

ФИЗИКАЛЫҚ ПРОЦЕСТЕРДІ ҮЛГІЛЕУДІҢ МАТЕМАТИКАЛЫҚ ӨДІСТЕРІ
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
MATHEMATICAL METHODS FOR MODELING PHYSICAL PROCESSES

DOI 10.51885/1561-4212_2023_4_42

MPHTI 53.39.31

В.А. Андреященко¹, А.Р. Толеуова²

Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова,

г. Караганда, Казахстан

¹E-mail: Vi-ta.z@mail.ru*²E-mail: rymkul.ainagul@mail.ru**МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ СОЗДАНИЯ МАТЕРИАЛОВ****МАТЕРИАЛДАРДЫ ҚҰРУДЫҢ ФИЗИКАЛЫҚ ПРОЦЕСТЕРІН МОДЕЛЬДЕУ****SIMULATION OF PHYSICAL PROCESSES OF CREATING MATERIALS**

Аннотация. Улучшение механических свойств металлов и сплавов лежит в основе усилий материаловедов и металлургов для обеспечения надежности современных конструкционных материалов в различных условиях. Специфика материала системы Al-Fe-Si с содержанием каждого компонента более 5 % лишает возможности получения материала традиционным литьем. Аддитивное производство материалов – это новое перспективное направление, которое благодаря тепловому воздействию эффективно создает многокомпонентные системы с благоприятными свойствами.

Настоящая работа посвящена процессам моделирования физических процессов, в частности получению фазовой диаграммы состояния металлокерамического материала системы Al-Fe-Si в программном комплексе ThermoCalc.

Актуальность исследования определяется разработкой технологии получения материала с заданным составом и свойствами аддитивными методами. Использование флюса минимизирует угар шихтовых элементов и исключает окисление при высоких температурах. Высокие температуры, достигаемые при реализации синтеза, обеспечивают полноценное формирование требуемого фазового состава.

Целью настоящего исследования является моделирование многокомпонентной системы Al-Fe-Si с дальнейшим ее апробированием.

Рассмотрены температурные условия формирования фаз в материале с составом 60-90 весовых % алюминия, 0-30 весовых % железа, при постоянном содержании кремния 10 %. Для данного состава характерно образование одного тройного соединения, обладающего высокосимметричным типом кристаллической решетки – фазы α -AlFeSi, при этом данная фаза существует в температурном диапазоне 950°C – 400°C. Полученные результаты прогнозируют восприимчивость материала к пластической деформации, но исключительно с использованием нагрева до температуры преобладания фазы α -AlFeSi. Результаты физического эксперимента хорошо согласуются с полученными результатами моделирования. После синтеза материал обладает характерной литой микроструктурой.

Полученные данные позволяют подобрать технологические условия, необходимые для проведения дальнейшей обработки материала.

Ключевые слова: моделирование, ThermoCalc, Al-Fe-Si, синтез, керамический материал, микроструктура.

Аңдатпа. Металдар мен қорытпалардың механикалық қасиеттерін жақсарту материалтанушы ғалымдар мен металлургердің әртүрлі жағдайларда қазіргі заманғы құрылымдық

материалдардың сенімділігін қамтамасыз етудегі күш-жігерінің негізі болып табылады. Әр құрамдас бөлігі 5 %-дан асатын Al-Fe-Si жүйесінің материалының ерекшелігі дәстүрлі құю арқылы материалды алуды мүмкін емес етеді. Материалдарды қосу өндірісі – бұл жылу эффектінің арқасында қолайлы қасиеттері бар көпкомпонентті жүйелерді тиімді жасайтын жаңа перспективалы бағыт.

Бұл жұмыс физикалық процестерді модельдеу процестеріне, атап айтқанда, ThermoCalc бағдарламалық пакетінде Al-Fe-Si жүйесінің кермет материалының күйінің фазалық диаграммасын алуға арналған.

Зерттеудің өзектілігі аддитивтік әдістермен берілген құрамы мен қасиеттері бар материалды алу технологиясын жасаумен анықталады, флюсті қолдану шихта элементтерінің шығынын барынша азайтады және жоғары температурада тотығуды болдырмайды. Сонымен қатар синтезді жүзеге асыру кезінде қол жеткізілген жоғары температура қажетті фазалық құрамның толық қалыптасуын қамтамасыз етеді.

Бұл зерттеудің мақсаты – көпкомпонентті Al-Fe-Si жүйесін одан әрі тестілеу арқылы модельдеу.

Құрамы 60-90 масса % алюминий, 0-30 масса % темір, тұрақты кремний мөлшері 10 % болатын материалдағы фазалардың түзілуіне арналған температуралық жағдайлар қарастырылған. Бұл композиция кристалдық тордың жоғары симметриялық түрі бар бір үштік қосылыстың түзілуімен сипатталады – α -AlFeSi фазасы, бұл фаза 950 °C – 400 °C температура диапазонында болады. Алынған нәтижелер материалдың пластикалық деформацияға бейімділігін болжайды, бірақ тек қана α -AlFeSi фазасының басымдылық температурасына дейін қыздыруды қолданады. Физикалық эксперимент нәтижелері алынған модельдеу нәтижелерімен жақсы сәйкес келеді. Синтезден кейін материалдың өзіне тән құйма микроқұрылымы болады.

Алынған мәліметтер алынған материалды одан әрі өңдеуге қажетті технологиялық шарттарды таңдауға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: модельдеу, ThermoCalc, Al-Fe-Si, синтез, керамикалық материал, микроқұрылым.

Abstract. Improving the mechanical properties of metals and alloys is at the heart of the efforts of materials scientists and metallurgists to ensure the reliability of modern structural materials under various conditions. The specificity of the material of the Al-Fe-Si system with a content of each component of more than 5% makes it impossible to obtain the material by traditional casting. Additive manufacturing of materials is a new promising direction, which, thanks to the thermal effect, effectively creates multicomponent systems with favorable properties.

This work is devoted to the processes of modeling physical processes, in particular, obtaining a phase diagram of the state of the cermet material of the Al-Fe-Si system in the ThermoCalc software package.

The relevance of the study is determined by the development of a technology for obtaining material with a given composition and properties by additive methods, the use of a flux minimizes the waste of charge elements and eliminates oxidation at high temperatures. At the same time, the high temperatures achieved during the implementation of the synthesis ensure the full formation of the required phase composition.

The purpose of this study is to model a multicomponent Al-Fe-Si system with its further testing.

The temperature conditions for the formation of phases in a material with a composition of 60–90 wt % aluminum, 0–30 wt % iron, with a constant silicon content of 10 % are considered. This composition is characterized by the formation of one ternary compound with a highly symmetrical type of crystal lattice - the α -AlFeSi phase, while this phase exists in the temperature range of 950°C - 400°C. The results obtained predict the susceptibility of the material to plastic deformation, but exclusively using heating to the temperature of the predominance of the α -AlFeSi phase. The results of the physical experiment are in good agreement with the obtained simulation results. After synthesis, the material has a characteristic cast microstructure.

The data obtained make it possible to select the technological conditions necessary for further processing of the obtained material.

Keywords: modeling, ThermoCalc, Al-Fe-Si, synthesis, ceramic material, microstructure.

Введение Улучшение механических свойств металлов и сплавов лежит в основе усилий материаловедов и металлургов для обеспечения надежности современных конструкционных материалов в различных условиях. Наиболее важное значение для автомобильной, строительной, машиностроительной и энергетической промышленности приобретают высокий предел текучести и достаточная деформируемость. Для достижения лучших механических характеристик в последнее время предлагается ряд стратегий.

Например, аддитивное производство материалов – это новое перспективное направление, которое благодаря тепловому воздействию эффективно создает многокомпонентные системы с благоприятными свойствами. Кинетика фазового взаимодействия была специально регламентирована для разработки предельных величин взаимной растворимости металлов в твердом состоянии. С другой стороны, превышение порога растворимости, когда компоненты находятся в эквимолярной концентрации, существенно трансформирует термодинамические процессы, протекающие в традиционных сплавах, формируя уникальные механические свойства и термическую стабильность [1-5].

Фазовый состав таких сплавов прогнозируется исходя из двойных и тройных диаграмм состояния. Для решения этой задачи успешно применяются математические методы моделирования физических процессов, в частности использование программного обеспечения для построения фазовых диаграмм состояния. В этой связи успешно себя зарекомендовало программное обеспечение ThermoCalc производства Швеции.

Программное обеспечение позволяет на основании данных о составе и граничных условиях протекания взаимодействия, таких как температура и давление, создавать фазовые диаграммы равновесия, прогнозировать условия растворимости, формируемый фазовый и элементный состав, энтропию/энтальпию, энергию Гиббса, термодинамические условия существования фаз, а также некоторые свойства системы.

Результаты решения, как правило, дают хорошую корреляцию с физическими методами исследования и помогают в выборе условий как жидкофазных, так и твердофазных процессов, включая режимы термической обработки. Однако при физической реализации процессов синтеза многокомпонентных систем, состав которых существенно превышает физические пределы взаимной растворимости, возможно появление определенных ограничений при традиционных методах сплавления [6-10].

Молекулярная несовместимость компонентов системы делает аддитивные технологии практически единственным путем получения сложных композитов.

Однако с практической точки зрения неправильный выбор граничных условий может резко изменить кинетику синтеза и вызвать деградацию механических свойств.

Исследование корреляции моделирования физических процессов и экспериментальных данных обладает высокой научной значимостью, особенно для таких сложных многокомпонентных соединений, как система Al-Fe-Si, и обеспечивает правильный выбор технологических условий дальнейшей обработки для получения высокого уровня механических и эксплуатационных свойств материала.

Для синтезирования материала использован аддитивный метод путем наплавки под флюсом плавящимся электродом. Такой подход является актуальным, 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.

Целью настоящего исследования является моделирование многокомпонентной системы Al-Fe-Si с дальнейшим ее апробированием.

Материалы и методы исследования. Теоретический эксперимент по изучению фазового состава многокомпонентных систем проведен при помощи программного обеспечения ThermoCalc. В рамках исследования для расчета задана изучаемая многокомпонентная система Al-Fe-Si. Важным элементом расчетов является выявление и оценка взаимодействия основных компонентов системы. Взаимное влияние компонентов изменяет положение критических линий и линий растворимости на диаграмме, поэтому

этот вопрос требует детального рассмотрения. После расчетов в ThermoCalc построены фазовые диаграммы, определены атомарный и весовой составы каждой фазы, необходимое соотношение компонентов для получения заданного композита, а также формируемые фазы. Анализ фазовых диаграмм необходим для определения температурных условий формирования фаз. Этот эксперимент позволяет спрогнозировать структурный состав получаемых композитов и их свойства.

После построения фазовых диаграмм перешли к апробации полученных результатов с постановкой физического эксперимента. Были подготовлены шихтовые материалы: металлический кремний, технический чистый алюминий, сталь марки 08кп. Все исходные материалы измельчены в виброистирателе до фракции 0,3-0,5 мм. Контроль размеров частиц осуществлялся просеиванием через сита с соответствующим размером ячеек. Далее измельченные порошки исходных компонентов смешивали в соотношении Al 59 : Fe 32 : Si 9 весовых процентов и подвергали механическому легированию путем совместного измельчения в вибрационной мельнице в течение 5 минут с частотой 30 Гц. Вес каждой навески в стакане мельницы составлял 20 гр. Одновременно измельчалось две навески. После механического легирования смесь синтезировали аддитивным методом путем наплавки под флюсом плавящимся электродом. Был использован флюс марки АН348. Выполнена однопроходная однослойная обработка – наплавка пластинчатым электродом на многопостовом источнике питания для дуговой сварки ВДМ-1202 (рис. 1).

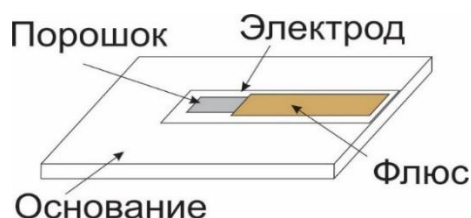


Рисунок 1. Схема процесса синтеза металлокерамического материала

В качестве оценки результатов синтеза контролировалась микроструктура полученного материала.

Микроструктура исследована на специально подготовленных по стандартной методике микрошлифах, затем микрошлифы травили в растворе азотной кислоты в спирте.

Результаты и их обсуждения. Традиционно считается, что железо и кремний являются неизбежными вредными примесями в алюминии [15]. Даже при незначительном растворении в количествах менее 1 % наблюдается резкое снижение пластических свойств, что также сопровождается повышением скорости коррозии. Кремний также оказывает отрицательное влияние на эксплуатационные и технологические свойства, при этом известно, что легирование кремнием приводит к формированию эвтектики с температурой плавления 577 °С. Однако, в случае превышении содержания железа относительно кремния, последний связывается в тройные соединения AlFeSi.

Известно всего 11 тройных соединений: ALFESI_T10, ALFESI_T11, ALFESI_T2, ALFESI_T3 (Al₂FeSi), ALFESI_T4, ALFESI_T7 (Fe₂Al₃Si₃), ALFESI_T8 (Fe₃Al₂Si₄), ALFESI_T9 (Fe₂Al₂Si₃); Al₁₈₅Fe₃₀Si₁₅, AL₈FE₂SI (Fe₃Al_{7.4}Si), AL₉FE₂SI₂ (Fe₂Al₉Si₂) и ряд бинарных. Каждое из соединений обладает собственным типом кристаллической решетки и свойствами.

В данном случае AL₈FE₂SI – тройная фаза Al-Fe-Si в алюминиевых сплавах, также известная как τ₅, α-AlFeSi; AL₉FE₂SI₂ – тройная фаза Al-Fe-Si в алюминиевых сплавах,

также известная как τ_6 , Al_5FeSi , $\beta-AlFeSi$; DIAMOND_A4 – Si, а также C или Ge; Al_4Fe – метастабильная фаза Al-Fe, образующаяся при затвердевании некоторых алюминиевых сплавов. Также известен $AlmFe$; $Al_{13}Fe_4$ – алюминид железа, часто образующийся в качестве первичной фазы во время литья, также известный как Al_3Fe .

Интерес в настоящей работе к фазе Al_8Fe_2Si вызван тем, что фаза обладает гексагональным типом кристаллической решетки. Также фаза $\alpha(Al_{12,7-12,9}Fe_3Si_{1-1,5})$ с близким составом 27-35 % Fe, 4-8 % Si обладает примитивной кубической или ОЦК решеткой. Все остальные тройные фазы обладают низшими сингониями: моноклинной, тетрагональной, орторомбической или ромбоэдрической, тем самым практически исключая возможность подвергаться пластической деформации.

Детальный анализ фаз, образованных в выбранной системе, показал, что фаза Al_8Fe_2Si относится к высокосимметричному типу кристаллической решетки, что говорит о принципиальной возможности подвергаться пластической деформации. С использованием сдвиговых схем деформации способность воспринимать деформацию появляется даже у весьма малопластичных сплавов [11-13, 16]. Поэтому для дальнейшего анализа наше внимание было сконцентрировано непосредственно на этой фазе.

Исходя из состава и морфологии, однозначно фаза Al_8Fe_2Si , как и остальные тройные соединения, уступает по показателям пластичности ГЦК твердому раствору кремния и железа в алюминии (алюминиевый угол тройной диаграммы) и ОЦК твердому раствору алюминия и кремния в железе (железный угол тройной диаграммы). При этом совокупность механических свойств показывает явное преимущество Al_8Fe_2Si по сравнению с вышеуказанными твердыми растворами [17].

Существует мнение, что фаза Al_8Fe_2Si (известная как α -фаза), а также фаза Al_5FeSi (известная как β -фаза) являются хрупкими образованиями. Хотя по данным работы [18] металлографическая идентификация, основанная на оптической микроскопии, практически невозможна, а учитывая, что при типичных условиях литья образование вторичных фаз с содержанием железа более 0,1-0,2 весовых % невозможно, для достижения способности воспринимать пластическую деформацию необходимо применять специфические методы синтеза.

В результате моделирования получена фазовая диаграмма для следующего состава: 60-90 весовых % алюминия, 0-30 весовых % железа, при постоянном содержании кремния 10 % (рис. 2).

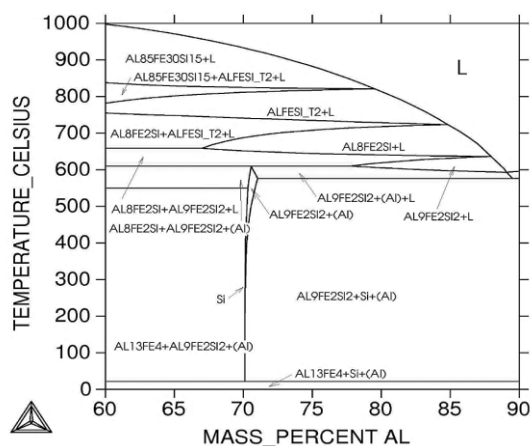


Рисунок 2. Политермический разрез фазовой диаграммы Al-Fe-Si

Анализ данных рис. 2 показал, что при кристаллизации сплава системы Al-Fe-Si с содержанием Al 60-90 % из сплава в первую очередь кристаллизуется фаза $Al_{18}Fe_2Si$. При этом с увеличением содержания алюминия линия ликвидуса постепенно снижается вплоть до 580 °С. При снижении температуры и в результате взаимодействия $Al_{18}Fe_2Si$ и жидкости образуется высокотемпературная фаза $AlFeSi$. При достижении температуры 755 °С происходит формирование фазы Al_8Fe_2Si . Фаза Al_8Fe_2Si или фаза τ_5 , $\alpha-AlFeSi$ имеет гексагональную решетку с параметрами $a=1,2404$ и $c=2,6234$. Присутствие фазы τ_5 наблюдается вплоть до температуры 551 °С. При дальнейшем снижении температуры, фаза τ_5 полностью трансформируется в фазу τ_6 , обладающую моноклинной решеткой. При содержании алюминия в диапазоне 60-70 % весь кремний оказывается связанным в фазах $Al_9Fe_2Si_2$, $Al_{13}Fe_4$, а также присутствует в растворенном виде в фазе (Al) – твердом растворе кремния и железа в алюминии с кристаллической решеткой типа ГЦК. При содержании алюминия более 70 % в структуре сплава присутствуют кристаллы кремния.

Полученные результаты хорошо согласуются с данными, представленными в работах [19-20], и позволяют успешно прогнозировать свойства получаемого материала. Стоит отметить, что в рассматриваемом диапазоне состава к высокосимметричным фазам относится только фаза Al_8Fe_2Si , твердый раствор кремния и железа в алюминии не рассматривается в связи с низкими механическими и эксплуатационными свойствами этой фазовой составляющей.

Интересным с точки зрения регулировки состава является влияние температуры на состав фазы Al_8Fe_2Si . Для исследования этого вопроса построили зависимость содержания компонентов в фазе Al_8Fe_2Si от температуры (рис. 3). Выявлено, что фаза Al_8Fe_2Si представлена составом Al 59 : Fe 32 : Si 9 весовых %, причем фаза присутствует при температурах от 950 °С до 400 °С, с изменением температуры ее состав остается постоянным.

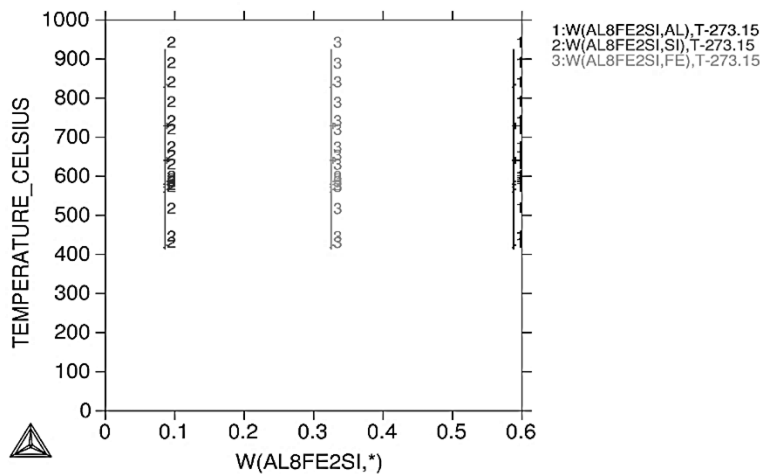


Рисунок 3. Зависимость содержания компонентов в фазе Al_8Fe_2Si от температуры

На следующем этапе исследования перешли к апробации и проверке результатов моделирования на практике. Синтез осуществляли на многопостовом источнике питания для дуговой сварки ВДМ-1202 путем наплавки пластинчатым электродом. В качестве основания использована стальная пластина толщиной 6 мм, пластинчатый электрод из стали 3 имел толщину 2 мм. Синтез выполнен с дублированием опытов на двух режимах:

ток 220 и 200 А. Две величины тока выбрано для подбора режима с меньшим перемешиванием материала основы с наплавляемым материалом. В результате синтеза как наплавляемый порошок, так и флюс переходят в жидкое состояние с формированием при остывании валика наплавленного материала. Вид образцов после синтеза и шлифовки/полировки представлен на рис. 4. Ток величиной 220 А обеспечивает полное расплавление шихты без образования непролагов и нерасплавившихся включений. Однако материал основы интенсивно вовлекается в ванну расплавленного материала, приводя к насыщению материала железом. Проведена вторая группа эксперимента со снижением величины тока на 10 % до 200 А. Снижение величины тока привело к меньшему вовлечению материала основания в плавильный процесс. При этом соединение наплавляемого материала с основой плотное, пустоты отсутствуют.

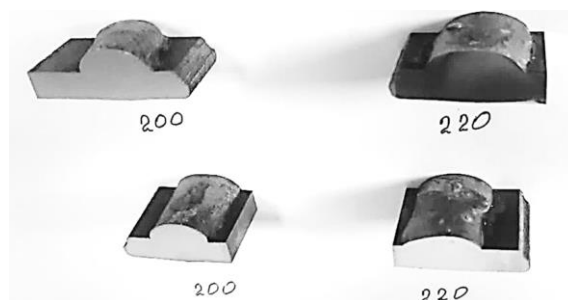


Рисунок 4. Внешний вид синтезированного материала

Охлаждение после наплавки осуществлялось на воздухе. Контроль микроструктуры выявил литую микроструктуру с характерным для наплавленных материалов расположением дендритов (рис. 5). Полученный материал однородный, поры и непровары отсутствуют. Окислов и шлаковых включений не обнаружено. В ветвях дендритов присутствуют дисперсные частицы кремния. Агрегаций кремниевых частиц при охлаждении не произошло, при этом в междендритном пространстве частиц кремния не наблюдается. Характер микроструктуры в литом состоянии хорошо согласуется с работами других авторов, например [14].

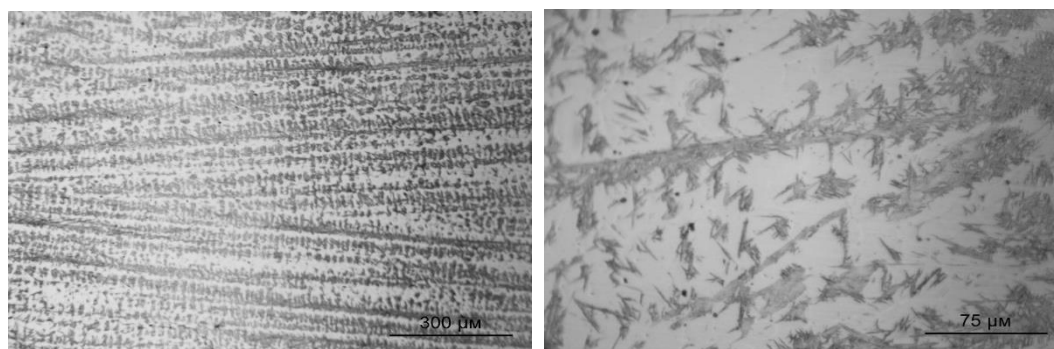


Рисунок 5. Микроструктура синтезированного материала, полученная под оптическим микроскопом с увеличением $\times 100$ и $\times 400$

Заключение. Данная статья показывает интеграцию методов моделирования физических процессов и результатов физического эксперимента. Получено хорошее согласование результатов модели и образца, получена фазовая диаграмма состояния

материала системы Al-Fe-Si, проведено физическое исследование синтеза материала с условиями, принятыми при моделировании. Полученные данные позволяют подобрать технологические условия, необходимые для проведения дальнейшей обработки полученного материала.

Благодарности. Настоящее исследование выполнено при финансировании Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (Грант № AP19675471) «Разработка технологии синтеза композиционных керамических материалов системы Al_xFe_ySi с использованием аддитивного метода».

Список литературы

1. Tokarewicz M., Grądzka-Dahlke M. Review of recent research on AlCoCrFeNi high-entropy alloy // *Metals*. – 2021. – V. 11. – № 8. – P. 1302. <https://doi.org/10.3390/met11081302>.
2. Ananiadis E. et al. Microstructure and corrosion performance of aluminium matrix composites reinforced with refractory high-entropy alloy particulates // *Applied Sciences*. – 2021. – V. 11. – № 3. – P. 1300. <https://doi.org/10.3390/app11031300>.
3. Sahin H., Zengin H. Microstructure, mechanical and wear properties of low-density cast medium and high entropy aluminium alloys // *International Journal of Metalcasting*. – 2022. – V. 16. – № 4. – P. 1976-1984.
4. Luo K. et al. AA1050 metal matrix composites reinforced by high-entropy alloy particles via stir casting and subsequent rolling // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2022. – V. 893. – P. 162370.
5. Ahsan M. R. U. et al. Effects of process parameters on bead shape, microstructure, and mechanical properties in wire+ arc additive manufacturing of Al0.1CoCrFeNi high-entropy alloy // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – V. 68. – P. 1314-1327.
6. Novák P. et al. Effect of nickel and titanium on properties of Fe-Al-Si alloy prepared by mechanical alloying and spark plasma sintering // *Materials*. – 2020. – V. 13. – № 3. – P. 800.
7. Lan X. et al. Developing Al-Fe-Si alloys with high thermal stability through tuning Fe, Si contents and cooling rates // *Intermetallics*. – 2022. – V. 144. – P. 107505.
8. Wang M. et al. Characterization of Refining the Morphology of Al-Fe-Si in A380 Aluminum Alloy due to Ca Addition // *Processes*. – 2022. – V. 10. – № 4. – P. 672. <https://doi.org/10.3390/pr10040672>.
9. Liu W. et al. Microstructure evolution and mechanical properties of Al-8wt.% Si semi-solid billet fabricated by powder metallurgy liquid phase reaction sintering // *Materials Science and Engineering: A*. – 2021. – V. 802. – P. 140656.
10. Gumen O., Selina I., Kruzhkova M. A study of the properties and development in technology for obtaining multi-component systems of particle reinforced aluminum and titanium alloys // *Construction of Optimized Energy Potential Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*. – 2022. – V. 11. – № 1. – P. 17-21.
11. Andreyachshenko V.A. Evolution of the AA2030 alloy microstructure in the ECAP process // *Kovove Mater*. – 2022. – 60. – P. 1-9. DOI 10.31577/km.2022.2.79
12. Andreyachshenko V.A. Evolution of Al-Si-Mn-Fe aluminum alloy microstructure in the equal-channel angular pressing with back pressure // *Materials Letters*. – 2019. – 254. – P. 433-435. doi.org/10.1016/j.matlet.2019.07.127
13. Andreyachshenko V.A., Isheva Y., Mazhit A., Imangazinova D. ECAP-treated aluminium alloy AA2030: microstructure and mechanical properties // *Materials and Technology*. – 2019. – 53. – 6. – P. 805-810. DOI 10.17222/mit.2018.250
14. Sun C. et al. Modification of Iron-Rich Phase in Al-7Si-3Fe Alloy by Mechanical Vibration during Solidification // *Materials*. – 2023. – V. 16. – № 5. – P. 1963.

Дополнительный список литературы

15. Горбачева В.И. и др. Исследование влияния содержания железа на образование железосодержащих фаз в литейных алюминиевых сплавах // *Литьё и металлургия*. – 2013. – № 4 (73). – С. 74-81.
16. 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*. – 2014. – Vol. 6. – No. 3. – P. 03007-1-03007-3.
17. The formation of (Al₈Fe₂Si, Al₁₃Fe₄) phases from Al-Fe-Si system by TE mode A. Boulouma, A. Drici, A. Benaldjia, M. Guerioune, and D.Vrel // *AIP Conference Proceedings*. – 2015. – 1653. –

020023. doi: 10.1063/1.4914214

18. Горюнов З.Н. Разработка методики определения Mg_2Si α , β - железосодержащих фаз в структуре слитков сплавов 6063/6060 с использованием растровой электронной микроскопии с микрорентгеноспектральным анализом // X Всероссийская конф. «Молодёжь и наука». – 2014.
19. Gupta S.P. Intermetallic compound formation in Fe–Al–Si ternary system // *Materials Characterization*. – 2003. – № 49, part 1. – P. 269–291. 208
20. Gupta S.P. Intermetallic compound formation in Fe–Al–Si ternary system // *Materials Characterization*. – 2003. – №49, part 2. – P. 293-311.

References

1. Tokarewicz M., Grądzka-Dahlke M. Review of recent research on AlCoCrFeNi high-entropy alloy // *Metals*. – 2021. – V. 11. – №. 8. – P. 1302. <https://doi.org/10.3390/met11081302>.
2. Ananiadis E. et al. Microstructure and corrosion performance of aluminium matrix composites reinforced with refractory high-entropy alloy particulates // *Applied Sciences*. – 2021. – V. 11. – №. 3. – P. 1300. <https://doi.org/10.3390/app11031300>.
3. Sahin H., Zengin H. Microstructure, mechanical and wear properties of low-density cast medium and high entropy aluminium alloys // *International Journal of Metalcasting*. – 2022. – V. 16. – №. 4. – P. 1976-1984.
4. Luo K. et al. AA1050 metal matrix composites reinforced by high-entropy alloy particles via stir casting and subsequent rolling // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2022. – V. 893. – P. 162370.
5. Ahsan M. R. U. et al. Effects of process parameters on bead shape, microstructure, and mechanical properties in wire+ arc additive manufacturing of Al0.1CoCrFeNi high-entropy alloy // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2021. – V. 68. – P. 1314-1327.
6. Novák P. et al. Effect of nickel and titanium on properties of Fe-Al-Si alloy prepared by mechanical alloying and spark plasma sintering // *Materials*. – 2020. – V. 13. – №. 3. – P. 800.
7. Lan X. et al. Developing Al–Fe–Si alloys with high thermal stability through tuning Fe, Si contents and cooling rates // *Intermetallics*. – 2022. – V. 144. – P. 107505.
8. Wang M. et al. Characterization of Refining the Morphology of Al–Fe–Si in A380 Aluminum Alloy due to Ca Addition // *Processes*. – 2022. – V. 10. – №. 4. – P. 672. <https://doi.org/10.3390/pr10040672>
9. Liu W. et al. Microstructure evolution and mechanical properties of Al-8wt.% Si semi-solid billet fabricated by powder metallurgy liquid phase reaction sintering // *Materials Science and Engineering: A*. – 2021. – V. 802. – P. 140656.
10. Gumen O., Selina I., Kruzhkova M. A study of the properties and development in technology for obtaining multi-component systems of particle reinforced aluminum and titanium alloys // *Construction of Optimized Energy Potential Budownictwo o Zoptymalizowanym Potencjale Energetycznym*. – 2022. – V. 11. – №. 1. – P. 17-21.
11. Andreyachshenko V.A. Evolution of the AA2030 alloy microstructure in the ECAP process // *Kovove Mater.* – 2022. – 60. – P. 1–9. DOI 10.31577/km.2022.2.79.
12. Andreyachshenko V.A. Evolution of Al-Si-Mn-Fe aluminum alloy microstructure in the equal-channel angular pressing with back pressure // *Materials Letters*. – 2019. – 254. – P. 433–435. doi.org/10.1016/j.matlet.2019.07.127.
13. Andreyachshenko V.A., Isheva Y., Mazhit A., Imangazinova D. ECAP-treated aluminium alloy AA2030: microstructure and mechanical properties // *Materials and Technology*. – 2019. – 53. – 6. – P. 805-810. DOI 10.17222/mit.2018.250.
14. Sun C. et al. Modification of Iron-Rich Phase in Al-7Si-3Fe Alloy by Mechanical Vibration during Solidification // *Materials*. – 2023. – V. 16. – №. 5. – P. 1963.

Additional References

15. Gorbacheva V.I. i dr. Issledovanie vliyaniya soderzhaniya zheleza na obrazovanie zhelezosoderzhashchih faz v litejnyh alyuminievyh splavah, Lit'yo i metallurgiya, 2013, №. 4 (73), 74-81.
16. 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*. – 2014. – Vol. 6. – No 3. – P. 03007-1-03007-3.
17. The formation of $(Al_8Fe_2Si, Al_{13}Fe_4)$ phases from Al-Fe-Si system by TE mode A. Boulouma, A. Drici, A. Benaldjia, M. Guerioune, and D.Vrel // *AIP Conference Proceedings*. – 2015. – 1653. – 020023. doi: 10.1063/1.4914214
18. Goryunov Z. N. Razrabotka metodiki opredeleniya Mg_2Si I α , β – zhelezosoderzhashchih faz v strukture slitkov splavov 6063/6060 s ispol'zovaniem rastrovoy elektronnoj mikroskopii s mikro

- rentgenospektral'nym analizom //X Vserossiyskaya konferenciya «Molodyozh' i nauka». – 2014.
19. Gupta S.P. Intermetallic compound formation in Fe–Al–Si ternary system // Materials Characterization. – 2003. – №49, part 1. – P. 269-291. 208
20. Gupta S.P. Intermetallic compound formation in Fe–Al–Si ternary system // Materials Characterization. – 2003. – № 49, part 2. – P. 293-311.
-
-