

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

MATERIALS SCIENCE AND HEAT TREATMENT OF METALS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 549:54.055

DOI: 10.18503/1995-2732-2025-23-1-54-61



ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫХ СПЛАВОВ НА ОСНОВЕ CoCrFeMnNi МЕТОДОМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА

Шуберт А.В., Коновалов С.В., Панченко И.А.

Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия

Аннотация. Постановка задачи (актуальность работы). Высокоэнтропийные сплавы являются перспективными материалами благодаря своим уникальным физико-механическим свойствам, что делает их привлекательными для использования в авиационной, энергетической и других высокотехнологичных отраслях. Однако термические характеристики высокоэнтропийных сплавов, особенно их фазовые превращения и стабильность при высоких температурах, остаются недостаточно изученными. Сплав CoCrFeMnNi, представляющий собой один из наиболее известных высокоэнтропийных сплавов, требует детального исследования его термодинамических свойств для оптимизации применения в промышленности. **Цель работы.** Основной целью исследования является детальное изучение термических свойств сплава CoCrFeMnNi с помощью метода дифференциального термического анализа. **Используемые методы.** Для исследования использован метод дифференциального термического анализа, который позволяет измерять тепловые эффекты, сопровождающие фазовые превращения в сплавах при нагреве и охлаждении. Объектами исследования служили пять образцов сплава с варьирующимся содержанием Fe и Mn. **Новизна.** Исследование термических свойств сплава CoCrFeMnNi с использованием дифференциального термического анализа проводится впервые, что позволяет выявить фазовые изменения и поведение теплового потока для различных концентраций элементов. **Результат.** Были получены данные, описывающие фазовые переходы и структурные изменения при плавлении и кристаллизации сплавов с различными содержаниями Fe и Mn. В ходе анализа установлены характерные температурные и временные параметры этих процессов. **Практическая значимость.** Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации состава высокоэнтропийных сплавов, применяемых в различных отраслях, требующих высокой теплоустойчивости и устойчивости к деформациям, а также для разработки новых материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: высокоэнтропийные сплавы, сплав CoCrFeMnNi, дифференциальный термический анализ, фазовые переходы, термические характеристики, железо, марганец, кобальт, хром, никель

Исследование выполнено за счет средств ФГБОУ ВО «СибГИУ», договор № 165/2024/НиИД от 29 мая 2024 года.

© Шуберт А.В., Коноваов С.В., Панченко И.А., 2025

Для цитирования

Шуберт А.В., Коновалов С.В., Панченко И.А. Исследование термических свойств системы высокоэнтропийных сплавов на основе CoCrFeMnNi методом дифференциального термического анализа // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2025. Т. 23. №1. С. 54-61. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-54-61>



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

STUDY OF THE THERMAL PROPERTIES OF HIGH-ENTROPY ALLOYS SYSTEM BASED ON CoCrFeMnNi BY DIFFERENTIAL THERMAL ANALYSIS

Shubert A.V., Konovalov S.V., Panchenko I.S.

Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia

Abstract. Problem Statement (Relevance). High-entropy alloys are promising materials due to their unique physical and mechanical properties, making them attractive for use in aerospace, energy, and other high-tech industries. However, the thermal characteristics of high-entropy alloys, particularly their phase transformations and stability at high temperatures, remain insufficiently studied. The CoCrFeMnNi alloy, one of the most well-known high-entropy alloys, requires a detailed research of its thermodynamic properties to optimize its industrial applications. **Objectives.** The primary objective of this research is to conduct a detailed study of the thermal properties of the CoCrFeMnNi alloy using differential thermal analysis. **Methods Applied.** The differential thermal analysis method was applied to investigate the thermal effects accompanying phase transformations in the alloys during heating and cooling. The objects of the study were five alloy samples with varying Fe and Mn content. **Originality.** This is the first time that the thermal properties of the CoCrFeMnNi alloy have been studied using differential thermal analysis, allowing for the identification of phase changes and heat flow behavior for different concentrations of elements. **Result.** Data describing phase transitions and structural changes during the melting and crystallization of alloys with varying Fe and Mn content were obtained. The characteristic temperature and time parameters of these processes were established. **Practical Relevance.** The study results can be used to optimize high-entropy alloys compositions for various industries requiring high heat resistance and deformation stability, as well as for the development of new materials with improved performance characteristics.

Keywords: high-entropy alloys, CoCrFeMnNi, differential thermal analysis, phase transitions, thermal characteristics, iron, manganese, cobalt, chromium, nickel

The study was carried out at the expense of the SibSIU Federal State Budgetary Educational Institution, contract No. 165/2024/NiIDot 29 May 2024.

For citation

Shubert A.V., Konovalov S.V., Panchenko I.S. Study of the Thermal Properties of High-Entropy Alloys System Based on Cocrfemni by Differential Thermal Analysis. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2025, vol. 23, no. 1, pp. 54-61. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2025-23-1-54-61>

Введение

Высокоэнтропийные сплавы (ВЭС), обладающие необходимыми физико-механическими и эксплуатационными характеристиками, представляют собой материалы, состоящие из пяти и более элементов в равных или близких концентрациях [1, 2]. Оценка потенциальных химических составов ВЭС является сложной задачей, так как каждая комбинация элементов формирует уникальные свойства и структуры, что приводит к огромному числу возможных составов. Увеличение числа элементов также повышает взаимную растворимость, облегчая образование однофазных твердых растворов [3].

Одним из наиболее изученных сплавов является CoCrFeNiMn, или сплав Кантора [4, 5]. Он привлекает внимание благодаря выдающейся пластичности при высоких и криогенных температурах, что делает его перспективным для отраслей, требующих высокой стойкости к деформациям [6].

Исследование высокоэнтропийных сплавов требует применения различных аналитических методов для оценки их термических и структурных свойств. Одним

из таких методов является дифференциальный термический анализ (ДТА), который позволяет изучить изменения теплового потока в материалах при нагреве или охлаждении [7]. ДТА — метод, изучающий физические и химические процессы, связанные с тепловыми эффектами. Суть метода заключается в измерении разности температур между исследуемым и эталонным образцами при их одновременном нагреве или охлаждении. Эталонном служит инертное вещество с похожими теплофизическими свойствами, которое не претерпевает изменений в заданном диапазоне температур. Разница температур обусловлена эндо- или экзотермическими реакциями в исследуемом образце [8].

Метод дифференциального термического анализа обладает рядом достоинств, которые делают его незаменимым в изучении термических процессов и фазовых переходов в различных материалах. Он позволяет точно фиксировать тепловые эффекты, такие как эндо- и экзотермические реакции, что даёт возможность оценить теплостойкость сплавов, а также изучить их структурные изменения при нагреве. Например, ДТА успешно применён для анализа спечённых твёрдых сплавов, что позволило выявить высокую теплостойкость и прогно-

зировать хорошие эксплуатационные свойства этих материалов [9].

Кроме того, метод эффективен при исследовании органических соединений, где он помогает определить пределы термоустойчивости, фазовые переходы и деструктивные процессы. Это подтверждают результаты, полученные при анализе алкилстирилкетонов и азометиновых соединений, где ДТА позволил выявить их плавление и окисление, а также рассчитать тепловые эффекты [10]. Технологические и научные применения метода включают не только металлы и органические соединения, но и процессы дегидратации в цементах, где он демонстрирует изменения в структурах при термической обработке [11].

Цель данного исследования – детальное изучение термических свойств сплава CoCrFeMnNi с помощью ДТА. Этот сплав, известный как сплав Кантора, был выбран из-за его высокой пластичности, устойчивости к деформациям и износу.

Данный сплав был выбран для исследования в силу его длительного изучения в научной базе Сибирского государственного индустриального университета, где активно исследуются его механические свойства, стабильность, микроструктура и фазовый состав [12, 13]. Однако термические свойства сплава остаются недостаточно изученными, что и обосновывает наш выбор. В других научных учреждениях, таких как Институт структурной макрокинетики РАН, проводились исследования термической стабильности сплава Кантора (CoCrFeNiMn) при длительном отжиге, выявившие изменения фазового состава [14]. В Институте физики прочности и материаловедения СО РАН исследовали структуру и механические свойства сплава FeCrMnNiCo_{0.85}Co_{0.15} после термомеханической обработки [15].

Тем не менее метод дифференциального термического анализа для данного сплава ранее не применялся, что делает наше исследование актуальным и полезным для дальнейшего понимания его термодинамических характеристик. Исследование выполнено за счет средств ФГБОУ ВО «СибГИУ», договор № 165/2024/НийД от 29 мая 2024 года.

Материалы и методы исследования

Для проведения ДТА высокоэнтропийных сплавов системы CoCrFeMnNi была использована следующая методика эксперимента.

Исследование проводилось на пяти ранее полученных образцах сплава, изготовленных методом литья. В этих образцах варьировалось процентное содержание железа (Fe) и марганца (Mn) в пределах от 5 до 30%, при этом хром (Cr), кобальт (Co) и никель (Ni) присутствовали в неизменных долях — по 20% каждого. Образцы, обрезанные до размеров приблизительно 5×2×2 мм, были подготовлены в Научно-производственном центре «Сварочные процессы и технологии» в СибГИУ и использовались для последующего анализа.

Эксперимент проводился в Центре коллективного пользования «Материаловедение» на базе СибГИУ. Для

анализа использовался прибор Setaram LabSys, предназначенный для синхронного термического анализа, который позволяет одновременно измерять температуру и тепловой поток. Нагрев осуществлялся с контролируемой скоростью 20°C в минуту, при этом максимальная температура достигала 1550°C.

Данный дифференциальный термический анализ сплава был проведен в среде аргона, поскольку данная инертная атмосфера обеспечивает защиту образца от окислительных процессов, которые могут существенно исказить результаты исследования. Аргон, как инертный газ, не вступает в химические реакции с компонентами сплава, что позволяет получить более точные данные.

Полученные данные были проанализированы на предмет фазовых переходов, включая плавление и кристаллизацию. Несмотря на нечеткость некоторых результатов, все наблюдения были документированы для дальнейшего обсуждения и анализа.

Полученные результаты и их обсуждение

На приведенных графиках (рис. 1–5) представлены результаты дифференциального термического анализа, позволяющие исследовать термическое поведение образца. Графики содержат несколько шкал: температура образца, выраженная в градусах Цельсия (°C), демонстрирует изменение температуры во время анализа; ТГ-кривая показывает потерю массы образца в миллиграммах (мг) в зависимости от температуры. Шкала теплового потока, выраженная в микровольтах (мкВ), отображает тепловые эффекты, такие как эндо- или экзотермические реакции. Наконец, шкала времени, выраженная в минутах, показывает продолжительность эксперимента, позволяя наблюдать временные интервалы возникновения тех или иных реакций.

Дифференциальный анализ сплава 20Co20Cr25Fe10Mn20Ni (см. рис. 1) показывает следующие этапы. При нагреве от 27,21 до 139,09°C график теплового потока плавно снижается, указывая на поглощение тепла. На 7,72 минуте при 139,09°C наблюдается небольшое повышение теплового потока, что может свидетельствовать о начальных фазовых изменениях. На 75 минуте при 1382°C сплав достигает самой низкой точки на графике, завершая процесс плавления. Резкий подъем до 1508°C на 83 минуте связан с дальнейшей гомогенизацией компонентов. На 91 минуте при 1350°C происходит резкий спад, вероятно вызванный структурными изменениями в расплаве. К 156 минуте при 124°C сплав начинает остывать, переходя в твердое состояние. Температурные скачки и плавные изменения связаны с фазовыми превращениями и рекристаллизацией внутри сплава.

Дифференциальный анализ сплава 20Co20Cr30Fe10Mn20Ni (см. рис. 2) показывает характерные тепловые процессы при нагреве. Начиная с комнатной температуры (24°C), график теплового потока показывает резкий подъем на 64 минуте при 1234°C, что указывает на начало частичного плавления. Сразу после этого происходит спад, указывающий на завершение этого фазового перехода. На 72 минуте при 1347°C гра-

фик достигает самой низкой точки, что свидетельствует о полном плавлении сплава. Затем на 73 минуте при 1365°C график вновь поднимается, вероятно из-за гомогенизации расплава. Колебания теплового потока до 96 минуты и резкий подъем могут быть связаны с микроизменениями структуры. Окончательное охлаждение и затвердевание происходит к 147 минуте при 150°C. Эти изменения отражают фазовые переходы и структурные перестройки в ходе нагрева и плавления сплава.

Дифференциальный анализ сплава 20Co20Cr15Fe25Mn20Ni (см. рис. 3) показывает следующие этапы: с начальной температуры 30°C график

плавно снижается, отражая обычное поглощение тепла. На 62 минуте при 1200–1207°C наблюдается резкий скачок, что может указывать на частичное плавление или перестройку структуры. Затем на 67 минуте при 1278°C сплав достигает минимальной точки, свидетельствуя о завершении плавления. Подъем на 69 минуте до 1300°C может быть связан с перераспределением элементов, а на 86 минуте график снова снижается до 1551°C, за чем следует подъем до 1306°C на 97 минуте, отражающий дальнейшие изменения в структуре. Окончание эксперимента фиксируется на 147 минуте при 148°C, указывая на охлаждение и затвердевание сплава.

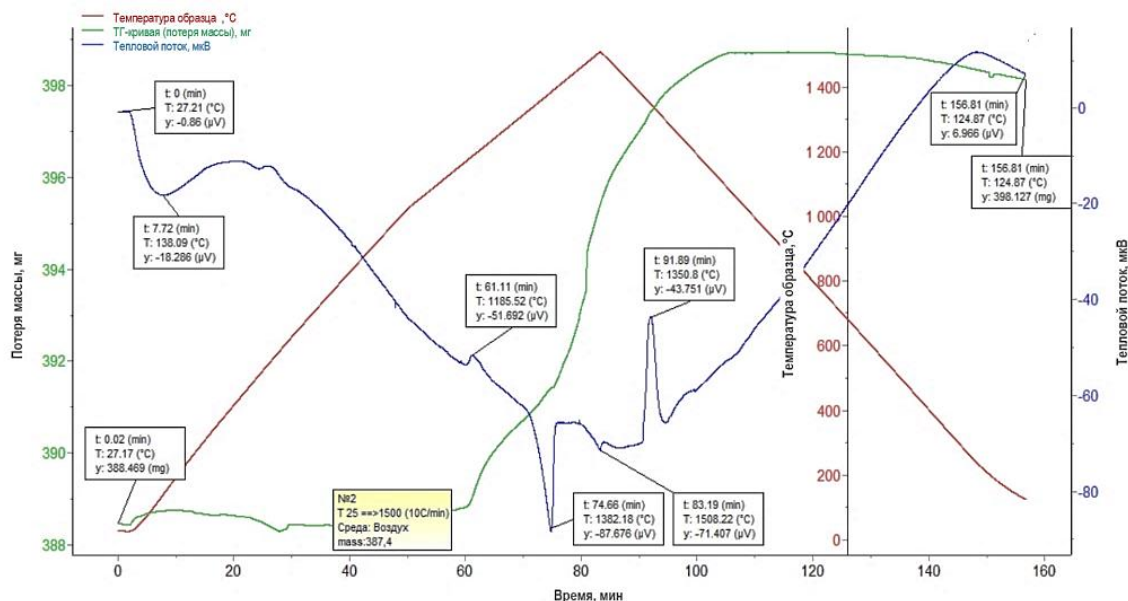


Рис. 1. Результаты дифференциального термического анализа сплава 20Co20Cr25Fe10Mn20Ni
Fig. 1. Results of differential thermal analysis of alloy 20Co20Cr25Fe10Mn20Ni

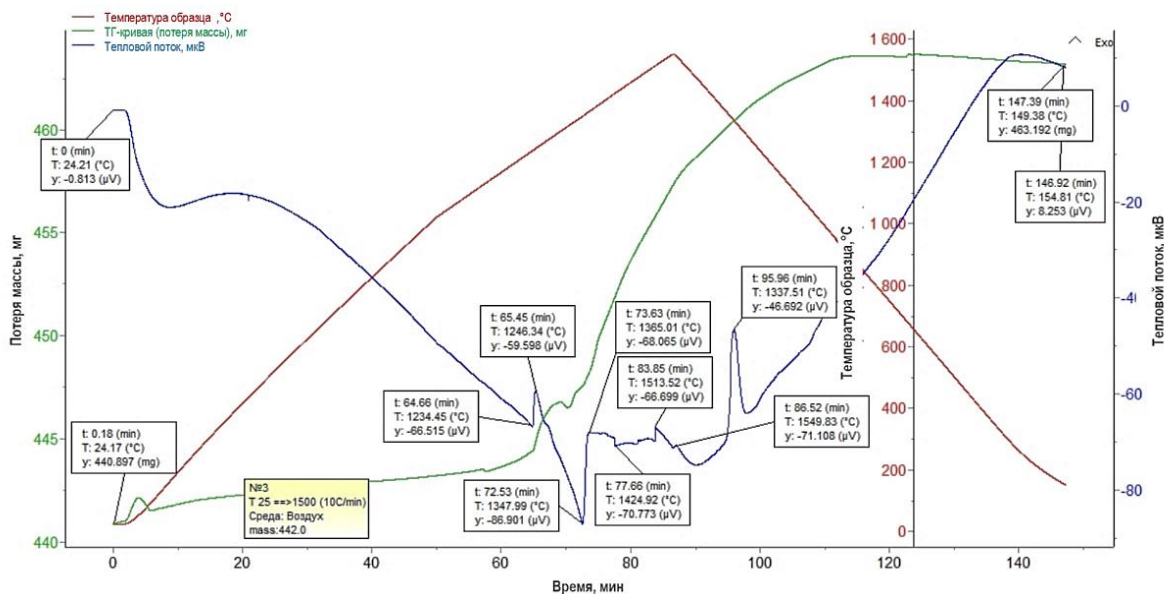


Рис. 2. Результаты дифференциального термического анализа сплава 20Co20Cr30Fe10Mn20Ni
Fig. 2. Results of differential thermal analysis of alloy 20Co20Cr30Fe10Mn20Ni

Дифференциальный анализ сплава 20Co20Cr10Fe30Mn20Ni (см. рис. 4) показал, что с начальной температуры 22°C график плавно снижается, отражая поглощение тепла. На 63 минуте наблюдается скачок, связанный с перераспределением элементов, а на 65 минуте при 1249°C начинается процесс плавления. Резкий подъем на 67 минуте при 1270°C указывает на активные фазовые превращения. На 86 минуте при 1553°C завершилось основное плавление сплава. Далее на 99 минуте при 1262°C произошло резкое падение, возможно из-за испарения компонентов, а к 147 минуте при 150°C началось охлаждение и затвердевание сплава.

Дифференциальный анализ сплава 20Co20Cr5Fe35Mn20Ni (см. рис. 5) показал, что с начальной температуры 23°C тепловой поток плавно снижался, отражая поглощение тепла. На 7 минуте наблюдался небольшой скачок, вероятно связанный с незначительными перестройками в сплаве. На 62 минуте при 1197°C начался резкий подъем теплового потока, достигший пика на 63 минуте при 1214°C, что свидетельствует о фазовом переходе и частичном плавлении. Плавное снижение до 1467°C на 80 минуте указывает на более равномерное плавление. Подъем на 98 минуте при 1283°C свидетельствует о дальнейшей гомогенизации расплава, после чего к 147 минуте (150°C) началось его охлаждение и затвердевание.

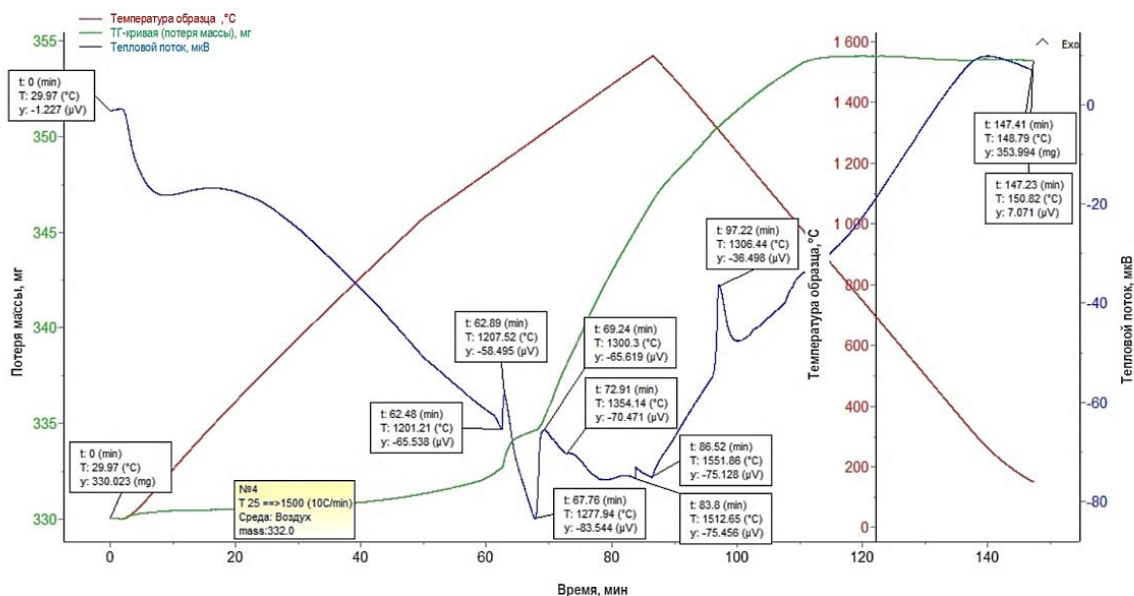


Рис. 3. Результаты дифференциального термического анализа сплава 20Co20Cr15Fe25Mn20Ni
Fig. 3. Results of differential thermal analysis of alloy 20Co20Cr15Fe25Mn20Ni

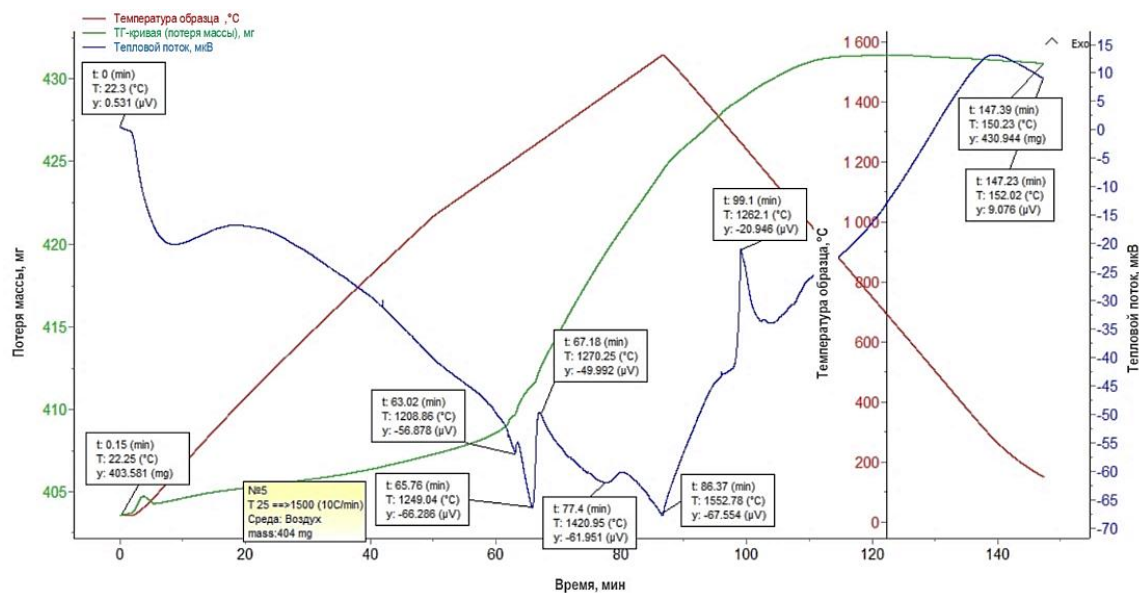


Рис. 4. Результаты дифференциального термического анализа сплава 20Co20Cr10Fe30Mn20Ni
Fig. 4. Results of differential thermal analysis of alloy 20Co20Cr10Fe30Mn20Ni

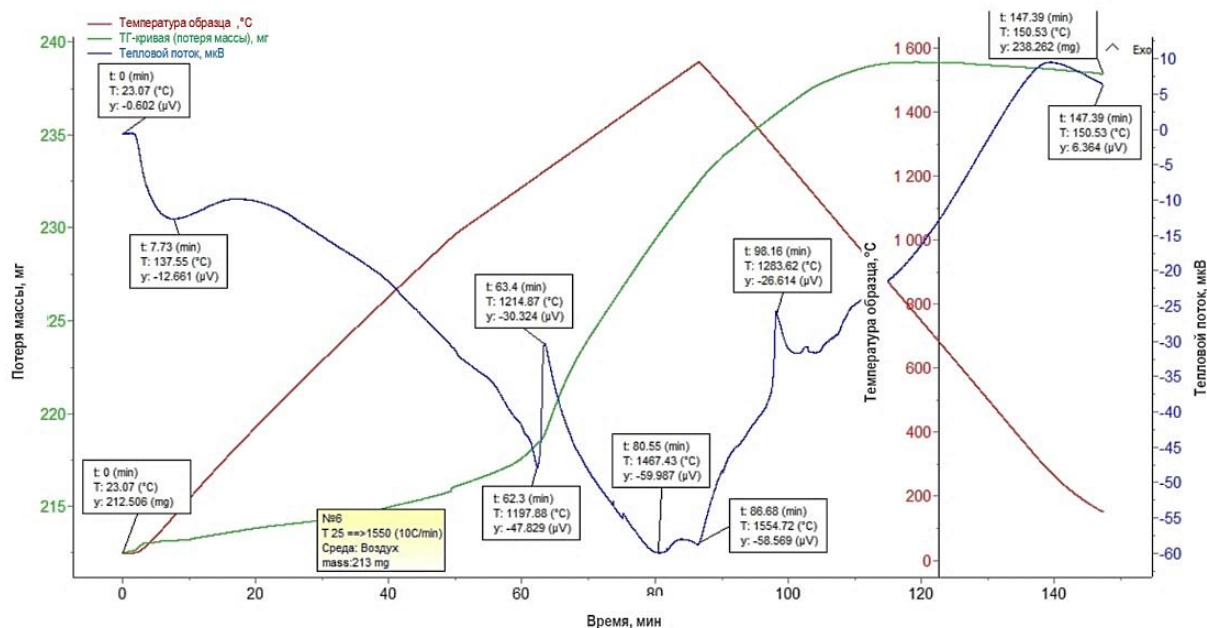


Рис. 5. Результаты дифференциального термического анализа сплава 20Co20Cr5Fe35Mn20Ni
 Fig. 5. Results of differential thermal analysis of alloy 20Co20Cr5Fe35Mn20Ni

В ходе дифференциального анализа было установлено, что основные различия заключаются в поведении теплового потока для разных составов сплавов при изменении температуры и времени нагрева. Это указывает на вариативность процессов плавления, фазовых преобразований и перераспределения элементов в сплавах с различным содержанием Fe и Mn. Например, изменения в температуре начала плавления, скорость фазовых переходов, а также характер и продолжительность гомогенизации различались для каждого состава, что подтверждает влияние состава сплава на его термическое поведение и структуру.

Резкие скачки теплового потока могут указывать на изменения в микроструктуре или фазовом составе сплавов. Каждая система демонстрировала специфические температурные интервалы, при которых наблюдались фазовые превращения и изменение тепловых характеристик. Наглядное сравнение свойств исследуемых образцов с различным содержанием Fe и Mn представлены в **таблице**.

Заключение

Для всех исследованных сплавов наблюдаются резкие температурные скачки, свидетельствующие о сложных фазовых изменениях и перераспределении элементов. Сплавы с более высоким содержанием Fe демонстрируют более значительные температурные колебания. В образцах с высоким содержанием Fe минимальные температуры фиксируются на более ранних этапах (63–65 минутах), что может указывать на их плавление при более низких температурах. Это подтверждается данными дифференциального анализа, где температура плавления всех образцов оказалась ниже температур плавления чистого железа (1537°C) и марганца (1246°C). Например, в сплаве с 25% Fe и 10% Mn процесс плавления завершился при 1382°C, что ниже температуры плавления железа, а в сплавах с 15-35% Fe плавление начиналось при 1200–1249°C, что приближено к температуре плавления марганца.

Таблица. Сравнительный анализ термических характеристик образцов CoCrFeMnNi
 Table. Comparative analysis of the mechanical characteristics of CoCrFeMnNi samples

Образец	Начальная температура, °C	Первая минимальная точка, °C	Время, мин	Первая максимальная точка, °C	Время, мин	Вторая минимальная точка, °C	Время, мин	Финальная точка, °C	Время, мин
20Co20Cr25Fe15Mn20Ni	30	1278	67	1300	69	1551	86	148	147
20Co20Cr30Fe10Mn20Ni	27,21	1382	75	1508	83	1350	91	124	156
20Co20Cr15Fe25Mn20Ni	30	1278	67	1300	69	1551	86	148	147
20Co20Cr10Fe30Mn20Ni	22	1249	65	1270	67	1467	80	150	147
20Co20Cr5Fe35Mn20Ni	23	1197	62	1214	63	1467	80	150	147

Финальные точки для всех сплавов остаются относительно близкими, что свидетельствует о сходных процессах охлаждения после завершения фазовых переходов. Зависимость температурного поведения сплавов от их химического состава показывает, что изменения в содержании элементов, таких как Fe, Mn, Cr, Co и Ni, значительно влияют на температурные характеристики сплавов, включая фазовые переходы, тепловой поток и распределение энергии при нагревании. Сплавы с высоким содержанием Fe демонстрируют более ранние минимальные температуры и стабильные фазовые изменения. Увеличение доли Mn приводит к большему числу фазовых переходов при высоких температурах и более сложному температурному поведению. Таким образом, температурное поведение сплавов находится в прямой зависимости от процентного содержания каждого элемента. Сплавы с повышенным содержанием железа и марганца демонстрируют более сложные и ранние фазовые изменения, тогда как хром, кобальт и никель обеспечивают более стабильное поведение при высоких температурах.

Список источников

1. Yeh J.-W. Alloy Design Strategies and Future Trends in High-Entropy Alloys // *JOM*. 65 545 (2013), pp. 1759–1771. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0761-6>.
2. George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. Highentropy alloys // *Nat. Rev. Mater.* 2019, no. 4, pp. 515–534. <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0121-4>. 551.
3. Рогачев А.С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтропийных сплавов // *Физика металлов и материаловедение*. 2020. Т. 121, № 8. С. 807-841. DOI: 10.31857/S0015323020080094. EDN REFBUL.
4. Cantor B. Multicomponent high-entropy Cantor alloys // *Progress in Materials Science*. 2021, vol. 120, pp. 1–36. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.100754.
5. Nanomechanical behavior of CoCrFeMnNi high-entropy alloy / S. Mridha, S. Das, S. Aouadi, S. Mukherjee, R.S. Mishra // *JOM Journal of the Minerals Metals and Materials Society*. 2015, vol. 67, iss. 10, pp. 2296–2302. DOI: 10.1007/s11837-015-1566-6.
6. Zaddach A.J., Scattergood R.O., Koch C.C. Tensile properties of low-stacking fault energy highentropy alloys // *Materials Science and Engineering*. 2015, vol. 636, pp. 373–378. DOI: 10.1016/j.msea.2015.03.109.
7. Мощенский Ю.В. Метод моделей в дифференциальном термическом анализе // *Вестник Самарского государственного технического ун-та. Серия: Физико-математические науки*. 2001. №12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-modeley-v-differentsialnom-termicheskom-analize>
8. Егунов В.П. Введение в термический анализ. Самара: ПО «СамВен», 1996. 270 с. EDN TOPBCX.
9. Яняк С.В., Комиссарова И.И. Исследование теплоустойчивости твердых сплавов методом дифференциального термического анализа // *Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки*. 2021. № 1(11). С. 27-31. EDN KTAEDN.
10. Куликов М.А. Исследование свойств замещенных алкилстирилкетоннов и их азометиновых производных методом дифференциального термического анализа // *Вестник Технологического университета*. 2019. Т. 22, № 12. С. 12-14. EDN QVPFLP.
11. Исследование гидросиликатов цемента, модифицированных изомерными дисахаридами методом дифференциального термического анализа / Е.А. Шошин, Ю.Г. Ивашенко, А.В. Поляков, В.М. Буланов // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2017. № 1(39). С. 244-249. EDN YIOAZX.
12. Дробышев В.К., Панченко И.А., Коновалов С.В. Механические свойства и микроструктура сплавов системы CoCrFeMnNi // *Ползуновский вестник*. 2024. № 2. С. 249-254. DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.033. EDN OLJRHK.
13. Первопринципное исследование стабильности высокоэнтропийных сплавов CoCrFe40-xMnxNi (x = 5, 10, 15, 20) / К. А. Осинцев, В. С. Панова, В. А. Кузнецова [и др.] // *Фундаментальные проблемы современного материаловедения*. 2023. Т. 20, № 4. С. 508-514. DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.010. EDN JINQGC.
14. Эволюция фазового состава сплава кантора CoCrFeNiMn при длительном отжиге / Д.Ю. Ковалев, А.С. Рогачев, Н.А. Кочетов, С.Г. Вадченко // *Физика металлов и материаловедение*. 2022. Т. 123, № 11. С. 1232-1241. DOI: 10.31857/S0015323022600794. EDN ZTWBJS.
15. Влияние термической и термомеханической обработки на микроструктуру и механические свойства многокомпонентного сплава FeCrMnNiCo0.85C0.15 / Е.В. Мельников, С.В. Астафуров, К.А. Реунова [и др.] // *Письма о материалах*. 2021. Т. 11, № 4(44). С. 375-381. DOI: 10.22226/2410-3535-2021-4-375-381. EDN CQVBDH.

References

1. Yeh J.-W. Alloy Design Strategies and Future Trends in High-Entropy Alloys. *JOM*. 65 545 2013:1759-1771. <https://doi.org/10.1007/s11837-013-0761-6>.
2. George E.P., Raabe D., Ritchie R.O. High-entropy alloys. *Nat. Rev. Mater.* 2019;(4):515-534. <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0121-4>.
3. Rogachev A.S. Structure, stability, and properties of high-entropy alloys. *Fizika metallov i metallovedenie [Physics of Metals and Metallography]*, 2020;121(8):807-841. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0015323020080094. EDN REFBUL.
4. Cantor B. Multicomponent high-entropy Cantor alloys. *Progress in Materials Science*. 2021;120:1-36. DOI: 10.1016/j.pmatsci.2020.100754.
5. Mridha S., Das S., Aouadi S., Mukherjee S., Mishra R.S. Nanomechanical behavior of CoCrFeMnNi high-entropy alloy. *JOM Journal of the Minerals Metals and Materials Society*. 2015;67(10):2296-2302. DOI: 10.1007/s11837-015-1566-6.
6. Zaddach A.J., Scattergood R.O., Koch C.C. Tensile properties of low-stacking fault energy high-entropy al-

- loys. Science and Engineering: A. 2015;636:373-378. DOI: 10.1016/j.msea.2015.03.109.
7. Moshchensky Y.V. Method of models in differential thermal analysis. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo un-ta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki* [Bulletin of Samara State Technical University. Series: Physical and Mathematical Sciences], 2001;(12). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-modeley-v-differentsialnom-termicheskom-analize>. (In Russ.)
 8. Egunov V.P. *Vvedenie v termicheskiy analiz* [Introduction to thermal analysis]. Samara: SamVen, 1996, 270 p. (In Russ.) EDN TOPBCX.
 9. Yanyak S.V., Komissarova I.I. Study of heat resistance of solid alloys by the method of differential thermal analysis. *Vestnik Vologodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Bulletin of Vologda State University. Series: Technical Sciences], 2021;(1(11)):27-31. (In Russ.) EDN KTAEDN.
 10. Kulikov M.A. Study of properties of substituted alkylstyryl ketones and their azomethine derivatives by the method of differential thermal analysis. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Technological University], 2019;22(12):12-14. (In Russ.) EDN QVPFLP.
 11. Shoshin E.A., Ivashchenko Y.G., Polyakov A.V., Bulanov V.M. Study of cement hydrosilicates modified by isomeric disaccharides using the method of differential thermal analysis. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta* [News of the Kazan State University of Architecture and Engineering], 2017;(1(39)):244-249. (In Russ.) EDN YIOAZX.
 12. Drobyshev V.K., Panchenko I.A., Kononov S.V. Mechanical properties and microstructure of CoCrFeMnNi alloy system. *Polzunovskiy vestnik* [Polzunov Bulletin], 2024;(2):249-254. (In Russ.) DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.033. EDN OLRJHK.
 13. Osintsev K.A., Panova V.S., Kuznetsova V.A., et al. First-line study of the stability of CoCrFe40-xMnxNi (x = 5, 10, 15, 20) high-entropy alloys. *Fundamentalnye problemy sovremennogo materialovedeniya* [Basic Problems of Material Science], 2023;20(4):508-514. (In Russ.) DOI: 10.25712/ASTU.1811-1416.2023.04.010.
 14. Kovalev D.Y., Rogachev A.S., Kochetov N.A., Vadchenko S.G. Evolution of the phase composition of Cantor alloy CoCrFeNiMn during prolonged annealing. *Fizika metallov i metallovedenie* [Physics of Metals and Metallography], 2022;123(11):1232-1241. (In Russ.) DOI: 10.31857/S0015323022600794. EDN ZTWBJS.
 15. Melnikov E.V., Astafurov S.V., Reunova K.A., et al. Effect of thermal and thermomechanical treatment on the microstructure and mechanical properties of multicomponent FeCrMnNiCo0.85Cu0.15 alloy. *Pisma o materialah* [Letters on Materials], 2021;11(4(44)):375-381. (In Russ.) DOI: 10.22226/2410-3535-2021-4-375-381. EDN CQVBDH.

Поступила 28.10.2024; принята к публикации 11.11.2024; опубликована 28.03.2025
Submitted 28/10/2024; revised 11/11/2024; published 28/03/2025

Шуберт Анна Владиславовна – аспирант кафедры обработки металлов давлением и материаловедения
ЕВРАЗ ЗСМК, Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: shubert-anna@mail.ru. ORCID 0000-0001-7355-2955

Коновалов Сергей Валерьевич – доктор технических наук, профессор,
проректор по научной и инновационной деятельности,
Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: kononov@sibsiu.ru. ORCID 0000-0003-4809-8660

Панченко Ирина Алексеевна – кандидат технических наук,
заведующий научной лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений,
Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк, Россия.
Email: i.r.i.ss@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1631-9644

Anna V. Shubert – Postgraduate Student at the Department of Metal Forming and Materials Science,
EVRAZ ZSMK, Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: shubert-anna@mail.ru. ORCID 0000-0001-7355-2955

Sergey V. Kononov – DrSc (Eng.), Professor, Vice-Rector for Scientific and Innovative Activities,
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: kononov@sibsiu.ru. ORCID 0000-0003-4809-8660

Irina A. Panchenko – PhD (Eng.), Head of the Scientific Laboratory of Electron Microscopy
and Image Processing,
Siberian State Industrial University, Novokuznetsk, Russia.
Email: i.r.i.ss@yandex.ru. ORCID 0000-0002-1631-9644