

Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22. № 3. С. 359-367

Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedenia (Basic Problems of Material Science (BPMS)). 2025; 3(22): 359-367

Научная статья

2.6.1. Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов (технические науки)

УДК 621.791.92

doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.011

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

Анна Владиславовна Шуберт<sup>1</sup>, Сергей Валерьевич Коновалов<sup>2</sup>,  
Ирина Алексеевна Панченко<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Сибирский государственный индустриальный университет, ул. Кирова, 42, г. Новокузнецк, 654007, Россия

<sup>1</sup> shubert-anna@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7355-2955>

<sup>2</sup> konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

<sup>3</sup> i.r.i.ss@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1631-9644>

**Аннотация.** В данной работе исследованы термические свойства высокоэнтروпийного сплава системы CoCrFeMnNi методом дифференциального термического анализа (ДТА). Основной целью исследования является изучение фазовых переходов и поведения теплового потока в сплавах с различным содержанием железа (Fe) и марганца (Mn). Выбор сплава CoCrFeMnNi, известного как сплав Кантора, обусловлен его уникальной пластичностью при экстремальных температурах, что делает его перспективным для применения в тяжело нагруженных системах. Методология исследования заключалась в проведении ДТА на пяти образцах сплава с варьируемым содержанием Fe и Mn, нагретых в среде аргона до 1550 °C. В ходе эксперимента были зарегистрированы тепловые эффекты, свидетельствующие о плавлении, фазовых переходах и гомогенизации компонентов. Полученные результаты показывают, что изменение процентного содержания Fe и Mn оказывает значительное влияние на температурные характеристики и фазовые превращения сплавов. Эти данные могут быть полезны при разработке новых материалов для экстремальных условий эксплуатации, таких как аэрокосмическая и энергетическая отрасли. Выводы исследования подтверждают зависимость фазовых переходов от химического состава сплава.

**Ключевые слова:** Высокоэнтропийные сплавы, CoCrFeMnNi, дифференциальный термический анализ, фазовые переходы, термические характеристики, железо, марганец, кобальт, хром, никель.

**Благодарности:** Исследование выполнено за счет средств ФГБОУ ВО «СибГИУ», договор № 165/2024/НИИДот «29» мая 2024 г.

---

**Для цитирования:** Шуберт А.В., Коновалов С.В., Панченко И.С., Исследование термических свойств системы высокоэнтропийных сплавов на основе COCRFEMNNI методом дифференциального термического анализа // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2025. Т. 22, № 3. С. 359-367. doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.011.

---

Original article

## INVESTIGATION OF THE THERMAL PROPERTIES OF A SYSTEM OF HIGH-ENTROPY ALLOYS BASED ON COCRFEMNNI BY DIFFERENTIAL THERMAL ANALYSIS

Anna V. Shubert <sup>1</sup>, Sergey V. Konovalov <sup>2</sup> Irina S. Panchenko

<sup>1,2</sup> Siberian State Industrial University, st. Kirova, 42, 654006, Novokuznetsk, Russia

<sup>1</sup> shubert-anna@mail.ru, <http://orcid.org/0000-0001-7355-2955>

<sup>2</sup> konovalov@sibsiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4809-8660>

<sup>3</sup> i.r.i.ss@yandex.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1631-9644>

**Abstract.** The study focuses on the thermal properties of the high-entropy alloy CoCrFeMnNi, which is known for its exceptional plasticity at extreme temperatures and resistance to deformation and wear. The research justifies the choice of this alloy due to its long history of investigation, yet its thermal properties remain insufficiently explored. The subject of the study is the CoCrFeMnNi alloy system, where the composition of iron (Fe) and manganese (Mn) varies from 5% to 30%, while chromium (Cr), cobalt (Co), and nickel (Ni) remain constant at 20% each. The aim of the study is to analyze the thermal transitions and phase changes in the alloy using differential thermal analysis (DTA), a method that allows the detection of endothermic and exothermic reactions during heating and cooling. The methodology involves heating the samples at a controlled rate of 20°C per minute up to 1550°C in an argon atmosphere to prevent oxidation. The results highlight significant differences in thermal behavior depending on the Fe and Mn content, with variations in melting points, phase transitions, and energy distribution. The conclusions show that the chemical composition significantly impacts the alloy's thermal properties, making the findings relevant for further applications in industries requiring high thermal and structural stability.

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

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

**For citation:** Anna V. Shubert, Sergey V. Konovalov, Irina S. Panchenko (2025). Investigation of the thermal properties of a system of high-entropy alloys based on CoCrFeMnNi by differential thermal analysis. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 22(3), 359-367. (In Russ.). doi: 10.25712/ASTU.1811-1416.2025.03.011.

### Введение

Высокоэнтروпийные 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 выдающей-

ся 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 пре-

терпевает 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 прогнозировать 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 алкилстирилкетонс и азометинсвых 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 цементе, 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 исследо-

вали структуру и механические свойства сплава FeCrMnNiCo<sub>0.85</sub>C<sub>0.15</sub> 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/НИИД от «29» мая 2024 г.

### Методика эксперимента

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 °С в минуту, при этом максимальная температура достигала 1550 градусов Цельсия.

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 наблюдё-

ния были документированы для дальнейшего обсуждения и анализа.

### Экспериментальные результаты

Все записи и результаты эксперимента представлены на английском языке, так как прибор Setaram LabSys используется в международной практике, а интерфейс программного обеспечения и стандарты отчетности в научной сфере зачастую основаны на общепринятых международных обозначениях. Для удобства ниже приводится пояснение всех ключевых терминов и их перевод на русский язык. Ниже представлено объяснение терминов и их перевод:

– Sample Temperature (Температура образца) – ось, отображающая изменения температуры образца в ходе эксперимента.

– TG (Thermogravimetry – Термогравиметрия) – ось, показывающая изменения массы образца в зависимости от температуры.

– Heat Flow (Тепловой поток) – ось, отображающая количество тепла, поглощаемого или выделяемого образцом при разных температурах.

– Time (Время) – ось, отображающая продолжительность эксперимента и изменения тепловых характеристик во времени.

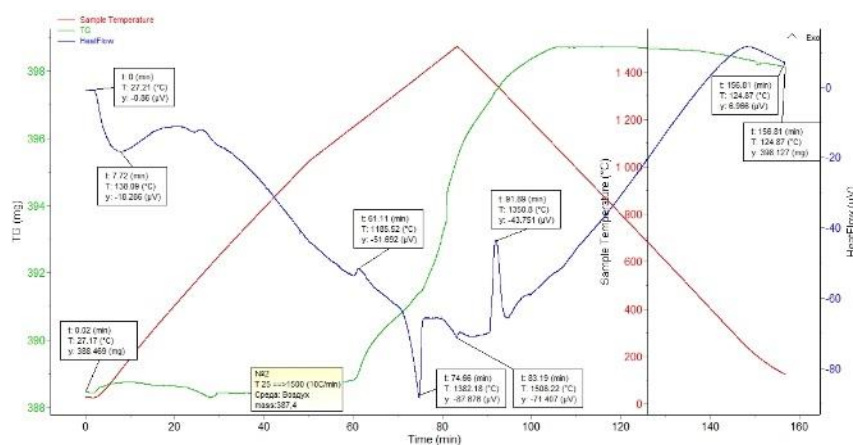


Рис. 1. – результаты дифференциального термического анализа сплава 20Co20Cr25Fe10Mn20Ni

Fig. 1. – results of differential thermal analysis of alloy 20Co20Cr25Fe10Mn20Ni

Дифференциальный анализ сплава 20Co20Cr25Fe10Mn20Ni показывает следующие этапы. При нагреве от 27,21°C 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.

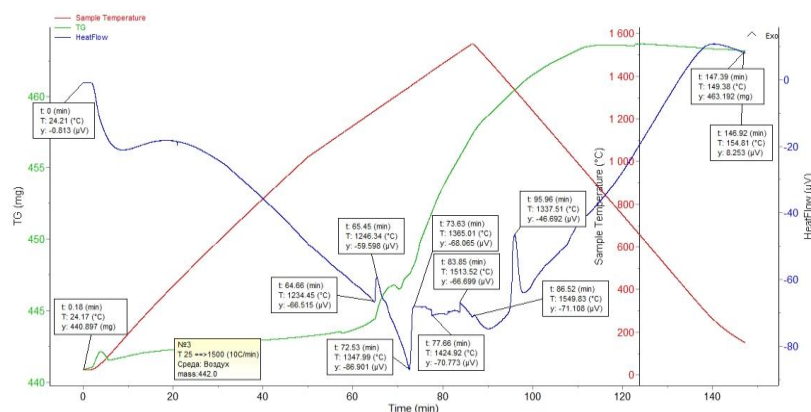


Рис. 2. – результаты дифференциального термического анализа сплава 20Co20Cr30Fe10Mn20Ni

Fig. 2. – results of differential thermal analysis of alloy 20Co20Cr30Fe10Mn20Ni

Дифференциальный анализ сплава 20Co20Cr25Fe15Mn20Ni 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 график 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 минут 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.

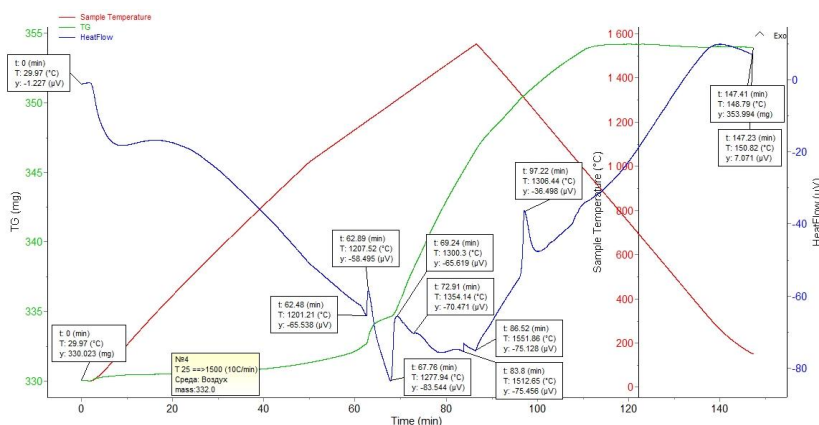


Рис. 3. – результаты дифференциального термического анализа сплава 20Co20Cr15Fe25Mn20Ni

Fig. 3. – results of differential thermal analysis of alloy 20Co20Cr15Fe25Mn20Ni

Дифференциальный анализ сплава 20Co20Cr15Fe25Mn20Ni 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.

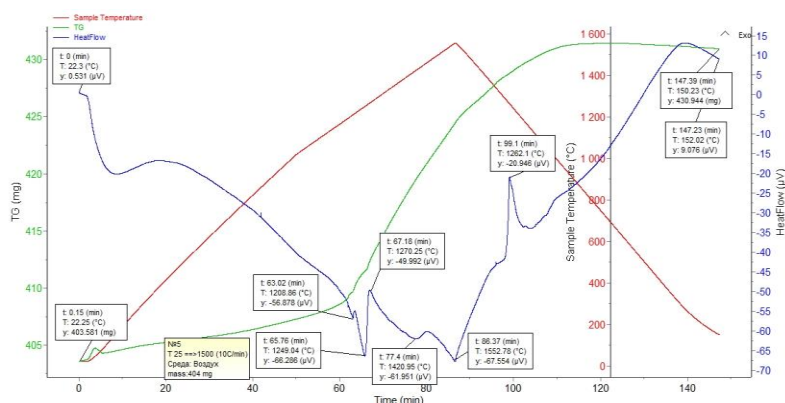


Рис. 4. – результаты дифференциального термического анализа сплава 20Co20Cr10Fe30Mn20Ni

Fig. 4. – results of differential thermal analysis of alloy 20Co20Cr10Fe30Mn20Ni

Дифференциальный анализ сплава 20Co20Cr10Fe30Mn20Ni 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.

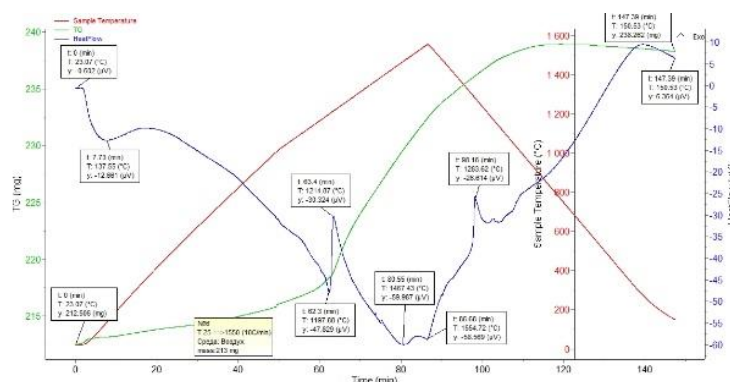


Рис. 5. – результаты дифференциального термического анализа сплава 20Co20Cr5Fe35Mn20Ni

Fig. 5. – results of differential thermal analysis of alloy 20Co20Cr5Fe35Mn20Ni

Дифференциальный анализ сплава 20Co20Cr5Fe35Mn20Ni 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. Подъ-

ем на 98 минуте при 1283°C свидетельствует о дальнейшей гомогенизации расплава, после чего к 147 минуте (150°C) началось его охлаждение и затвердевание.

### Обсуждение результатов

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 вариатив-

ность 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 1.

**Таблица 1.** - Сравнительный анализ термических характеристик образцов CoCrFeMnNi.

**Table 1.** - Comparative analysis of the mechanical characteristics of Fe Mn Ni compounds.

| 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         |

### Выводы

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 минуты), 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.

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 литературы

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. 4 (2019) P. 515–534. <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0121-4>.
3. Рогачев, А. С. Структура, стабильность и свойства высокоэнтروпийных сплавов / А. С. Рогачев // 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. – P. 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. – P. 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: A. – 2015. – Vol. 636. – P. 373–378. – DOI: 10.1016/j.msea.2015.03.109.
7. Мощенский Ю. В. Метод моделей в дифференциальном термическом анализе // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. 2001. №12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-modeley-v-differentsialnom-termicheskom-analize>
8. Егунов, В. П. Введение в термический анализ / В. П. Егунов. – Самара : ПО «Сам-Вен», 1996. – 270 с. – EDN TOPBCX.
9. Яняк, С. В. Исследование теплостойкости твердых сплавов методом дифференциального термического анализа / С. В. Яняк, И. И. Комиссарова // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2021. – № 1(11). – С. 27–31. – EDN KTAEDN.
10. Куликов, М. А. Исследование свойств замещенных алкилстирилкетонс и их азометиновых производных методом дифференциального термического анализа / М. А. Куликов // 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. Иващенко, А. В. Поляков, В. М. Буланов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 1(39). – С. 244–249. – EDN YIOAZX.
12. Дробышев, В. К. Механические свойства и микроструктура сплавов системы CoCrFeMnNi / В. К. Дробышев, И. А. Панченко, С. В. Коновалов // Ползуновский вестник. – 2024. – № 2. – С. 249–254. – DOI 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.033. – EDN OLJRNK.
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.

## Информация об авторах

А.В. Шуберт – аспирант кафедры обработки металлов давлением и материаловедения ЕВРАЗ ЗСМК, СибГИУ.

С.В. Коновалов – доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности СибГИУ.

И.А. Панченко – кандидат технических наук, заведующий научной лабораторией электронной микроскопии и обработки изображений, СибГИУ.

## 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. 4 (2019) P. 515–534. <https://doi.org/10.1038/s41578-019-0121-4>.
3. Rogachev, A.S. Structure, stability, and properties of high-entropy alloys // Physics of



- Metals and Metallography. – 2020. – Vol. 121, No. 8. – P. 807-841. – DOI: 10.31857/S0015323020080094. – EDN REFBUL.
4. Cantor, B. Multicomponent high-entropy Cantor alloys // *Progress in Materials Science*. – 2021. – Vol. 120. – P. 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. – Vol. 67, Iss. 10. – P. 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 alloys // *Materials Science and Engineering: A*. – 2015. – Vol. 636. – P. 373–378. – DOI: 10.1016/j.msea.2015.03.109.
7. Moshchensky, Y.V. Method of models in differential thermal analysis // *Bulletin of Samara State Technical University. Series: Physical and Mathematical Sciences*. – 2001. – No. 12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/metod-modeley-v-differentsialnom-termicheskom-analize>.
8. Egunov, V.P. Introduction to thermal analysis. – Samara: PO "SamVen", 1996. – 270 p. – EDN TOPBCX.
9. Yanyak, S.V., Komissarova, I.I. Investigation of heat resistance of solid alloys by the method of differential thermal analysis // *Bulletin of Vologda State University. Series: Technical Sciences*. – 2021. – No. 1(11). – P. 27-31. – EDN KTAEDN.
10. Kulikov, M.A. Study of properties of substituted alkylstyryl ketones and their azomethine derivatives by the method of differential thermal analysis // *Bulletin of Technological University*. – 2019. – Vol. 22, No. 12. – P. 12-14. – 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 // *Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. – 2017. – No. 1(39). – P. 244-249. – EDN YIOAZX.
12. Drobyshev, V.K., Panchenko, I.A., Konovalov, S.V. Mechanical properties and microstructure of CoCrFeMnNi alloy system // *Polzunov Bulletin*. – 2024. – No. 2. – P. 249-254. – DOI: 10.25712/ASTU.2072-8921.2024.02.033. – EDN OLJRHK.
13. Osintsev, K. A., Panova, V. S., Kuznetsova, V. A., Konovalov, S. V. & Panchenko, I. A. (2023). Firstprinciples study of the stability of CoCrFe40-xMnxNi (x = 5, 10, 15, 20) high-entropy alloys. *Fundamental'nye problemy sovremennogo materialovedeniya (Basic Problems of Material Science (BPMS))*, 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 // *Physics of Metals and Metallography*. – 2022. – Vol. 123, No. 11. – P. 1232-1241. – 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 FeCrMnNi-Co0.85C0.15 alloy // *Letters on Materials*. – 2021. – Vol. 11, No. 4(44). – P. 375-381. – DOI: 10.22226/2410-3535-2021-4-375-381. – EDN CQVBDH.

#### Information about the authors

A.V. Shubert - Postgraduate student at the Department of Metal Forming and Materials Science, EVRAZ ZSMK, Siberian State Industrial University.

S.V. Konovalov - Doctor of Technical Sciences, Professor, and Vice-Rector for Scientific and Innovative Activities, Siberian State Industrial University.

I.A. Panchenko - Candidate of Technical Sciences, Head of the Scientific Laboratory of Electron Microscopy and Image Processing, Siberian State Industrial University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 07.10.2024; одобрена после рецензирования 25.08.2025; принята к публикации 01.09.2025.

The article was received by the editorial board on 07 Oct. 2024; approved after reviewing 25 Aug. 2025; accepted for publication 01 Sep. 2025.