DOI 10.52209/1609-1825_2024_1_50 УДК 621.791.92

Изучение технологии синтеза металлокерамического материала системы Al_xFe_ySi

АНДРЕЯЩЕНКО Виолетта Александровна, *PhD, руководитель лаборатории,*
Vi-ta.z@mail.ru,
НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»,
пр. Н. Назарбаева, 56, Караганда, Казахстан,

Аннотация. *Современный этап развития рынка металлоизделий диктует необходимость поиска новых материалов с улучшенным набором эксплуатационных характеристик при использовании наукоемких технологий и общедоступного сырья. Одним из перспективных материалов, обладающих привлекательным набором свойств, являются керамики типа MeSi (силициды). Материалы из данной группы обладают высокой твердостью и износостойкостью. Исследование сплавов системы Al-Si, содержащих такие элементы, как железо, медь, марганец, является одним из перспективных направлений в металлургии и материаловедении. Для решения проблемы повышения качества деталей на основе алюминия решено использовать композиционный керамический материал Al_xFe_ySi. В настоящей работе с использованием принципов аддитивных технологий получена опытная партия металлокерамических материалов, обладающих типичной литой микроструктурой с набором фаз, присущих рассматриваемой системе. Выявлено, что величина твердости полученного материала составляет 541,7 единиц по Виккерсу, превышая твердость стали-подложки в 2 раза.*

Ключевые слова: *композиционные материалы, алюминиевые сплавы, керамика, микроструктура, твердость.*

Введение

Современный этап развития рынка металлоизделий диктует необходимость поиска новых материалов с улучшенным набором эксплуатационных характеристик при использовании наукоемких технологий и общедоступного сырья. Потребность в легких материалах постоянно возрастает, особенно в автомобильной и авиационной отраслях, поскольку подразумевает снижение эксплуатационных расходов. Алюминий, который является вторым по легкости структурным металлом, уже широко используется от пищевых контейнеров до баллистической защиты [1]. Одним из современных путей создания перспективных материалов, обладающих привлекательным комплексом физико-механических характеристик, является переход от традиционных технологий к более современным. К перспективным материалам стоит отнести дисперсно-упрочненные композиционные материалы. Большой интерес представляют алюминиевые металломатричные композиционные материалы, особенно армированные керамическими частицами [2]. Аддитивная технология позволяет быстро изготавливать трехмерные металлические, керамические или композиционные детали с металлической матрицей любой сложной формы. Такие сложные «компоненты-конфигурации» невозможно получить с помощью традиционных методов обработки. Вне зависимости от метода синтеза, такие материалы характеризуются повышенными механическими характеристиками по сравнению с матричным сплавом.

Особый интерес представляет система Al-Si-Fe, что связано с удобным сочетанием механических свойств и относительной легкости материала при рациональном составе с введением в структуру керамики. Несмотря на высокий интерес исследователей из разных стран мира к системе Al-Si-Fe, процесс получения бездефектного малопористого сплава/псевдосплава остается весьма затруднительным [3-5]. Сварка/наплавка является эффективным методом синтеза разнообразных групп материалов. При этом применение постобработки может поднять на новый уровень производительность про-

цесса.

В настоящее время в большинстве производственных отраслей для сварки/наплавки используются дуговая сварка в защитном металле (SMAW), газовая дуговая сварка металла (GMAW), газовая вольфрамовая дуговая сварка (GTAW) [6] и дуговая сварка под флюсом (SAW) [7]. В настоящее время дуговая сварка под флюсом с добавлением металлического порошка вызывает все больший интерес как процесс наплавки [8]. Отличительной чертой процесса наплавки являются высокие скорости нагрева и, особенно, охлаждения. Такая особенность технологии может стать ключевой при потребностях подавления фазового перехода, в частности, в композициях системы Al-Si-Fe [9].

Стоит отметить, что деформация силицидных керамик может осуществляться лишь в характерном температурном диапазоне (интервале переработки) от температуры горения (1900°C) до температуры живучести (1750°C), выше которой материал обладает еще способностью к пластическому деформированию, а ниже затвердевает и теряет свои пластические свойства. Способность к высокотемпературному макроскопическому течению зависит как от уровня реологических свойств (предела текучести, сдвиговой и объемной вязкости), так и от влияния на них структурных процессов (роста и коагуляции зерен, кристаллизации) и условий деформирования [10]. Однако нами ранее выявлено [11], что фаза Al_8Fe_2Si обладает гексагональной кристаллической решеткой и способна подвергаться пластическому деформированию при значительно более низких температурах, что существенно расширяет последующую область применения и использования разрабатываемых композиционных материалов.

Цель работы: Исследование технологии синтеза композиционных керамических материалов системы Al_xFe_ySi с использованием аддитивного метода.

Методы исследования

Выбор трехкомпонентной системы Al-Fe-Si обусловлен широкими возможностями создания разнообразного фазового состава из недорогих элементов, без использования легирования редкоземельными и тугоплавкими элементами, и высокими эксплуатационными характеристиками готовых деталей.

Однако трудности при классических способах получения изделий данной системы возникают при попытке получить компактный композит. При этом большинство ученых рассматривают либо железный, либо алюминиевый угол трехкомпонентной системы, однако такие сплавы/псевдосплавы не обладают высокими механическими и эксплуатационными свойствами и оказываются практически неспособными воспринимать пластическую деформацию. В предлагаемом исследовании использован метод синтеза, ранее не применяемый для получения композитов данной системы. Для синтезирования объемного материала использован аддитивный метод путем наплавки под флюсом плавящимся электродом. Выбор такого подхода обеспечивает получение заданного состава путем использования шихты с определенным содержанием требуемых элементов, использование флюса минимизирует угар шихтовых элементов и исключает окисление при высоких температурах. При этом высокие температуры, достигаемые при реализации синтеза, обеспечивают полноценное формирование требуемого фазового состава.

В первую очередь выполнены экспериментальные исследования по подготовке шихтовых материалов. Подготовленная шихта, состоящая из смеси стружки алюминия марки А0, измельченной стружки стали марки 08кп и измельченного металлического кремния, подвергнута механическому легированию путем смешивания исходных компонентов и их совместного измельчения на вибрационном истирателе, а затем измельчению на вибрационной мельнице для достижения фракции – 0,5 мм.

На следующем этапе исследования реализован синтез композита и получена опытная партия материала. На металлической подложке располагали плавящийся электрод, на него помещали подготовленный шихтовый материал и, следом, слой флюса. После получения материала подготовлены образцы для проведения металлографических исследований и твердости.

Научные результаты

При реализации синтеза композиционного металлокерамического материала использован многопостовой источник питания для дуговой сварки для наплавки пластинчатым электродом ВДМ-1202, ток наплавки составлял 200 и 220 А. Величина слоя материала подложки, вовлекаемого в процесс синтеза уменьшалась при снижении силы тока с 32% до 28% от общего синтезированного/наплавленного объема материала. Этапы синтеза показаны на рисунке 1.

Исходный состав шихты составлял Al 59 : Fe 32 : Si 9 весовых процентов. Однако в процессе синтеза наблюдалось интенсивное перемешивание сварочной ванны с вовлечением как материала подложки, так и плавящегося электрода, что привело к

увеличению количества железа в полученном металлокерамическом материале до 80-85%.

Наиболее частым дефектом сварных швов и, в частности, наплавок, является появление несплошностей, пор, газовых пузырей, несплавлений, непроваров и прочее. Исследование полученных образцов на наличие дефектов осуществляется визуальным контролем при помощи лупы. Детальный осмотр полученных образцов не выявил наличие вышеперечисленных дефектов. При помощи металлографического анализа изучены поперечные микрошлифы на наличие неметаллических включений (рисунок 2). Для повышения точности выявления проведены

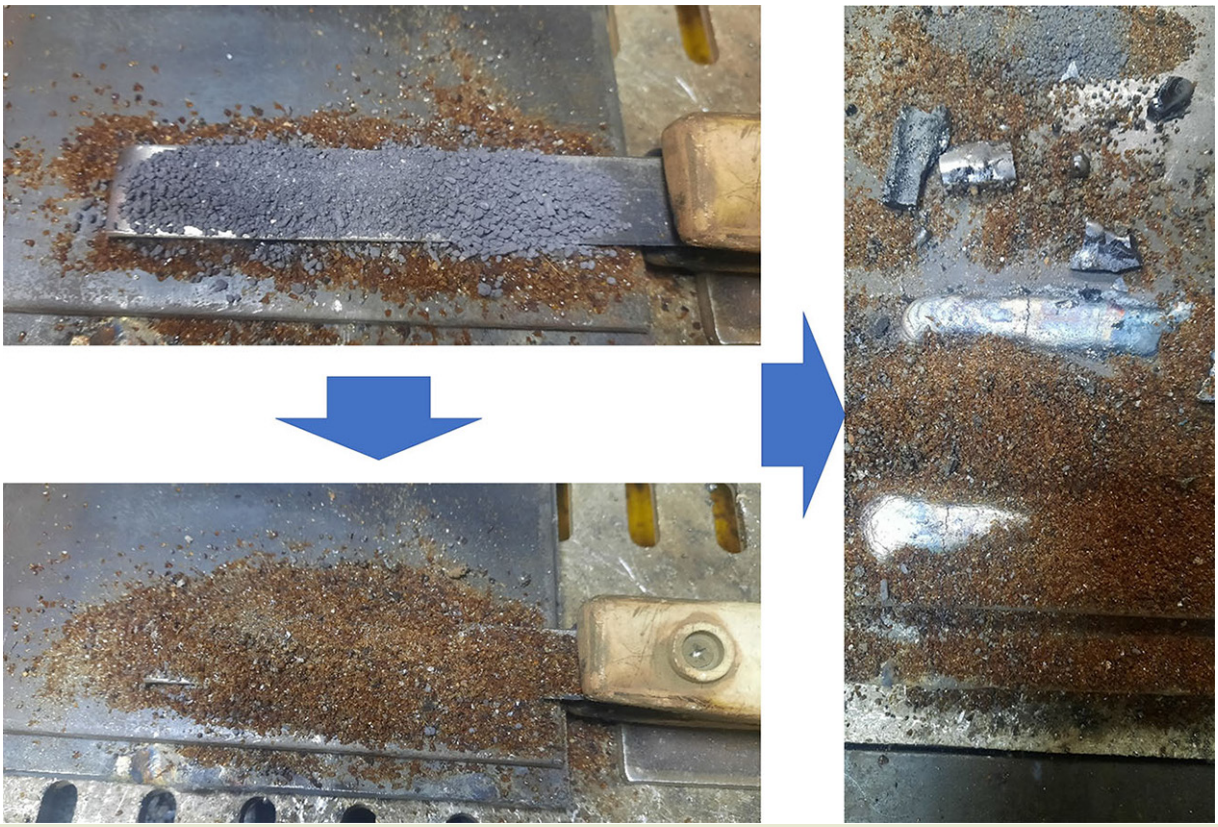

Рисунок 1 – Этапы синтеза композиционного металлокерамического материала системы Al-Si-Fe

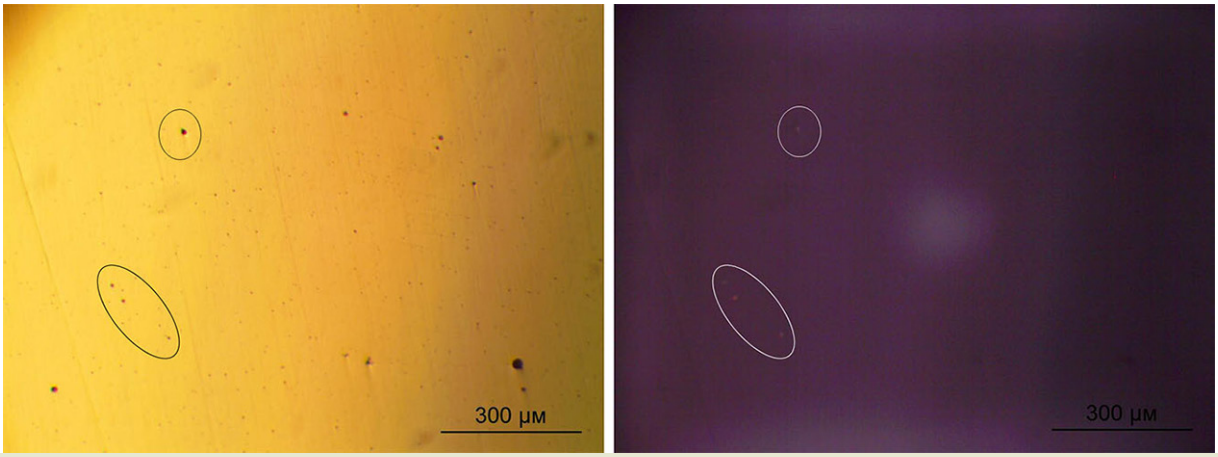

Рисунок 2 – Светлопольное (а) и темнопольное (б) изображение нетравленных микрошлифов полученного композиционного материала

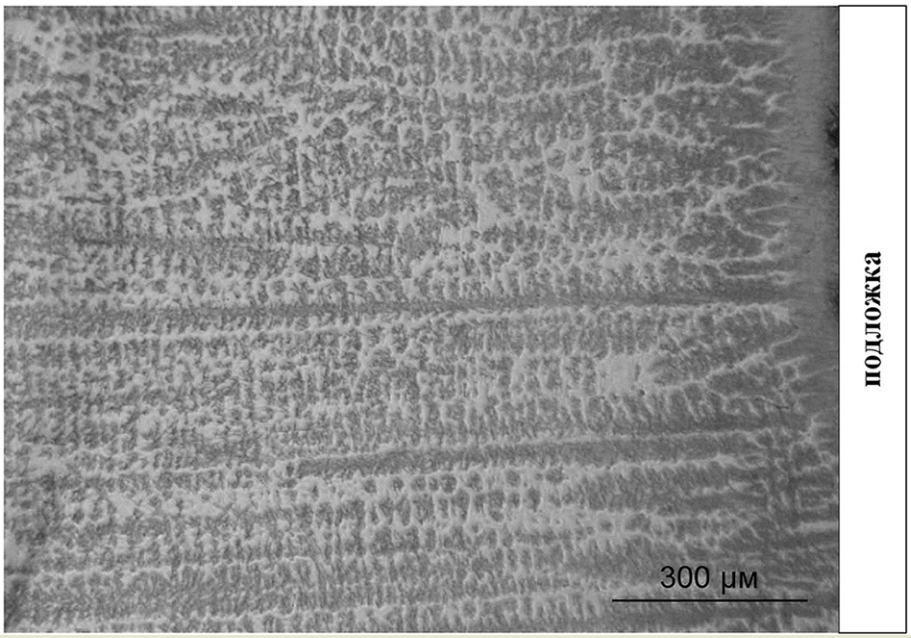

Рисунок 3 – Литая структура полученного металлокерамического материала

исследования как в светлопольном, так и в темнопольном изображениях. Исследования проведены на оптическом микроскопе. Окружностями показаны предположительно оксидные включения, выявляемые при изучении поверхности микрошлифов как в светлом, так и в темном полях. Размеры включений во всех полях зрения имеют размеры менее 10 мкм.

Полученные образцы обладают типичной литой микроструктурой с набором фаз, присущим рассматриваемой системе. Дендриты направлены нормально к подложке, выявляются оси первого, второго и третьего порядков. Средняя твердость металлокерамического материала системы Al-Si-Fe составляет 541,7 единиц по Виккерсу при нагрузке 3кН, при этом твердость материала основы составила 260,2.

Полученные результаты говорят о пригодности метода для синтеза металлокерамического материала системы Al_xFe_ySi. Следовательно, в данной работе получен перспективный материал, и необходимо продолжение работ по его исследованию.

Выводы

Изучена технология синтеза металлокерамического материала системы Al_xFe_ySi, получена опытная партия образцов. Полученный материал не имеет видимых дефектов, снижающих качество полученного материала, микроструктура литая, типичная для процессов сварки/наплавки, твердость полученного материала составляет 541,7 единиц по Виккерсу.

Настоящее исследование выполнено при финансировании Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP19675471).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. H. Queudet, S. Lemonnier, E. Barraud, J. Guyon, J. Ghanbaja, N. Allain, E. Gaffet, One-step consolidation and precipitation hardening of an ultrafine-grained Al-Zn-Mg alloy powder by Spark Plasma Sintering, Materials Science and Engineering: A, V. 685, 2017, pp. 227-234, https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.01.009
2. Жабин А.Н., Няфкин А.Н. Изготовление металломатричных композиционных материалов с применением аддитивных технологий (обзор) / Труды ВИАМ, 2022, № 2 (108), С. 64-74.
3. Najzabekov A.B., Andreyachshenko V.A., Basov V.V. Analyze of microstructure of composition material Al-Si-Fe system, Journal of NANO- and electronic physics, Vol. 6, no. 3, 2014, 03007-1-03007-3.

4. Найзабеков А.Б., Андреященко В.А. Сравнительный анализ теоретических и экспериментальных результатов по получению наноматериала системы Al-Si-Fe // Труды Международной научно-технической конференции «Нанотехнологии функциональных материалов», 24-28 июня 2014 г. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. Санкт-Петербург, 2014. Россия.
5. Найзабеков А.Б., Андреященко В.А., Басов В.В. Анализ микроструктуры композиционного материала системы Al-Si-Fe // Труды XI Международной конференции «Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов», 13-14 мая 2014 г. Юго-Западный государственный университет. Курск, Россия, 2014. С. 162-164.
6. Kunčická, L., Kocich, R., Németh, G., Dvořák, K., & Pagáč, M. Effect of post process shear straining on structure and mechanical properties of 316 L stainless steel manufactured via powder bed fusion. Additive Manufacturing, 59, 2022, 103128. https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103128
7. Buntoeng Srikarun, Hein Zaw Oo, Salita Petchsang, Prapas Muangjunburee, The effects of dilution and choice of added powder on hardfacing deposited by submerged arc welding, Wear, V. 424-425, 2019, pp. 246-254, https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.02.027.
8. Zahiri, R., Sundaramoorthy, R., Lysz, P., & Subramanian, C. Hardfacing using ferro-alloy powder mixtures by submerged arc welding. Surface and Coatings Technology, 260, 2014, 220-229.
9. Найзабеков А.Б., Андреященко В.А. Анализ и исследование технологии получения композиционного материала системы Al-Si-Fe совмещением метода порошковой металлургии и равноканального углового прессования // Труды Международной школы-семинара «Инновационные технологии и исследования, направленные на развитие зеленой энергетики и глубокой переработки продукции», Усть-Каменогорск, Республика Казахстан, 2013. С. 46.
10. Столин, А.М., Бажин, П.М., Михеев, М.В., Филонов, М.Р., Кузнецов, Д.В. Синтез силицидной керамики на основе дисилицида молибдена в режиме горения в условиях высокотемпературного деформирования // Новые огнеупоры. 2016. (6). С. 56-61.
11. Naizabekov A.B., Andreyachshenko V.A., Bassov V.V. Analyze of microstructure of composition material Al-Si-Fe system, Journal of NANO- and electronic physics, Vol. 6, no. 3, 2014, 03007-1-03007-3.

Al_xFe_ySi жүйесінің метал-керамикалық материалының синтезі технологиясын зерттеу

АНДРЕЯЩЕНКО Виолетта Александровна, *PhD, зертхана меңгерушісі, Vi-ta.z@mail.ru, «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» КеАҚ, Н. Назарбаев даңғылы, 56, Қарағанды, Қазақстан,*

Аңдатпа. *Металл бұйымдары нарығын дамытудың қазіргі кезеңі жоғары технологиялар мен жалпыға қолжетімді шикізатты пайдалана отырып, өнімділік сипаттамаларының жақсартылған жиынтығы бар жаңа материалдарды іздеу қажеттілігін талап етеді. Тартымды қасиеттері бар перспективалы материалдардың бірі – MeSi типті керамика (силицидтер). Бұл топтағы материалдар жоғары қаттылық пен тозуға төзімділікке ие. Құрамында темір, мыс, марганец сияқты элементтері бар Al-Si жүйесінің қорытпаларын зерттеу металлургия мен материалтанудағы перспективалы бағыттардың бірі болып табылады. Алюминий негізіндегі бөлшектердің сапасын жақсарту мәселесін шешу үшін Al_xFe_ySi композиттік керамикалық материалды пайдалану туралы шешім қабылданды. Бұл жұмыста аддитивті технологиялардың принциптерін қолдана отырып, қарастырылып отырған жүйеге тән фазалар жиынтығы бар типтік құйма микроқұрылымы бар металл керамикалық материалдардың тәжірибелік партиясы алынған. Алынған материалдың қаттылығы 541,7 Виккерс бірлігін құрайтыны, болат-субстраттың қаттылығынан 2 есе асатыны анықталды.*

Кілт сөздер: *композиттік материалдар, алюминий қорытпалары, керамика, микроқұрылым, қаттылық.*

Study of the Technology of Synthesis of Metal-Ceramic Material of the Al_xFe_ySi System

ANDREYACHSHENKO Violetta, *PhD, Head of Laboratory, Vi-ta.z@mail.ru,*
NPJSC «Abylkas Saginov Karaganda Technical University», N. Nazarbayev Avenue, 56, Karaganda, Kazakhstan,

Abstract. *The current stage of development of the metal products market dictates the need to search for new materials with an improved set of performance characteristics using high technologies and publicly available raw materials. One of the promising materials with an attractive set of properties is ceramics of the MeSi type (silicides). Materials from this group have high hardness and wear resistance. The study of alloys of the Al-Si system containing elements such as iron, copper, manganese is one of the promising areas in metallurgy and materials science. To solve the problem of improving the quality of aluminum-based parts, it was decided to use Al_xFe_ySi composite ceramic material. In this work, using the principles of additive technologies, an experimental batch of metal-ceramic materials is obtained, which has a typical cast microstructure with a set of phases inherent in the system under consideration. It was found that the hardness of the resulting material is 541.7 Vickers units, exceeding the hardness of the steel-substrate by 2 times.*

Keywords: *composite materials, aluminum alloys, ceramics, microstructure, hardness.*

REFERENCES

1. H. Queudet, S. Lemonnier, E. Barraud, J. Guyon, J. Ghanbaja, N. Allain, E. Gaffet, One-step consolidation and precipitation hardening of an ultrafine-grained Al-Zn-Mg alloy powder by Spark Plasma Sintering, Materials Science and Engineering: A, V. 685, 2017, pp. 227-234, https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.01.009
2. ZHabin A.N., Nyafkin A.N. Izgotovlenie metallomatrichnyh kompozicionnyh materialov s primeneniem additivnyh tekhnologij (obzor) [Production of metal-matrix composite materials using additive technologies (review)]. Trudy VIAM, 2022, no. 2 (108), pp. 64-74.
3. Najzabekov A.B., Andreyachshenko V.A., Basov V.V. Analyze of microstructure of composition material Al-Si-Fe system, Journal of NANO- and electronic physics, Vol. 6, no. 3, 2014, pp. 03007-1-03007-3.
4. Najzabekov A.B., Andreyashchenko V.A. Sravnitel'nyj analiz teoreticheskih i eksperimental'nyh rezul'tatov po polucheniyu nanomateriala sistemy Al-Si-Fe [Comparative analysis of theoretical and experimental results on obtaining a nanomaterial of the Al-Si-Fe system] // Trudy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoj konferencii «Nanotekhnologii funkcional'nyh materialov» [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference «Nanotechnologies of Functional Materials»]. 24-28 iyunya 2014 g. Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj politekhnicheskij universitet. Sankt-Peterburg, 2014. Rossiya.
5. Najzabekov A.B., Andreyashchenko V.A., Basov V.V. Analiz mikrostruktury kompozicionnogo materiala sistemy Al-Si-Fe [Analysis of the microstructure of the composite material of the Al-Si-Fe system] // Trudy XI Mezhdunarodnoj konferencii «Perspektivnye tekhnologii, oborudovanie i analiticheskie sistemy dlya materialovedeniya i nanomaterialov» [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference «Nanotechnologies of Functional Materials»]. 13-14 maya 2014 g. YUgo-Zapadnyj gosudarstvennyj universitet. Kursk, Rossiya, 2014. Pp. 162-164.
6. Kunčická, L., Kocich, R., Németh, G., Dvořák, K., & Pagáč, M.. Effect of post process shear straining on structure and mechanical properties of 316 L stainless steel manufactured via powder bed fusion. Additive Manufacturing, 59, 2022, 103128. https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103128
7. Buntoeng Srikarun, Hein Zaw Oo, Salita Petchsang, Prapas Muangjunburee, The effects of dilution and choice of added powder on hardfacing deposited by submerged arc welding, Wear, V. 424–425, 2019, P. 246-254, https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.02.027.
8. Zahiri, R., Sundaramoorthy, R., Lysz, P., & Subramanian, C. Hardfacing using ferro-alloy powder mixtures by submerged arc welding. Surface and Coatings Technology, 260, 2014, P. 220-229.

9. Najzabekov A.B., Andreyashchenko V.A. Analiz i issledovanie tekhnologii polucheniya kompozicionnogo materiala sistemy Al-Si-Fe sovmeshcheniem metoda poroshkovoj metallurgii i ravnokanal'nogo uglovogo pressovaniya [Analysis and study of the technology for obtaining a composite material of the Al-Si-Fe system by combining the method of powder metallurgy and equal-channel angular pressing] // Trudy Mezhdunarodnoj shkoly-seminara «Innovacionnye tekhnologii i issledovaniya, napravlennye na razvitie zelenoj energetiki i glubokoj pererabotki produkcii» [Proceedings of the International School-seminar «Innovative technologies and research aimed at the development of green energy and deep processing of products»], Ust'-Kamenogorsk, Respublika Kazahstan, 2013. P. 46.
10. Stolin, A.M., Bazhin, P.M., Miheev, M.V., Filonov, M.R., Kuznecov, D.V. Sintez silicidnoj keramiki na osnove disilicida molibdena v rezhime goreniya v usloviyah vysokotemperaturnogo deformirovaniya [Synthesis of silicide ceramics based on molybdenum disilicide in the combustion mode under conditions of high-temperature deformation] // Novye ogneupory [New refractories]. 2016. (6). Pp. 56-61.
11. Naizabekov A.B., Andreyachshenko V.A., Bassov V.V. Analyze of microstructure of composition material Al-Si-Fe system, Journal of NANO- and electronic physics, Vol. 6, no. 3, 2014, 03007-1-03007-3.