



DOI 10.22363/2312-8143-2022-23-1-57-64
УДК 669.2

Научная статья / Research article

Модифицирование медных сплавов ультрадисперсными порошками

М.Ю. Малькова^a  , А.Н. Задиранов^b , И.Н. Герасимова^b , Т.Г. Грушева^b 

^aРоссийский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация

^bАкадемия государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Российская Федерация

✉ malkova-myu@rudn.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 27 ноября 2021 г.

Доработана: 14 февраля 2022 г.

Принята к публикации: 22 февраля 2022 г.

Ключевые слова:

бронзы, ультрадисперсные порошки, УДП, механические свойства, модифицирование, структура

Аннотация. Модифицирование металлических расплавов механохимически активированными ультрадисперсными порошками (УДП) позволяет получать сплавы черных и цветных металлов с принципиально новыми эксплуатационными свойствами за счет изменения структуры металлических сплавов. Цели исследования – проанализировать эффективность процесса модифицирования медных сплавов ультрадисперсными порошками и разработать специальное устройство для введения модификатора в расплав. Процесс модифицирования расплавов алюминиевой, кремниевой и оловянной бронз механохимически активированными УДП природного графита, оксидов кремния и алюминия фракцией – 100+0 мкм в концентрации 0,2–0,25 % изучен экспериментальным путем. Показано, что модифицирование вышеназванными порошками расплавов бронз отражается на микроструктуре сплавов, интенсивно измельчая ее по сравнению с исходной структурой. Установлено, что уменьшение размеров дендритной ячейки по сравнению с исходным сплавом достигает 25 %, а микрзерна – 230 %. Измельчение зерна приводит к повышению механических свойств медных сплавов, таких как твердость по Бринеллю НВ, предел прочности на растяжение σ_B , относительное удлинение δ . Для более эффективного осуществления процесса модифицирования металлических расплавов ультрадисперсными порошками разработана оригинальная конструкция устройства для ввода модификаторов в расплав, отличающаяся простотой и экономичностью исполнения.

Для цитирования

Малькова М.Ю., Задиранов А.Н., Герасимова И.Н., Грушева Т.Г. Модифицирование медных сплавов ультрадисперсными порошками // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23. № 1. С. 57–64. <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-57-64>



Modification of copper alloys with ultrafine powders

Marianna Yu. Malkova^a✉, Alexander N. Zadiranov^b, Irina N. Gerasimova^b, Tatiana G. Grusheva^b

^aPeoples' Friendship University of Russia (RUDN University), Moscow, Russian Federation

^bState Fire Academy of EMERCOM of Russia, Moscow, Russian Federation

✉ malkova-myu@rudn.ru

Article history

Received: November 27, 2021

Revised: February 14, 2022

Accepted: February 22, 2022

Keywords:

copper bronzes, ultrafine powders, UDP, mechanical properties, modification, structure

Abstract. Modification of metal melts by mechanochemically activated ultrafine powders (UDP) makes it possible to obtain ferrous and non-ferrous metal alloys with fundamentally new performance properties due to changes in the structure of metal alloys. The purposes of this work were to analyse the efficiency of the process of modifying copper alloys with ultrafine powders and to develop a special device for introducing a modifier into the melt. Experimental studies of the process of modifying melts of aluminum, silicon and tin bronze with mechanochemically activated UDP of natural graphite, as well as silicon and aluminum oxides with a fraction of $-100+0$ microns in a concentration of 0.2–0.25 % were carried out. It is shown that the modification of bronze melts by the above-mentioned powders affects the microstructure of alloys, intensively grinding it in comparison with the initial structure. It was found that the reduction in the size of the dendritic cell in comparison with the initial alloy reaches 25%, and the micrograin – 230%. Grain grinding leads to an increase in the mechanical properties of copper alloys, such as Brinell hardness HB, tensile strength σ_b , elongation δ . For more efficient implementation of the process of modifying metal melts with ultrafine powders, an original design of a device for introducing modifiers into the melt has been developed, characterized by simplicity and cost-effectiveness of execution.

For citation

Malkova MYu, Zadiranov AN, Gerasimova IN, Grusheva TG. Modification of copper alloys with ultrafine powders. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2022;23(1):57–64. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2312-8143-2022-23-1-57-64>

Введение

Среди различных способов, направленных на улучшение физико-механических и эксплуатационных свойств металлических сплавов, все большее значение приобретает модифицирование металлических расплавов механохимически активированными ультрадисперсными порошками (УДП) [1–4]. Модифицированные таким образом сталь [5–6] и чугун [7–10], алюминиевые [11–15] и медные сплавы [16] приобретают уникальные, ранее никогда не проявлявшиеся свойства.

Цели работы – изучение эффективности процесса модифицирования ультрадисперсными порошками сплавов на основе меди (бронза БрА7, БрКЗМц1 и БрО5Ц5С5) и разработка специального устройства для введения модификатора в расплав.

Методика проведения экспериментов

Объектами исследования стали расплавы алюминиевой, кремниевой и оловянной бронзы, химический состав которых представлен в

табл. 1 и 2¹, и их модификаторы (УДП природного графита, а также оксидов алюминия и кремния фракцией $-100+0$ мкм). Расплавы готовились переплавом стружки на лабораторной плавильной установке с графитовым тиглем емкостью 400 см³.

Ввод ультрадисперсных порошков в металлический расплав осуществляют различными методами. Связано это с тем, что при жидкофазном методе модифицирования прямое введение УДП в расплав приводит к компактированию частиц, их пылевывосу и интенсивному окислению при всплывании на поверхность расплава [17]. Поэтому перед введением в расплав проводят сложную и дорогостоящую подготовку порошков. Порошки предварительно прессуют в брикеты либо покрывают их поверхность металлическими пленками (плакирование, напыление, наплавка) [18].

¹ ГОСТ 18175–78. Бронзы безоловянные, обрабатываемые давлением. М.: Издательство стандартов, 1978; ГОСТ 613–79. Бронзы оловянные литейные. М.: Издательство стандартов, 1979.

В.В. Сенкус и колл.² предлагают способ модифицирования металлов и сплавов смесью УДП, содержащей оксид алюминия Al_2O_3 , карбидоподобную фазу $FeAlC_n$ и гидроксид алюминия $Al(OH)_3$. При этом измельчение смеси произво-

дят в постоянном магнитном поле напряженностью 0,1–0,5 Тс, размер частиц УДП составляет 10^2 – 10^3 нм. Недостатком способа является аппаратная сложность его реализации и высокая энергоемкость.

Таблица 1

Химический состав бронз БрА7 и БрК3Мц1, %

Марка	Al	Sn	Zn	Fe	Si	Pb	Cu	Mn	Примеси
БрА7	6–8	0,1	0,5	0,5	0,1	0,03	90,9–94	0,5	1,6
БрК3Мц	–	0,25	0,5	0,3	2,75–3,5	0,03	94–96,3	1–1,5	1,1

Table 1

Chemical composition of bronzes BrA7 and BrK3Mц1, %

Grade	Al	Sn	Zn	Fe	Si	Pb	Cu	Mn	Impurities
BrA7	6–8	0.1	0.5	0.5	0.1	0.03	90.9–94	0.5	1.6
BrK3Mц1	–	0.25	0.5	0.3	2.75–3.5	0.03	94–96.3	1–1.5	1.1

Таблица 2

Химический состав бронзы Бр05Ц5С5, %

Марка	Al	Sn	Zn	Fe	Si	Pb	Cu	P	Примеси
Бр05Ц5С5	0,05	4–6	4–6	0,4	0,05	4–6	80,7–88	0,1	1,3

Table 2

Chemical composition of bronze Br05C5C5, %

Grade	Al	Sn	Zn	Fe	Si	Pb	Cu	P	Impurities
Br05C5C5	0.05	4–6	4–6	0.4	0.05	4–6	80.7–88	0.1	1.3

В этой связи было разработано устройство для модифицирования металлических расплавов путем ввода УДП непосредственно в расплав. Концентрация УДП составляла 0,2–0,25 % от веса расплава. Устройство (рис. 1) представляет собой графитовый разборный контейнер (1) глобулярной формы диаметром 12–15 мм, толщина стенки 2–3 мм³. При подготовке контейнера к работе его разбирают, разделяя на две равные чаши (2). Чаши контейнера изготовлены в форме двух полусфер, скрепленных между собой при помощи резьбового соединения (3). Чаши выполняются с перфорированной поверхностью (4) диаметром 2–3 мм. Перед загрузкой в устройство модификатора отверстия (4) перфорированной поверхности чаш (2) плотно затыкают бумагой или ватой. Модификатор загружается в контейнер в виде порошка либо в виде прессованных таблеток. После загрузки

модификатора чаши соединяют, получая единый контейнер (1).

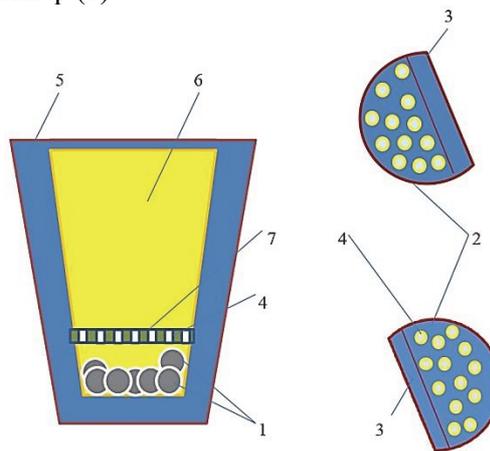


Рис. 1. Устройство для ввода УДП в металлический расплав:

- 1 – разборный контейнер (силицированный графит);
- 2 – составные чаши контейнера; 3 – резьба;
- 4 – перфорированная поверхность;
- 5 – тигель (или разливочный ковш);
- 6 – металлический расплав; 7 – графитовая сетка

Figure 1. Device for entering ultrafine powders (UFP) into a metal melt:

- 1 – collapsible container (silicified graphite);
- 2 – composite container bowls; 3 – thread; 4 – perforated surface;
- 5 – crucible (or ladle); 6 – metal melt; 7 – graphite mesh

² Патент РФ № 2439166. Способ модифицирования чугуна и силумина / Сенкус В.В., Селянин И.Ф., Гетман А.А., Дорошилов А.В. и др.; опубл. 10.01.2012 в БИ.

³ В варианте устройства контейнеры могут быть любой формы (эллипсоидной, кубической, прямоугольной и т. д.).

Затем контейнеры (по 3–4 шт.) опускают на дно тигля (5). Чтобы контейнеры не всплыли сразу после заливки жидкого металла (6) в тигель, сверху над ними устанавливают графитовую сетку (7). После заливки металла в тигель производится его выдержка, необходимая для прохождения процесса модифицирования, а затем – подача в изложницы (формы). По окончании процесса литья тигель устанавливают на площадку для охлаждения, после чего из него вынимают графитовую сетку⁴ и контейнеры. При заполнении тигля металлическим расплавом загруженный на его дно контейнер с модификатором некоторое время будет удерживаться графитовой сеткой. В течение этого времени в отверстиях полусфер прогорит бумага (или вата) и сквозь перфорированную поверхность прольется жидкий металл, заполняя контейнер.

Заполнив контейнер, жидкий расплав захватывает дисперсный порошок и уносит его в объем расплава, производя модифицирование последнего.

Результаты обсуждения

Модифицирование бронзы производили алюминий- и кремнийсодержащими УДП фракции $-100+0$ мкм в концентрации 0,2–0,25 % (рис. 2). Результаты исследования состава и структуры модифицированных УДП алюминиевой и кремнистой бронзы (БрКЗМц1 и БрА7 соответственно, табл. 1) представлены в табл. 3. Установлено, что вследствие модифицирования происходит интенсивное измельчение структурных составляющих сплава при одновременном повышении его механических свойств (табл. 3, рис. 3).



Рис. 2. УДП оксидов алюминия и кремния при различном увеличении: а – $\times 7500$; б – $\times 38\,300$

Figure 2. Ultrafine powders (UFP) of aluminum and silicon oxides at different magnification: а – $\times 7500$; б – $\times 38,300$



Рис. 3. Микроструктура бронзы БрА7 (увеличение $\times 100$):

а – немодифицированная; б – после модифицирования МХА порошком оксида алюминия фракцией $-100+0$ мкм

Figure 3. Microstructure of bronze BrA7 (magnification $\times 100$):

а – unmodified; б – after modification of MOSS with aluminum oxide powder fraction $-100+0$ microns

⁴ В варианте устройства сетку выполняют из сплава требуемого состава. Время расплавления сетки обеспечивает длительность выдержки жидкого расплава в тигле.

Таблица 3

Механические свойства модифицированных бронз БрА7 и БрКЗМц1, МПа, оксидов алюминия и кремния фракцией –100+0 мкм

Сплав	Модификатор, %	σ_b , МПа	δ , %	НВ, МПа	Размер	
					Зерна, мм	Дендритной ячейки, мкм
БрА7	0	1000	4	70	1,238	27,42
БрА7	Al ₂ O ₃ (0,25 %)	1040	5	74	0,533	27,15
БрКЗМц1	0	350	25	95	1,141	20,45
БрКЗМц1	SiO ₂ (0,25 %)	390	27,7	97	0,655	20,16

Table 3

Mechanical properties of modified bronzes BrA7 and BRK3MTS1, МПа, of aluminum and silicon oxides with a fraction of –100+0 microns

Alloy	Modifier, %	σ_b , МПа	δ , %	НВ, МПа	Size	
					Grain, mm	Dendritic cell, μm
BrA7	0	1000	4	70	1.238	27.42
BrA7	Al ₂ O ₃ (0.25%)	1040	5	74	0.533	27.15
BrK3Mc1	0	350	25	95	1.141	20.45
BrK3Mc1	SiO ₂ (0.25%)	390	27.7	97	0.655	20.16

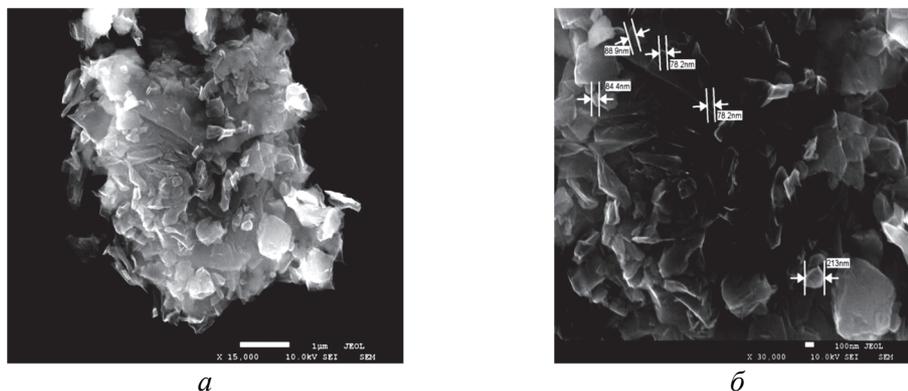


Рис. 4. Размер и форма частиц природного графита марки ГЛ-1 (ГОСТ 5279–74⁵) при различном увеличении: а – $\times 15\,000$; б – $\times 30\,000$

Figure 4. Size and shape of natural graphite grade GL-1 (GOST 5279–74⁶) particles at various magnifications: а – $\times 15,000$; б – $\times 30,000$

Таблица 4

Механические свойства модифицированной бронзы БрО5Ц5С5 порошком природного графита фракцией –100+0 мкм

Сплав	Модификатор, %	Механические свойства			Размер	
		σ_b , МПа	δ , %	НВ, МПа	Зерна, мм	Дендритной ячейки, мкм
БрО5Ц5С5	0	176	4	60	1,32	28,75
	Графит ГЛ-1 (0,2)	180	6,5	64	0,94	21,56

Table 4

Mechanical properties of modified bronze BrO5C5C5 with natural graphite powder fraction –100+0 microns

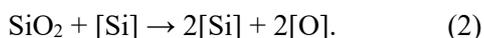
Alloy	Modifier, %	Mechanical properties			Size	
		σ_b , МПа	δ , %	НВ, МПа	Grain, mm	Dendritic cell, μm
BrO5C5C5	0	176	4	60	1.32	28.75
	Graphite GL-1 (0.2)	180	6.5	64	0.94	21.56

⁵ ГОСТ 5279–74 Графит кристаллический литейный. Технические условия. М., 2003.

⁶ GOST 5279–74. Crystal graphite for foundry purposes. Specifications. Moscow; 2003. (In Russ.)

Таким образом, модифицирование бронзы УДП оксидов алюминия и кремния фракцией с размерами $-100+0$ мкм позволяет получать сплавы с улучшенными характеристиками внутренней структуры и механических свойств.

Однако при модифицировании кремнистой и алюминиевой бронзы порошками оксидов алюминия и кремния фракцией наноразмеров возможно следующее взаимодействие модификатора с расплавом:



По этой причине дальнейшие эксперименты провели с бронзой марки БрО5Ц5С5 (табл. 2), модифицируя сплав УДП порошком углерода марки ГЛ-1 фракцией $-100+0$ мкм как абсолютно индифферентным к металлическому расплаву и его компонентам (рис. 4). Полученные результаты представлены в табл. 4.

Модифицирование бронзы БрО5Ц5С5 УДП природного графита марки ГЛ-1 сопровождалось интенсивным измельчением микрозерна и дендритной ячейки, при этом значительно улучшились показатели механических свойств сплава.

Заключение

Проведены экспериментальные исследования процесса модифицирования бронзы БрА7, БрКЗМц1, БрО5Ц5С5 УДП оксидов кремния и алюминия, а также природного графита фракцией $-100+0$ мкм в концентрации 0,2–0,25 %. Показано, что модифицирование ультрадисперсными механохимически активированными порошками расплавов бронзы отражается на микроструктуре сплавов, интенсивно измельчая ее по сравнению с исходной структурой. Установлено, что уменьшение размеров дендритной ячейки модифицированных сплавов составляет 1–25 %, зерна – 175–230 %; при этом повышаются механические свойства металла (%): σ_b – 3,84–10,25; HB – 2–5,04; δ – 9,74–20.

Разработано устройство для модифицирования жидкого металлического расплава порошковыми модификаторами.

Список литературы

1. *Карбасов Ю.С.* Новые материалы. М.: МИСиС, 2002. 736 с.

2. *Цеханов Ю.А., Харченко И.В., Джемалядинов Р.М., Скакун В.В.* Влияние ультрадисперсных модификаторов технологических сред на силовые характеристики процесса точения конструкционных материалов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 6. С. 140–145.

3. *Задиратов А.Н., Колтунов И.И., Малькова М.Ю.* Нанотехнологии в металлургии. М.: ЦКТ, 2012. 224 с.

4. *Круушенко Г.Г.* Применение нанопорошков химических соединений для улучшения качества металлоизделий // Технология машиностроения. 2002. № 3. С. 3–6.

5. *Zykova A., Kalashnikov M., Popova N., Kurzina I.* Fine structure and phase composition of Fe–14Mn–1.2C steel: influence of a modified mixture based on refractory metals // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2017. Vol. 24. No 5. Pp. 523–529.

6. *Зыкова А.П., Федосеев С.Н., Лычагин Д.В.* Модифицирование стали 110Г13Л ультрадисперсными порошками оксидов тугоплавких металлов // Справочник. Инженерный журнал. 2014. № 9 (210). С. 3–7. <https://doi.org/10.14489/hb.2014.09.pp.003-007>

7. *Зыкова А.П., Чумаевский А.В., Лычагин Д.В., Курзина И.А., Абзаев Ю.А., Деммент Т.В.* Влияние модифицирования ультрадисперсными порошками оксидов металлов на деформационное поведение и разрушение чугуна марки ИЧХ28Н2 // Известия вузов. Физика. 2013. Т. 56. № 12–2. С. 110–115.

8. *Зыкова А.П., Курзина И.А., Чумаевский А.В., Лычагин Д.В.* Модифицирование чугунов ультрадисперсными порошками оксидов металлов // Научно-технический прогресс в черной металлургии: I Международная научно-техническая конференция (Череповец, 2–4 октября 2013 г.) / отв. ред. А.Л. Кузьминов. Череповец, 2013. С. 112–114.

9. *Зыкова А.П., Лычагин Д.В., Чумаевский А.В., Курзина И.А., Новомейский М.Ю.* Влияние модифицирования ультрадисперсными порошками оксидов тугоплавких металлов и криолита на структуру, механические свойства и разрушение чугуна СЧ25 // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2014. Т. 57. № 11. С. 37–42.

10. *Zykova A., Lychagin D., Chumaevsky A., Popova N., Kurzina I.* Influence of ultrafine particles on structure, mechanical properties, and strengthening of ductile cast iron // Metals. 2018. Vol. 8. No. 7. 559. <http://doi.org/10.3390/MET8070559>

11. *Панин С.В., Корниенко Л.А., Ваннасри С., Иванова Л.Р., Шилько С.В.* Сравнительный анализ влияния нано- и микронаполнителей окисленного Al на фрикционно-механические свойства СВМПЭ // Трение и износ. 2010. Т. 31. № 5. С. 492–499.

12. *Zykova A., Martyushev N., Skeebe V., Zadkov D., Kuzkin A.* Influence of W addition on microstructure and mechanical properties of Al-12%Si alloys // Materials. 2019. Vol. 12. No 6. 981. <https://doi.org/10.3390/ma12060981>

13. Zykova A., Kazantseva L., Vorozhtsov A., Kurzina I., Popova N. Influence of modifying mixtures on Si crystal formation in Al-7%Si alloy // *Metals*. 2018. Vol. 8. No 2. 98. <https://doi.org/10.3390/MET8020098>

14. Martyushev N.V., Bashev V.S., Zykova A.P. Influence of soaking time of modifier in melt on microstructure of Al-12%Si alloys // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 177. 012118. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012118>

15. Баишев В.С. Исследование влияния ультрадисперсного порошка W на структуру и свойства литейного сплава системы Al-Si // XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых): тексты докладов участников международной молодежной научной конференции: в 6 т. Т. 1. Казань, 2019. С. 231–235.

16. Semenov I.V., Martyushev N.V., Drozdov Y.Y., Zykova A.P., Popelyukh A.I., Alpeisov A.T. The influence of modification by superdispersed powders on the lead-TiN-base bronze structure // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. 012114. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/124/1/012114>

17. Серикбол А., Федосеев С.Н. Модифицирование материалов ультрадисперсными порошками // Перспективное развитие науки, техники и технологий: материалы 3-й Международной научно-практической конференции (Курск, 18 октября 2013 г.): в 3 т. Т. 3 / отв. ред. А.А. Горохов. Курск, 2013. С. 205–207.

18. Сабуров В.П., Черепанов А.Н., Жуков М.Ф., Галевский Г.В., Крушенико Г.Г., Борисов В.Т. Плазмохимический синтез ультрадисперсных порошков и их применение для модифицирования металлов и сплавов // *Низкотемпературная плазма: в 12 т. Т. 12*. Новосибирск: Наука, 1995. 344 с.

References

1. Karabasov YuS. *New materials*. Moscow: MISiS Publ.; 2002. (In Russ.)

2. Sekhanov YuA, Harchenko IV, Dzhemalyadinov RM, Skakun VV. Influence of ultradispersed modifiers of fluids on power characteristics of the process of cutting construction materials. *Bulletin of Voronezh State Technical University*. 2018;14(6):140–145. (In Russ.)

3. Zadiranov AN, Koltunov II, Malkova MYu. *Nanotechnology in metallurgy*. Moscow: CKT Publ.; 2012. (In Russ.)

4. Krushenko GG. Application of nanopowders of chemical compounds to improve the quality of metal products. *Tekhnologiya Mashinostroeniya*. 2002;(3):3–6. (In Russ.)

5. Zykova A, Kalashnikov M, Popova N, Kurzina I. Fine structure and phase composition of Fe–14Mn–1.2C steel: influence of a modified mixture based on refractory metals. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2017;24(5):523–529.

6. Zykova AP, Fedoseev SN, Lychagin DV. Steel GX120MN12 modifying by ultradisperse pow-

ders of refractory metal oxides. *Handbook. An Engineering Journal*. 2014;(9(210)):3–7. (In Russ.) <https://doi.org/10.14489/hb.2014.09.pp.003-007>

7. Zykova AP, Chumaevskij AV, Lychagin DV, Kurzina IA, Abzaev YuA, Dement TV. The effect of modification of metal oxides by ultrafine powders on the deformation behavior and destruction of cast iron of the ICHH28H2 grade. *Izvestiya Vysshih Uchebnyh Zavedenij. Fizika*. 2013;56(12–2):110–115. (In Russ.)

8. Zykova AP, Kurzina IA, Chumaevskij AV, Lychagin DV. Modification of cast iron with ultrafine powders of metal oxides. In: Kuzminov AL. (ed.) *Scientific and Technical Progress in Ferrous Metallurgy: 1st International Scientific and Technical Conference* (Cherepovets, 2–4 October 2013). Cherepovets; 2013. p. 112–114. (In Russ.)

9. Zykova AP, Lychagin DV, Chumaevskij AV, Kurzina IA, Novomejskij MYu. Influence of modification by ultradispersed powders of oxides of refractory metals and cryolite on the structure, mechanical properties and destruction of SCH25 cast iron. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2014;57(11):37–42. (In Russ.)

10. Zykova A, Lychagin D, Chumaevsky A, Popova N, Kurzina I. Influence of ultrafine particles on structure, mechanical properties, and strengthening of ductile cast iron. *Metals*. 2018;8(7):559. <http://doi.org/10.3390/MET8070559>

11. Panin SV, Kormienko LA, Vannarsi S, Ivanova LR, Shilko SV. Comparative analysis of the influence of nano- and microfillers of oxidized al on the frictional-mechanical characteristics of UHMWPE. *Journal of Friction and Wear*. 2010;31(5):371–377. (In Russ.)

12. Zykova A, Martyushev N, Skeebea V, Zadkov D, Kuzkin A. Influence of W addition on microstructure and mechanical properties of Al-12%Si alloys. *Materials*. 2019;12(6):981. <https://doi.org/10.3390/ma12060981>

13. Zykova A, Kazantseva L, Vorozhtsov A, Kurzina I, Popova N. Influence of modifying mixtures on Si crystal formation in Al-7%Si alloy. *Metals*. 2018;8(2):98. <https://doi.org/10.3390/MET8020098>

14. Martyushev NV, Bashev VS, Zykova AP. Influence of soaking time of modifier in melt on microstructure of Al-12%Si alloys. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017;177:012118. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012118>

15. Bashev VS. Investigation of the effect of ultrafine powder W on the structure and properties of the foundry alloy of the Al-Si system. *24th Tupolev Readings (School of Young Scientists: Texts of Reports of Participants of the International Youth Scientific Conference* (vol. 1, p. 231–235). Kazan; 2019. (In Russ.)

16. Semenov IV, Martyushev NV, Drozdov YY, Zykova AP, Popelyukh AI, Alpeisov AT. The influence of modification by superdispersed powders on the lead-TiN-base bronze structure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016:012114. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/124/1/012114>

17. Serikbol A, Fedoseev SN. Modification of materials with ultrafine powders. In Gorokhov AA (ed.) *Perspective development of science, technology and technologies. Materials of the 3rd International Scientific and Practical Conference* (vol. 3). Kursk; 2013. p. 205–207. (In Russ.)

18. Saburov VP, Cherepanov AN, Zhukov MF, Gulevskij GV, Krushenko GG, Borisov VT. Plasma chemical synthesis of ultrafine powders and their application for modification of metals and alloys. *Low-Temperature Plasma* (vol. 12). Novosibirsk: Nauka Publ.; 1995. (In Russ.)

Сведения об авторах

Малькова Марианна Юрьевна, доктор технических наук, директор департамента машиностроения и приборостроения, Инженерная академия, Российский университет дружбы народов, Российская Федерация, 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6. ORCID: 0000-0002-6939-1658, Scopus Author ID: 57214744555, eLIBRARY SPIN-код: 2680-1505. E-mail: malkova-myu@rudn.ru

Задиранов Александр Никитич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры процессов горения и экологической безопасности, Учебно-научный комплекс процессов горения и экологической безопасности, Академия государственной противопожарной службы, Российская Федерация, 129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4. ORCID: 0000-0001-7787-8290, Scopus Author ID: 57214856655, eLIBRARY SPIN-код: 2873-6465. E-mail: zadiranov@mail.ru

Герасимова Ирина Николаевна, старший преподаватель, кафедра процессов горения и экологической безопасности, Учебно-научный комплекс процессов горения и экологической безопасности, Академия государственной противопожарной службы, Российская Федерация, 129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4. ORCID: 0000-0001-7829-9610, eLIBRARY SPIN-код: 1642-3527. E-mail: malviktp@gmail.com

Грушева Татьяна Геннадьевна, старший преподаватель, кафедра процессов горения и экологической безопасности, Учебно-научный комплекс процессов горения и экологической безопасности, Академия государственной противопожарной службы, Российская Федерация, 129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, д. 4. ORCID: 0000-0003-0515-4167, eLIBRARY SPIN-код: 3589-5839. E-mail: malviktp@gmail.com

About the authors

Marianna Yu. Malkova, Doctor of Technical Sciences, Director of the Department of Mechanical Engineering and Instrumentation, Academy of Engineering, Peoples' Friendship University of Russia (RUDN University), 6 Miklukho-Maklaya St, Moscow, 117198, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-6939-1658, Scopus Author ID: 57214744555, eLIBRARY SPIN-code: 2680-1505. E-mail: malkova-myu@rudn.ru

Alexander N. Zadiranov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Combustion Processes and Environmental Safety, Educational and Scientific Complex of Combustion Processes and Environmental Safety, State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 4 Boris Galushkin St, Moscow, 129366, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-7787-8290, Scopus Author ID: 57214856655, eLIBRARY SPIN-code: 2873-6465. E-mail: zadiranov@mail.ru

Irina N. Gerasimova, senior lecturer, Department of Combustion Processes and Environmental Safety, Educational and Scientific Complex of Combustion Processes and Environmental Safety, State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 4 Boris Galushkin St, Moscow, 129366, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-7829-9610, eLIBRARY SPIN-code: 1642-3527. E-mail: mal-viktpp@gmail.com

Tatiana G. Grusheva, senior lecturer, Department of Combustion Processes and Environmental Safety, Educational and Scientific Complex of Combustion Processes and Environmental Safety, State Fire Academy of EMERCOM of Russia, 4 Boris Galushkin St, Moscow, 129366, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-7829-9610, eLIBRARY SPIN-code: 3589-5839. E-mail: mal-viktpp@gmail.com