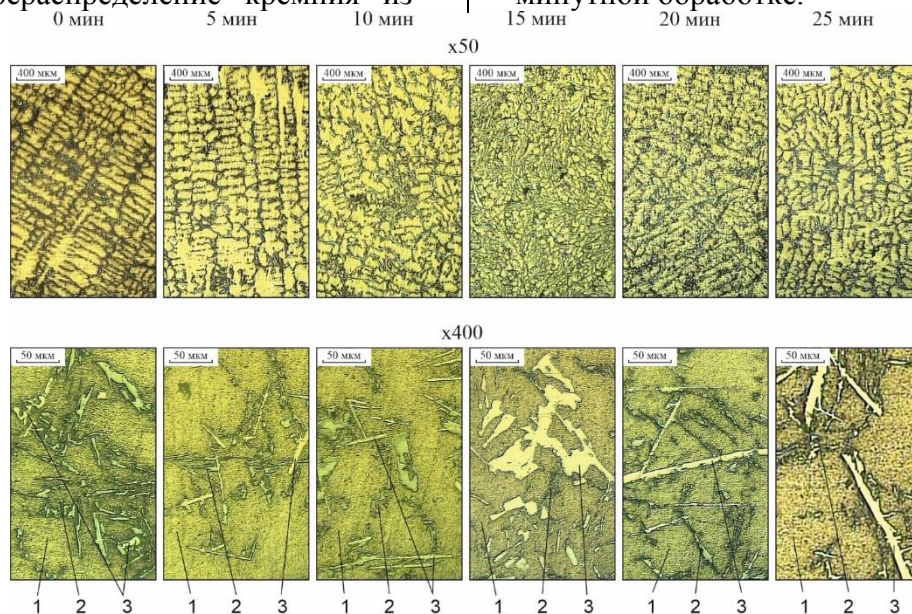


Рис. 3. Микроструктура силумина АК7ч (АЛ 9), облученного НЭМИ с различной продолжительностью
1 – α -твердый раствор; 2 – эвтектика; 3 – интерметаллид $AlSiMnFe$

Дальнейшее облучение расплава способствует укрупнению α -твердого раствора и эвтектики, интенсивному росту кристаллов железистой фазы игольчатой формы, что обуславливает падение износостойкости и твердости. Концентрация растворенных в твердом растворе кремния и магния возвращается к значениям, соответствующим таковым в необлученном образце. В кремнистой фазе эвтектики после 20-минутной обработки расплава растворимость кремния лавинообразно падает до 60,49 мас. %, а концентрация алюминия и магния существенно возрастает (Al до 39,32 мас. %, Mg до 0,16 мас. %).

Выводы

1. На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

2. Облучение расплава НЭМИ существенно изменяет параметры процесса кристаллизации, структурообразования и повышает комплекс свойства силумина АК7ч (АЛ9).

3. Износостойкость силумина меняется по экстремальной зависимости от продолжительности облучения расплава НЭМИ с максимумом значения относительной износостойкости при 15-минутной продолжительности облучения.

4. Износостойкость в краевой зоне слитка выше, чем в центральной во всем диапазоне длительности обработки расплава НЭМИ.

5. Эффект максимального прироста износостойкости при 15-минутном облучении в краевой зоне слитка существенно больше, чем в центральной (1,54 раза против 1,34 раза).

6. Обработка жидкой фазы НЭМИ существенно меняет характеристики мик-

Растворимость алюминия и железа в железистой фазе стремится к значениям в необлученном силумине, а содержание кремния практически не меняется, оставаясь на уровне 15 мас. %.

Таким образом, обработка расплава НЭМИ существенно изменяет не только структурообразование, механические и эксплуатационные свойства, но и характер распределения компонентов в структурных составляющих силумина АК7ч (АЛ9) при этом также меняются стехиометрические соотношения кремнистой фазы в составе эвтектики и интерметаллического соединения железа.

роструктуры сплава: морфологию и размер структурных составляющих. Максимальный эффект изменения микроструктуры наблюдается при 15-минутной продолжительности обработки расплава, что коррелирует с изменением свойств исследуемого сплава. При этом формируется качественно новая мелкодисперсная структура недентритного типа, что обеспечивает максимум значения износостойкости сплава.

7. Обработка расплава существенно меняет характер изменения растворимости элементов в структурных составляющих силумина, а также стехиометрические соотношения компонентов в кремнистой фазе и интерметаллическом соединении $AlSiMnFe$.

8. Полученные данные позволяют разработать технологию плавки износостойких силуминов, предназначенных для эксплуатации в условиях абразивного изнашивания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Свойства алюминиевых сплавов (силуминов) в жидком и твердом состояниях** : монография / Хосен Ри, Е. М. Баранов, В. И. Якимов [и др.] – Владивосток : Дальнаука, 2002. – 144 с.
2. **О влиянии термовременной и электроимпульсной обработок расплава на свойства сплава АЛ9 (АК7ч)** / Э. Х. Ри, Х. Ри, С. Н. Хи-

мухин [и др.] // *Металлургия машиностроения*. – 2013. – № 6. – С. 38–42.

3. **Марукович, Е.И.** Производство и применение силумина с глобулярным кремнием / Е.И. Марукович, В.Ю. Стеценко, А.П. Гутев // *Литье и металлургия*. – 2017. – №2. – С. 15–19.
4. **Трибомеханические свойства силуминов, модифицированных наноразмерными тугоплавкими соединениями** / А.И. Комаров, В.И.

- Комарова, Д.Л. Шилюк [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения : сб. науч. тр. / ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» – Минск, 2013 г. – Т. 2 – С. 449–453.
5. **Влияние комплексного модифицирования углеродными нанотрубками и медью на структуру и свойства силумина АК12М2МГН** / А.И. Комаров, В.И. Комарова, Д.В. Орда, Д.О. Искандарова // Актуальные вопросы машиноведения. – 2017. – Т.6. – С. 369–371.
 6. **Крушенко, Г.Г.** Модифицирование алюминиевых сплавов нанопорошками / Г.Г. Крушенко, М.Н. Фильков // Нанотехника. – 2007. – № 4. – С. 38–44.
 7. **Анализ влияния внешних физических воздействий на процессы литья легких сплавов** / П.А. Данилов, А.П. Хрусталеv, А.Б. Ворожцов [и др.] // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2018. – № 55 – С. 84–98.
 8. **Совершенствование способа магнитно-импульсной обработки алюминиевых расплавов** / Д.Г. Черников, В.А. Глушченков, В.И. Никитин, К.В. Никитин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2014. – Т. 16 – № 6. – С. 256–262.
 9. **Влияние внешней обработки расплава АЛ9 при кристаллизации на его структуру и свойства** / Х. Ри, Э.Х. Ри, С.Н. Химухин [и др.] // Вопросы материаловедения. – 2011. – №4 (68). – С. 52–56.
 10. **Вдовин, К.Н.** Влияние магнитного поля на процесс кристаллизации алюминиевых расплавов / К.Н. Вдовин, Г.А. Дубский, Л.Г. Егорова // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2018. – № 2. – С. 34–42.
 11. **Влияние облучения наносекундными электромагнитными импульсами жидкой фазы литейных сплавов на ее строение, процессы кристаллизации и структурообразования и свойства** : монография / Э.Х. Ри, Хосен Ри, С.В. Дорофеев, В.И. Якимов. – Владивосток : Дальнаука, 2008. – 177 с.
 12. **Influence of an irradiation of a liquid phase by nanosecond electromagnetic impulses (NEMI) on properties of metals and alloys** / E.H. Ri, Hosen Ri, S.V. Dorofeev, E.B. Kuharenko // Rare metals, volume 26, Spec. Issue, August 2007. China. P. 14–19
 13. **Дорофеев, С.В.** Обработка жидкой фазы наносекундными электромагнитными импульсами для управления структурой и свойствами металлических сплавов : специальность 05.16.04. «Литейное производство» : дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук / Дорофеев Станислав Вячеславович ; Комсомольск-на-Амуре гос. техн. ун-т. – Комсомольск-на-Амуре, 2009. – 186 с.
 14. **Исследование влияния амплитуды импульсов напряжения генератора наносекундных электромагнитных импульсов на процессы кристаллизации, структурообразования и свойства силумина (АК7ч)** / Х. Ри, Евстигнеев А.И., Э.Х. Ри [и др.] // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2010. – Т. 1. – № 3. – С. 82–88.
 15. **Ри, Э.Х.** Обработка жидкой фазы наносекундными электромагнитными импульсами для управления структурой и свойствами алюминия и его сплавов / Э.Х. Ри, Х. Ри, С.В. Дорофеев // Научное обеспечение технического и социального развития Дальневосточного региона : сб. науч. тр. к 55-летию Тихоокеанского государственного университета / Тихоокеанский государственный университет. – Хабаровск, 2013. – С. 230–239.
 1. **Aluminum Alloy (Silumin) Properties in Liquid and Solid State:** monograph / Hosen Ree, E.M. Baranov, V.I. Yakimov [et al.] – Vladivostok: Dalnauka, 2002. – pp. 144.
 2. **On impact of melt thermal-time and electro-pulse processing upon alloy AL9 (AK7ch) properties** / E.H. Ree, H. Ree, S.N. Khimukhin [et al.] // Mechanical Engineering Foundry. – 2013. – No.6. – pp. 38–42.
 3. **Marukovich, E.I.** Manufacturing and application of silumin with globular silicon / E.I. Marukovich, V.Yu. Stetsenko, A.P. Gutev // *Castings and Metallurgy*. – 2017. – No.2. – pp. 15–19.
 4. **Tribomechanical properties of silumin modified with nano-dimensional refractory compounds** / A.I. Komarov, V.I. Komarova, D.L. Shilyuk [et al.] // *Urgent Problems of Machine Science: Proceedings / SRU “Joint Institute of Mechanical Engineering of NAS of Belarus”* – Minsk, 2013. – Vol.2. – pp. 449–453.
 5. **Impact of complex modification with carbon nano-pipes and copper upon structure and properties of silumin AK12M2MGN** / A.I. Komarov, V.I. Komarova, D.V. Orda, D.O. Iskandarova // *Urgent Problems of Machine Science*. – 2017. – Vol.6. – pp. 369–371.
 6. **Krushenko, G.G.** Aluminum alloy modification with nano-powders / G.G. Krushenko, M.N. Filkov // *Nano-engineering*. – 2007. – No.4. – pp. 38–44.
 7. **Analysis of external physical impact upon light alloy fusion** / P.A. Danilov, A.P. Khrustalyov, A.B. Vorozhtsov [et al.] // *Bulletin of Tomsk State University. Mathematics and Mechanics*. – 2018. – No.55 – pp. 84–98.
 8. **Updating of aluminum alloy magneto-pulse processing** / D.G. Chernikov, V.A. Glushchenkov, V.I. Nikitin, K.V. Nikitin // *Proceedings of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. – 2014. – Vol.16. – pp. 256–262.
 9. **Impact of liquid melt AL9 external processing at crystallization upon its structure and proper-**

- ties / H. Ree, S.N. Khimukhin [et al.] // *Problems of Material Science*. – 2011. – No.4(68). – pp. 52-56.
10. **Vdovin, K.N.** Magnetic field impact upon aluminum liquid melt crystallization / K.N. Vdovin, G.A. Dubsky, L.G. Yegorova // *Proceedings of Higher School Institutions. Non-Ferrous Metallurgy*. – 2018. – No.2. – pp. 34-42.
11. **Impact of Irradiation with Nano-second Electromagnetic Pulses of Casting Alloy Liquid Phase upon its Structure, Crystallization and Structure Formation and Properties:** monograph / E.H. Ree, Hosen Ree, S.V. Dorofeev, V.I. Yakimov. – Vladivostok: Dalscience, 2008. – pp. 177.
12. **Influence of an irradiation of a liquid phase by nanosecond electromagnetic impulses (NEMI) on properties of metals and alloys** / E.H. Ri, Hosen Ri, S.V. Dorofeev, E.B. Kuharenko // *Rare metals*, volume 26, Spec. Issue, August 2007. China. P. 14–19
13. **Dorofeev, S.V.** *Liquid Phase Processing with Nanosecond Electromagnetic Pulses to Control Structure and Properties of Alloys:* specialty 05.16.04. “Foundry”: thesis for competition of academic degree of Can. Sc. Tech. / Dorofeev Stanislav Vyacheslavovich; Komsomolsk-upon-Amur State technical University. – Komsomolsk-upon-Amur, 2009. – pp. 186.
14. **Impact research of generator voltage pulse amplitude of nanosecond electromagnetic pulses upon crystallization, structure formation and properties of silumin (AK7ch)** / H. Ree, Yevstigneev A.I., E.H. Ree [et al.] // *Proceedings of Komsomolsk-upon-Amur State Technical University*. – 2010. – Vol.1. – No.3. – pp. 82-88.
15. **Ree, E.H.** Liquid phase processing with nanosecond electromagnetic pulses to control structure and properties of aluminum and its alloys / E.H. Ree, H. Ree, S.V. Dorofeev // *Scientific Support of Engineering and Social Development of the Far Eastern Region: Proceedings to the 55-th Anniversary of Pacific State University / Pacific State University*. – Khabarovsk, 2013. – pp. 230-239.

Ссылка цитирования:

Дорофеев, С.В. Исследование влияния обработки расплава электромагнитными импульсами на износостойкость силумина / С.В. Дорофеев, А.Р. Войнов, А.В. Гончаров, Н.А. Славинская, К.В. Дорошенко // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – 2021. - № 4. – С. 28 - 35. DOI: 10.30987/1999-8775-2021-4-28-35.

Статья поступила в редакцию 15.02.21.
Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета,
Макаренко К.В.,
член редсовета журнала «Вестник БГТУ».
Статья принята к публикации 25.03.21.

Сведения об авторах:

Дорофеев Станислав Вячеславович, к.т.н., доцент кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета, e-mail: 005541@pnu.edu.ru.

Войнов Александр Робертович, к.т.н., доцент кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета, e-mail: 006326@pnu.edu.ru.

Гончаров Алексей Васильевич, к.т.н., преподаватель кафедры «Литейное производство и техно-

логии металлов», Тихоокеанского государственного университета, e-mail: 008809@pnu.edu.ru .

Славинская Надежда Александровна, аспирант кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета, e-mail: nadinslavinskaya@yandex.ru.

Дорошенко Кирилл Владимирович, магистрант кафедры «Литейное производство и технология металлов» Тихоокеанского государственного университета, e-mail: rbhbkk1212@yandex.ru.

Dorofeev Stanislav Vyacheslavovich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Foundry and Metal Technology”, Pacific State University, e-mail: 005541@pnu.edu.ru.

Voinov Alexander Robertovich, Can. Sc. Tech., Assistant Prof. of the Dep. “Foundry and Metal Technology”, Pacific State University, e-mail: 006326@pnu.edu.ru.

Goncharov Alexey Vasilievich, Can. Sc. Tech., Lecturer of the Dep. “Foundry and Metal Technology”, Pacific State University, e-mail: 008809@pnu.edu.ru .

Slavinskaya Nadezhda Alexandrovna, Post graduate student of the Dep. “Foundry and Metal Technology”, Pacific State University, e-mail: nadinslavinskaya@yandex.ru.

Doroshenko Kirill Vladimirovich, Master degree student of the Dep. “Foundry and Metal Technology”, Pacific State University, e-mail: rbhbkk1212@yandex.ru.