



ТЕРМОДИНАМИКА И КИНЕТИКА КРИСТАЛЛИЗАЦИИ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ПОСТОЯННОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Аркулис М.Б., Дубский Г.А., Долгушин Д.М., Мишенева Н.И.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы): применение силуминов широко распространено в различных отраслях промышленности: в судо- и авиастроении, строительстве, оружейном производстве, при изготовлении бытовых и сантехнических изделий. В связи с чем ведутся активные исследования процесса переплавки силуминов с целью получения заданных физико-технических свойств. Особенно актуальным является исследование влияния внешних воздействий (ультразвуковых волн, магнитного поля, электрического поля, механических вибраций) на физические свойства слитка. **Цель работы:** установить параметры внешних полей, влияющие на процесс кристаллизации расплава. **Используемые методы:** теоретическая оценка влияния постоянного магнитного поля с индукцией $B \leq 1$ Тл на некоторые физико-технические параметры кристаллизующегося расплава; экспериментальное исследование, направленное на выявление влияния магнитных полей на кинетику и термодинамику, а также тепломассоперенос процесса кристаллизации расплавов силуминов. **Новизна:** в настоящее время отсутствуют физические и физико-математические модели процессов взаимодействия магнитных полей и внутренних параметров, лежащих в основе кинетики и термодинамики кристаллизации, а также тепломассопереноса расплавов силуминов. Нами показана возможность установления функциональной связи характеристик магнитного поля и внутренних параметров, лежащих в основе кинетики кристаллизации расплава. **Результат:** установлено и экспериментально подтверждено, что постоянное магнитное поле на кинетику и термодинамику кристаллизации расплава парамагнитного силумина существенного воздействия не оказывает. **Практическая значимость:** проведенные исследования служат предпосылкой к установлению основ взаимодействия магнитных полей с расплавом металла при его кристаллизации и дальнейшей разработке способов формирования заданного состава и микроструктуры слитка.

Ключевые слова: потенциал Гиббса, температура фазового равновесия, температура переохлаждения, магнитная энергия намагничивания, скрытая теплота фазового перехода.

© Аркулис М.Б., Дубский Г.А., Долгушин Д.М., Мишенева Н.И., 2021

Для цитирования

Термодинамика и кинетика кристаллизации алюминиевых сплавов в постоянном магнитном поле / Аркулис М.Б., Дубский Г.А., Долгушин Д.М., Мишенева Н.И. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2021. Т.19. №1. С. 29–34. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-29-34>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

THERMODYNAMICS AND KINETICS OF CRYSTALLIZATION OF ALUMINUM ALLOYS IN A CONSTANT MAGNETIC FIELD

Arkulis M.B., Dubskii G.A., Dolgushin D.M., Misheneva N.I.

Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance): Silumins are widely applied in various industries: shipbuilding and aircraft engineering, construction, weapons industry, and to manufacture household goods and sanitaryware products. Therefore, researchers actively study the process of remelting silumins to get the specified physical and technical properties. It is especially relevant to study external actions (ultrasonic waves, magnetic field, electric field, mechanical vibrations) on the physical properties of ingots. **Objectives:** To determine the parameters of external fields influencing the process of melt crystallization. **Methods Applied:** A theoretical assessment of the effect of a constant magnetic field with induction B of < 1 T on some physical and technical parameters of a crystallizing melt; the experimental study aimed at determining the influence of magnetic fields on kinetics and thermodynamics, and heat and mass transfer of the process of crystallizing molten silumins. **Originality:** Now, there are no physical and physical-mathematical models of the interaction between magnetic fields and internal parameters underlying kinetics and thermodynamics of crystallization, as well as heat and mass transfer of silumin melts. We showed the possibility of determining a functional relationship between the magnetic field characteristics and the internal parameters underlying kinetics of melt crystallization. **Findings:** It is determined and experimentally proved that a constant magnetic field does not significantly influence kinetics and thermodynamics of crystallization of molten paramagnetic silumin. **Practical Relevance:** The conducted research serves as a prerequisite for determining the basis for the interaction between magnetic fields and molten metal during its crystallization, and for further development of methods used to set a specified composition and microstructure of ingots.

Keywords: the Gibbs potential, phase equilibrium temperature, supercooling temperature, magnetic energy of magnetization, latent heat of the phase transition.

For citation

Arkulis M.B., Dubskii G.A., Dolgushin D.M., Misheneva N.I. Thermodynamics and Kinetics of Crystallization of Aluminum Alloys in a Constant Magnetic Field. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2021, vol. 19, no. 1, pp. 29–34. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2021-19-1-29-34>

Введение

Современное промышленное производство предъявляет повышенные требования к техническим характеристикам и физическим свойствам литых материалов, в частности силуминов. Широко распространены сплавы на основе алюминия с кремнием, легированные железом, медью, цинком, магнием, титаном, марганцем и литием. Содержание добавок может быть различным и колеблется в пределах от 4 до 22%. Каждый элемент в сплаве оказывает существенное влияние на его свойства. Широкое применение силуминов обусловлено его физико-механическими свойствами. Силумин является коррозионно-стойким материалом, что позволяет сравнивать его с нержавеющей сталью. Однако, в отличие от нержавеющей стали, силумины – легкий и в то же время прочный материал. Кроме того, силумин обладает хорошей пластичностью, что позволяет широко применять его в литейном производстве. Все перечисленные особенности силуминов обуславливают их широкую область применения: авиастроение, судостроение, автомобильная промышленность, оружейное производство, сан-

технические изделия, бытовые изделия. В связи с чем во всем мире ведутся активные исследования, направленные на получение материалов с заданной микроструктурой и физико-механическими свойствами.

В первую очередь используются способы создания материалов с разным химическим составом. В работе [9] показано влияние легирования и условий кристаллизации на температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) α сплавов алюминия с кремнием и медью, показана возможность создания легких сплавов с контролируемым тепловым расширением.

Также для модификации свойств силуминов используется поверхностное легирование различными элементами. В [11] показано, что в результате многоциклового легирования силумина марки АК12 титаном в поверхностном слое толщиной 30 мкм формируется субмикронанокристаллическая многофазная структура, характеризующаяся высокой износостойкостью, превосходящей износостойкость литого силумина более чем в 14 раз.

Особо интересным является влияние внешних физических полей на расплав силумина при

его кристаллизации. Так, в работе [8] исследуется влияние ультразвуковых волн, магнитного поля, электрического поля, механических вибраций на уменьшение времени зарождения, рост кристаллов и усиление теплопередачи. А в [10] рассматривается литье с кристаллизацией под давлением, позволяющее получать плотные отливки из всех групп литейных алюминиевых сплавов.

Таким образом, вариация в химическом составе материала и влияние внешних полей на расплав позволяет получать материалы с различными физико-техническими свойствами. Формирование слитка с заданной структурой и равномерно распределенными по объему ликвициями примесей возможно при активации процессов теплопереноса в жидкой фазе кристаллизующегося металла [4, 5].

В данной работе объектом исследования является силумин АК12М2Мг и рассматриваются теоретические оценки влияния постоянного магнитного поля с индукцией $B \leq 1$ Тл на некоторые термодинамические и кинетические параметры кристаллизующегося расплава, характеризующие линейную скорость кристаллизации и скорость зарождения центров кристаллизации.

Теоретические и экспериментальные результаты исследования и их обсуждение

Для описания термодинамического состояния жидкой и кристаллической фаз исследуемых металлов будем использовать термодинамический потенциал Гиббса:

$$G = U - TS - IH, \quad (1)$$

где U – энтальпия, Дж; T – абсолютная температура, К; S – энтропия фаз, Дж/К; I – намагниченность, А/м; H – напряженность магнитного поля, А/м.

Тогда для кристаллической фазы

$$G_{\text{кр}} = U_{\text{кр}} - TS_{\text{кр}} - I_{\text{кр}}H, \quad (2)$$

для жидкой фазы

$$G_{\text{ж}} = U_{\text{ж}} - TS_{\text{ж}} - I_{\text{ж}}H. \quad (3)$$

Изменение потенциала Гиббса при фазовом переходе жидкость-кристалл будет

$$\Delta G = \Delta U - T\Delta S - \Delta IH, \quad (4)$$

где $\Delta U = U_{\text{ж}} - U_{\text{кр}}$ – изменение энтальпии, Дж; $\Delta S = S_{\text{ж}} - S_{\text{кр}}$ – изменение энтропии за счет температуры и намагничивания парамагнетика,

Дж/К; $\delta W_{\text{немех}} = H\Delta I$ – работа магнитного поля по намагничиванию парамагнетика (силумина), Дж.

При температуре фазового равновесия T_S изменения потенциала Гиббса $\Delta G = 0$. Изменение ΔS_I при T_S будет равно нулю, так как магнитная восприимчивость жидкого и кристаллического парамагнитного силумина в T_S одна и та же.

Таким образом, при $T = T_S$ получим

$$\Delta U_{\text{кр}} - T_S \Delta S_T - H\Delta I = 0. \quad (5)$$

Из (5) следует, что

$$\Delta S_T = \frac{1}{T_S} (q_s - H\Delta I), \quad (6)$$

где $H\Delta I = q_H$ – теплота магнетика при изменении его намагниченности, Дж.

Для любой температуры T

$$\begin{aligned} \Delta G &= \Delta U - T \frac{1}{T_S} (q_s - q_H) - H\Delta I = \\ &= \left(1 - \frac{T}{T_S}\right) (q_s - q_H) = \frac{(q_s - q_H)\Delta T}{T_S}, \end{aligned} \quad (7)$$

где q_s – скрытая теплота фазового перехода жидкость-кристалл в отсутствие магнитного поля, Дж; ΔT – температура переохлаждения, К.

Радиус кристаллического зародыша с учётом (6) будет

$$r_k = \frac{2\sigma}{\Delta G} \cdot \frac{\mu}{\rho} = \frac{2\sigma\mu T_S}{\rho(q_s - q_H)\Delta T}, \quad (8)$$

где σ – поверхностная энергия на границе кристалл-жидкость, Дж/м²; ρ – плотность закристаллизованного металла, кг/м³; $\Delta T = T_S - T_{\text{кр}}$ – температура переохлаждения расплава, К.

Работа образования кристаллического зародыша

$$A_{\text{кр}} = 32 \left(\frac{\mu}{\rho}\right)^2 \sigma^3 \frac{T_{\text{кр}}^2}{(q_s - q_H)\Delta T^2}, \quad (9)$$

где $T_{\text{кр}} = T_S - \Delta T$ – температура кристаллизации, К.

Как видно из формулы (9), при кристаллизации силумина (парамагнетика) в магнитном поле напряженностью H работа образования зародышей увеличивается, а значит, уменьшается вероятность зарождения центров кристаллизации [3], так как

$$w = Be^{-\frac{A_{\text{кр}}}{kT}}, \quad (10)$$

где B – постоянная величина, определяемая свойствами парамагнетика, Дж; k – постоянная Больцмана, Дж/К.

Для оценки вклада q_H в q_S необходимо подсчитать энергию намагничивания исследуемого силумина, в магнитном поле $B = 0,16$ Тл.

Энергия намагничивания с учетом прецессии магнитных моментов электронов проводимости, определяющих парамагнетизм Паули, будет

$$w_m^{\text{пол}} = \frac{1}{8\pi} B^2 - \frac{1}{2} \vec{I} \vec{B} = \frac{1}{8\pi} \vec{B} (B - 4\pi I) = \frac{1}{8\pi} \vec{B} \vec{H} = \frac{1}{8\pi} \frac{1}{\mu\mu_0} B^2 \left(\text{в СИ } w_m^{\text{пол}} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} \right). \quad (11)$$

Из (11) получим:

$$w_m^{\text{пол}} = \frac{0,16^2}{2 \cdot 12,56 \cdot 10^{-7}} = \frac{2,56 \cdot 10^{-2}}{25,12 \cdot 10^{-7}} \approx 10^4 \text{ Дж/м}^3;$$

$$q_H = w_m^{\text{пол}} \cdot V_{\text{обр}} \cdot m_{\text{обр}}^{-1} = \frac{10^4 \cdot 2,24 \cdot 10^{-5}}{62,7 \cdot 10^{-3}} \approx 3,6 \text{ Дж/кг}. \quad (12)$$

Но для силумина $q_S \approx 300$ кДж/кг. Таким образом, получаем, что $q_H \ll q_S$. Это неравенство говорит о том, что магнитное поле (в нашем случае) оказывает несущественное влияние на термическое и калорическое состояние силумина (АК12М2Мг).

Исходя из проведенной оценки, можно утверждать, что:

1) температура фазового равновесия T_S при действии постоянного магнитного поля не изменяется (при $B \leq 1$ Тл), так как

$$T_S = T_{S0} \frac{q_S - q_{\text{кр}}}{q_S},$$

где T_{S0} – температура равновесия фаз в отсутствии магнитного поля, К;

2) не изменяется температура переохлаждения $\Delta T = T_S - T_{\text{кр}}$, К;

3) скрытая теплота фазового перехода не меняется, так как

$$q_S - q_H = q_S \left(1 - \frac{q_H}{q_S} \right) \approx q_S,$$

где $\frac{q_H}{q_S} \ll 1$.

Учитывая результаты проделанной работы, можно утверждать, что постоянное магнитное

поле на термодинамические и кинетические процессы кристаллизации металлического парамагнетика, а именно силумина, не оказывает существенного влияния.

Но это не значит, что постоянное магнитное поле вовсе бесполезно при кристаллизации расплава.

При наложении магнитного поля на жидкий парамагнетик число электронов проводимости в нем со спинами, ориентированными по полю \vec{B} , будет больше, чем против поля [4], на величину

$$\frac{N_{\uparrow}}{N_{\downarrow}} \approx e^{\frac{\mu_B B}{kT}},$$

где μ_B – магнетон Бора, Дж/Тл.

Это должно изменить s -, p -состояния электронов, а значит, их энергию обменного взаимодействия, дающей вклад в энергию связи при формировании структуры кристалла.

Предлагаются вниманию результаты экспериментального исследования влияния постоянного магнитного поля с индукцией $B \leq 1$ Тл на процесс кристаллизации расплава алюминиевого сплава АК12М2Мг. Исследование проводилось на экспериментальной установке, разработанной и построенной на кафедре физики ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова», описанной в работе [1].

Плавление и охлаждение образцов производилось в алундовом тигле цилиндрической формы высотой 200 мм и диаметром 20 мм. Измерение температуры производилось с помощью специально выполненного термометрического термометра, который помещался внутрь расплава. Расплав сплава специальным механическим устройством перемещался в объем управляемого кристаллизатора. Температура расплава в процессе охлаждения фиксировалась с помощью двухкоординатного самописца ПДС-021. Полученные таким образом температурно-временные зависимости охлаждения расплава АК12М2Мг в магнитном поле и без него представлены **на рисунке**.

При кристаллизации исследуемого расплава градиент температуры между стенкой тигля и стенкой кристаллизатора поддерживался постоянным и равным $15^\circ\text{C}/\text{мм}$. Магнитное поле было направлено перпендикулярно оси цилиндрического тигля. Точность измерения температуры составляла 0,2%.

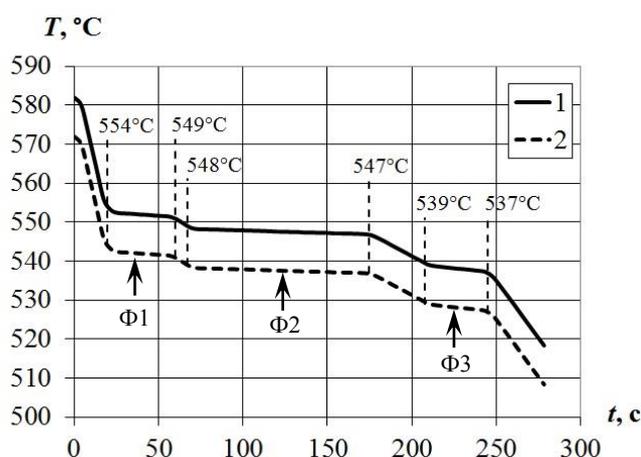


Рис. Температурно-временные зависимости охлаждения расплава АК12М2Мг: 1 – кривая охлаждения без магнитного поля; 2 – кривая охлаждения в магнитном поле с индукцией $B = 0,2$ Тл (Кривая 2 для наглядности сдвинута по температуре относительно кривой 1 вниз на величину $\Delta T = 10^\circ\text{C}$); $\Phi 1, \Phi 2, \Phi 3$ – фазы сплава

Fig. Cooling curves of molten AK12M2Mg: 1 is a cooling curve without a magnetic field; 2 is a cooling curve in a magnetic field with induction $B = 0.2$ T. For clarity, curve 2 is shifted down in temperature relative to curve 1 by value $\Delta T = 10^\circ\text{C}$; $\Phi 1, \Phi 2, \Phi 3$ are alloy phases

Сравнение представленных на рисунке зависимостей позволяет сделать следующие выводы:

- 1) данный сплав содержит три фазы;
- 2) температурные интервалы кристаллизации фаз $\Phi 1, \Phi 2, \Phi 3$ без магнитного поля и с ним не изменяются;
- 3) время кристаллизации фаз в магнитном поле и без него в пределах точности эксперимента остается одним и тем же;

Список литературы

1. Воздействие импульсного магнитного поля на расплав парамагнитного металла при кристаллизации / Долгушин Д.М., Дубский Г.А., Нефедьев А.А., Риве В.В., Долгушина О.В., Кайпер А. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 57–66. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-57-66>
2. Поверхностное омеднение стальной проволоки / Вдовин К.Н., Дубский Г.А., Нефедьев А.А., Деревянко Д.В. // Металлы. 2016. №2. С. 92–98.
3. Дубский Г.А., Егорова Л.Г. Методика определения линейной скорости роста кристалла при кристаллизации алюминия в магнитном поле // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2017. Т. 5. №2. С. 19–24.
4. Лычев А.П., Черемшин А.И. Влияние магнитного поля на линейную скорость роста кристаллов // Электронная обработка материалов. 1981. № 2. С. 55–57
5. Мартынов О.В., Голиков С.С. Влияние внешнего магнитного поля на кристаллизацию стального слитка // Разливка стали в изложницы. 1984. 370 с.
6. Ивановский В.И., Черникова Л.А. Физика магнитных явлений: Семинары: учеб. пособие для физ. спец. ун-тов / под ред. Е.И. Кондорского. М.: Изд-во МГУ, 1981. 288 с.
7. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика, статистическая физика и кинетика: учеб. пособие для физ. спец. вузов. 2-е изд., испр. и доп. М.: Наука, 1977. 552 с.
8. Wu Y., Zhang X., Xu X., Lin X., Liu L. A review on the effect of external fields on solidification, melting and heat transfer enhancement of phase change materials // Journal of Energy Storage. 2020. V. 31. P. 101567.
9. Попова М.В., Малюх М.А., Лаврова Н.Б. Совместное влияние легирования и условий кристаллизации на технологичность и тепловое расширение литых алюминиевых сплавов // Актуальные проблемы в машиностроении. 2017. Т. 4. № 1. С. 112–118.
10. Кристаллизация под давлением доэвтектических и заэвтектических силуминов / Батышев К.А., Батышев А.И., Семенов К.Г., Демьянов Е.Д., Юсипов Р.Ф. // Заготовительные производства в машиностроении.

4) согласно выводу 3 линейная скорость кристаллизации фаз с магнитным полем и без него одна и та же.

Объяснение данных фактов следует из теоретических выводов, приведенных выше. Кроме этого, нами было показано [2, 3], что линейная скорость роста кристалла равна

$$v_n = \frac{\lambda_{\text{эф}}}{q_s \rho} \frac{dT}{dr}, \quad (13)$$

где $\lambda_{\text{эф}}$ – эффективная теплопроводность, Вт/(м·К); q_s – скрытая теплота фазового перехода расплав-кристалл, Дж; ρ – плотность закристаллизованного сплава, кг/м³; $\frac{dT}{dr}$ – градиент температуры между стенками тигля и кристаллизатора, К/м.

Поскольку кристаллизация сплава проходит при постоянной температуре, то $\lambda_{\text{эф}}$, ρ и $\frac{dT}{dr}$ остаются постоянными, а q_s не зависит от величины внешнего магнитного поля. Поэтому, как следует из (12), линейная скорость кристаллизации без магнитного поля и с ним остается одной и той же, что и наблюдается в эксперименте.

Постоянство времен кристаллизации фаз $\Phi 1, \Phi 2, \Phi 3$ в магнитном поле и без него обусловлено тем, что вклад энергии намагничивания q_H электронов проводимости, находящихся вблизи уровня Ферми, много меньше скрытой энергии фазового перехода q_s при кристаллизации. Поэтому энергия намагничивания не может изменить термодинамическое и калорическое состояние на границе расплав–кристалл.

2018. Т. 16. № 11. С. 491–494.

11. Многоцикловое поверхностное легирование силумина титаном / Иванов Ю.Ф., Клопотов А.А., Ереско С.П., Петрикова Е.А., Лопатин И.В. // Решетневские чтения: материалы XXIII Международной научно-практической конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева. В 2-х ч. / под ред. Ю.Ю. Логинова. 2019. С. 526–528.

References

1. Dolgushin D.M., Dubsky G.A., Nefedev A.A., Rive V.V., Dolgushina O.V., Kayper A. Effect of a pulsed magnetic field on paramagnetic melt during crystallization. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2018, vol. 16, no. 3, pp. 57–66. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-57-66>
2. Vdovin K.N., Dubsky G.A., Nefedev A.A., Derevyanko D.V. Surface copper plating of steel wire. *Metally* [Metals], 2016, no. 2, pp. 92–98. (In Russ.)
3. Dubsky G.A., Egorova L.G. Methodology for determining the linear crystal growth rate in crystallization of aluminum in a magnetic field. *Matematicheskoe i programmnnoe obespechenie sistem v promyshlennoi i sotsialnoi sferakh* [Software of Systems in the Industrial and Social Fields], 2017, vol. 5, no. 2, pp. 19–24. (In Russ.)
4. Lychev A.P., Cheremishin A.I. Influence of the magnetic field on the linear growth rate of crystals. *Elektronnaya obrabotka materialov* [Surface Engineering and Applied Electrochemistry], 1981, no. 2, pp. 55–57. (In Russ.)
5. Martynov O.V., Golikov S.S. Influence of an external magnetic field on the crystallization of a steel ingot. *Razlivka stali v izlozhnitsy* [Ingot casting], 1984, 370 p. (In Russ.)
6. Ivanovskii V.I., Chernikova L.A., edited by Kondorsky E.I. *Fizika magnitnykh yavlenii: seminary* [Physics of magnetic phenomena: seminars]. Moscow: MGU, 1981, 288 p. (In Russ.)
7. Rumer Yu.B., Ryykin M. Sh. *Termodinamika, statisticheskaya fizika i kinetika* [Thermodynamics, statistical physics and kinetics]. Moscow: Nauka, 1977, 552 p. (In Russ.)
8. Wu Y., Zhang X., Xu X., Lin X., Liu L. A review on the effect of external fields on solidification, melting and heat transfer enhancement of phase change materials. *Journal of Energy Storage*. 2020, no. 31, p. 101567.
9. Popova M.V., Malyukh M.A., Lavrova N.B. The combined effect of alloying and crystallization conditions on manufacturability and thermal expansion of cast aluminum alloys. *Aktualnye problemy v mashinostroenii* [Actual Problems in Machine Building], 2017, vol. 4, no. 1, pp. 112–118. (In Russ.)
10. Batshev K.A., Batshev A.I., Semenov K.G., Demyanov E.D., Yusipov R.F. Die crystallization of hypoeutectic and hypereutectic silumins. *Zagotovitelnye proizvodstva v mashinostroenii* [Blank production in mechanical engineering], 2018, vol. 16, no. 11, pp. 491–494. (In Russ.)
11. Ivanov Yu.F., Klopotov A.A., Eresko S.P., Petrikova E.A., Lopatin I.V. Multi-cycle surface alloying of silumin with titanium. *Reshetnevskie chteniya. Materialy XXIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii posvyashchennoi pamyati generalnogo konstruktora raketno-kosmicheskikh sistem akademika M.F. Reshetneva* [Reshetnev readings. Proceedings of the 23rd International Scientific and Practical Conference dedicated to the memory of Academician M.F. Reshetnev, the General Designer of Rocket and Space Systems]. Edited by Yu.Yu. Loginov. 2019, pp. 526–528. (In Russ.)

Поступила 09.02.2021; принята к публикации 24.02.2021; опубликована 25.03.2021
Submitted 09/02/2021; revised 24/02/2021; published 25/03/2021

Аркулис Михаил Борисович – кандидат педагогических наук, доцент, заведующий кафедрой физики, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: arkulis78@mail.ru. ORCID 0000-0003-3006-9968

Дубский Геннадий Алексеевич – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.

Долгушин Денис Михайлович – кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: denisdolgushin@mail.ru. ORCID 0000-0002-2907-2417

Мишенева Надежда Игоревна – аспирант, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия.
Email: misheneva_n@mail.ru. ORCID 0000-0001-5461-8058

Mikhail B. Arkulis – PhD (Pedagogy), Associate Professor, Head of the Physics Department, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: arkulis78@mail.ru. ORCID 0000-0003-3006-9968

Gennady A. Dubskii – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.

Denis M. Dolgushin – PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: denisdolgushin@mail.ru. ORCID 0000-0002-2907-2417

Nadezhda I. Misheneva – postgraduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia.
Email: misheneva_n@mail.ru. ORCID 0000-0001-5461-8058