

УДК 538.9
PACS 81.05.uj

Аномалии фазовых переходов при термоциклировании нанокompозита Co-C

Л. В. Спивак, А. В. Сосунов[†]

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь

[†] avsosunov@psu.ru

Методом дифференциальной сканирующей калориметрии исследовано поведение при термоциклировании нанокompозита Co-C, представляющего собой массив наночастиц кобальта размером 3–5 нм, инкапсулированных в графеновую оболочку с 3–5 слоями. Показано, что термодинамические характеристики фазового превращения α -Co $\rightarrow$ β -Co нанокompозита отличаются существенно от аналогичных характеристик в образцах массивного кобальта. В последнем случае эффективная энергия активации фазового перехода в несколько раз выше по своим значениям, чем в нанокобальте, а тепловой эффект превращения на порядки ниже. Обнаружено изменение массы навески образцов вблизи температур реализации тепловых эффектов при переходе α -Co $\rightarrow$ β -Co. Данные эффекты наблюдаются только при взаимодействии образца с воздухом в процессе его выдержки при комнатной температуре. При отсутствии контакта с воздухом термоциклирование нанокompозита Co-C в атмосфере аргона не фиксирует изменения массы и тепловых эффектов превращения. При этом наночастицы Co сохраняют кристаллическую решетку β – фазы в исследованном интервале температур 20–700 °C. Отмеченные выше особенности поведения наночастиц Co следует считать неизвестной ранее спецификой поведения материала с полиморфизмом в наносостоянии.

Ключевые слова: углерод; наночастицы; дифференциальная калориметрия; фазовые превращения; энергия активации; полиморфизм

Поступила в редакцию 10.04.2026; после рецензии 27.05.2026; принята к опубликованию 27.05.2026

Anomalies of phase transitions during thermal cycling of a Co-C nanocomposite

L. V. Spivak, A. V. Sosunov[†]

Perm State University, Perm, Russia

[†] avsosunov@psu.ru

Using differential scanning calorimetry, we have studied the thermal cycling behavior of a Co-C nanocomposite consisting of an array of 3–6 nm cobalt nanoparticles encapsulated in a 3–5-layer graphene shell. The thermodynamic characteristics of the α -Co $\rightarrow$ β -Co phase transformation in the nanocomposite are shown to differ significantly from those in bulk cobalt samples. In the case of bulk cobalt, the effective activation energy of the phase transition is several times higher than that in nanocobalt, while the thermal effect of the transformation is orders of magnitude lower. A change in the mass of the sample was detected near the temperatures at which thermal effects occur during the α -Co $\rightarrow$ β -Co transition. These effects were observed only when the sample interacted with air during exposure to room temperature. In the absence of air exposure, thermal cycling of the Co-C nanocomposite in an argon atmosphere revealed no changes in mass or thermal effects of the transformation. Moreover, Co nanoparticles retained the β -phase crystal lattice throughout the studied temperature range of 20–700 °C. The abovementioned behavioral features of Co nanoparticles should be considered a previously unknown specific behavior of a material with polymorphism in the nanoscale.

Keywords: carbon nanocages; nanoparticles; differential calorimetry; phase transformations; activation energy; polymorphism

Received 10 April 2026; revised 27 May 2026; accepted 27 May 2026

doi: 10.17072/1994-3598-2026-2-75-80

1. Введение

Металл–углеродные нанокompозиты активно привлекают внимание ученых в последние годы и имеют перспективы применения в следующих областях: управляемый магнетизм для биомедицинских задач [1], разделение газов, топливные элементы, очистка воды [2], катализ [3], хранение и передача энергии [4].

Практическое применение новых наноматериалов требует знания о их термостабильности. В работе [5] анализируется термостабильность углеродных материалов в зависимости от их структуры. Показано, что большинство углеродных наноматериалов окисляются в узком диапазоне температур от 485 до 530 °C, а наличие кислородсодержащих дефектов может понижать температуру до 150 °C.

Данная работа является продолжением исследований по термическому анализу нанокompозита Co–C. Исследование структуры нанокompозита Co–C и других показало, что она представляет собой близкое к стержню по форме включения плотно упакованных и тесно взаимодействующих друг с другом наночастиц кобальта (nCo), покрытых многослойной графитовой сеткой (оксидом графена) [6]. Оксид графена препятствуют агрегации наночастиц в такой смеси, агрегатное состояние которой представляет чёрный дисперсный порошок. Было показано, что в нанокompозите Co–C частицы Co имеют метрический размер в диапазоне 3–5 нм.

В работе [7] были приведены результаты дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC) нанокompозита Co–C, полученного методом пиролиза [6]. Последнее оказывает влияние на некоторые параметры фазовой трансформации, такие, например, как энергия активации полиморфного превращения $\alpha\text{-Co} \rightarrow \beta\text{-Co}$; температуру фазового перехода (снижается). А энергия активации этого процесса заметно уменьшается по сравнению с этими характеристиками в образцах массивного кобальта mCo [8]. Дальнейшее исследование этого нанокompозита выявило некоторые новые аспекты его поведения при термоциклировании. Настоящее сообщение посвящено описанию и анализу этих специфических характеристик углеродного нанокompозита Co–C.

2. Материал и методы исследования

Нанокompозит Co–C получали методом пиролиза при температуре 600 °C в атмосфере азота [6]. Наноструктуру исследуемых образцов исследовали с помощью просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) высокого разрешения JEOL JEM 2010, при ускоряющем напряжении 200 кВ с ПЗС-матрицей Gatan Multiscan. Образцы были подготовлены путем накапывания 2 мкл раствора ацетона с исследуемыми наночастицами Co–C на медную

сетку для ПЭМ с углеродным покрытием и последующей сушки при комнатных условиях.

Сканирующий электронно-микроскопический (СЭМ) анализ образцов был проведён с помощью установки Quattro Thermo Fisher Scientific в режиме вторичных электронов при ускоряющем напряжении 30 кВ и детектором вторичных электронов. Элементный анализ проводили с помощью энергодисперсионной приставки INCA (Oxford Instruments).

В работе приведены совмещенные результаты дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC) и термогравиметрии (TG) при термоциклировании нанокompозита Co–C при втором цикле нагрева и охлаждения. Первый цикл нагрева и охлаждения после изготовления нанокompозита Co–C рассматривается как стабилизирующая обработка [7].

Совмещенные данные по DSC и TG были получены с помощью прибора STA “Jupiter” 449 фирмы Netzsch. Нагрев и охлаждение производили в атмосфере аргона (99.9995 % Ar) со скоростями 5, 10, 20 и 40 К/мин до температуры 700 °C. Скорость потока газа 25–30 мл/мин. Масса навески композита составляла 125–130 мг. Обработка экспериментальных данных по DSC реализована с использованием программного обеспечения Proteus Analyses и пакета Fityk. Для исключения возможности появления при исследовании фазовых превращений артефактов, обусловленных особенностями эксперимента, проводили сглаживание экспериментальных данных полиномом 6–8 степени.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

Результаты электронно-микроскопических методов исследования представлены на рис. 1 и 2. Результаты элементного анализа даны в таблице. На наноуровне образцы представляют собой массив плотноупакованных наночастиц Co диаметром 3–5 нм, окружённых 3–5 слоями графеновой оболочки. На микроуровне образцы не имеют выделенной формы, а на макроуровне – представляют собой чёрный порошок. Элементный анализ демонстрирует наличие кислорода 6 ± 2 ат.%, что означает наличие дефектов в углеродной матрице.

На рис. 3 показано изменение сигнала DSC при втором цикле нагрева и охлаждения нанокompозита Co–C. При нагреве наблюдается типичная для этого случая зависимость сигнала DSC от температуры: два хорошо выраженных эндотермических эффекта. Первый из них наблюдается в интервале температур 411–443 °C. Совпадение температур максимума эндотермического эффекта и температурного максимума второй производной сигнала DSC позволяет связать [9] этот эффект с фазовым переходом первого рода (ФП-1).

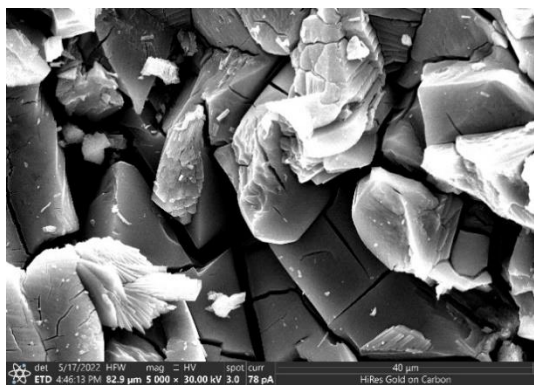


Рис. 1. Микроструктура композита Co-C

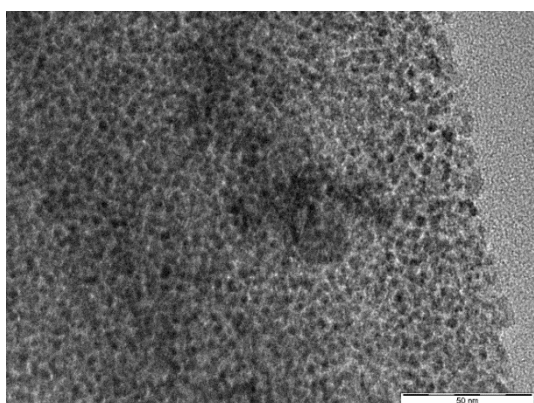


Рис. 2. Наноструктура композита Co-C

Элементный анализ

Элемент	Ат.%
C	69±5
O	6±2
Co	25±5

Второй эндотермический эффект наблюдается при нагреве композита в интервале температур 443–495 °С. И также по формальному признаку совпадения максимума эндотермического эффекта и температурного максимума второй производной сигнала DSC позволяет считать этот эффект обусловленным ФП-1.

Третья особенность на DSC-зависимости наблюдается в районе температур 495–570 °С и не характеризуется появлением температурного максимума второй производной сигнала DSC в этом температурном интервале и по этому признаку данный эндотермический эффект не может быть отнесен к ФП-1. Общие энергетические затраты на превращение α -Co $\rightarrow$ β -Co при нагреве со скоростью 10 К/мин составляют 65 Дж/г.

В массивном кобальте, mCo, на DSC-зависимости наблюдаются как при нагреве, так и при охлаждении только один эндотермический (нагрев) или экзотермический (охлаждение) тепловые эффекты [8]. Для скорости термоциклирования 10 К/мин они соответственно равны 4.1 и 5.6 Дж/г. Диапазон температур развития превращения $\alpha \rightarrow \beta$ при этой скорости нагрева 440–470 °С. Этот диапазон существенно меньше, чем регистрируется при фазовом превращении nCo в нанокompозите Co-C.

При охлаждении композита Co-C после его нагрева до 700 °С (см. рис. 3) до близких к комнатной температурам, никаких особенностей на DSC зависимости не наблюдается. Фазовые превращения в районе температур первого и второго эндотермических эффектов не регистрируются. Надо отметить, что и в массивных образцах кобальта обратный переход $\beta \rightarrow \alpha$ совершается с относительно большим переохлаждением (более 50 °С), но при скорости 10 К/мин начинается выше 380 °С. Таким образом, в экспериментах образцах Co-C методом DSC $\beta \rightarrow \alpha$ переход не фиксируется.

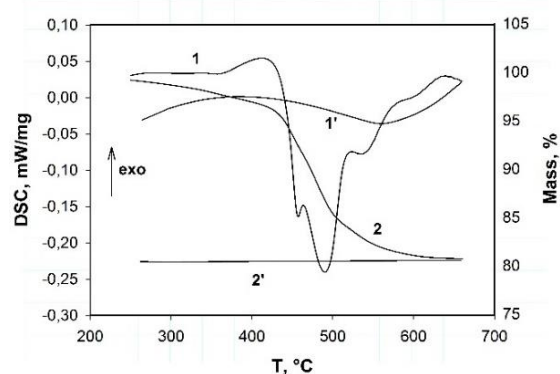


Рис. 3. Изменение сигналов DSC (1) и TG (2) при нагреве и охлаждении (1', 2') нанокompозита Co-C. Скорость термоциклирования 10 К/мин

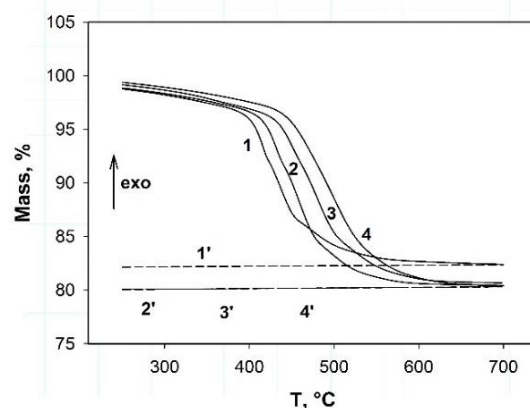


Рис. 4. Влияние скорости нагрева и охлаждения нанокompозита Co-C на сигнал TG в районе температур полиморфного превращения в nCo: 1,1' – 5 К/мин; 2,2' – 10 К/мин; 3,3' – 20 К/мин; 4,4' – 40 К/мин

В [10] также отмечено, что после охлаждения нанокompозита Co-C с 600 °С в безокислительной атмосфере фиксируется только присутствие β -Co методом рентгеноструктурного анализа.

В случае справедливости этого утверждения следовало ожидать, что при повторном нагреве образца превращение $\alpha \rightarrow \beta$ на DSC-зависимости должно отсутствовать. Эксперимент не подтверждает это предположение. Оказалось, что после второго цикла термоциклирования и некоторой выдержки образцов на воздухе, при последующем

нагреве вновь воспроизводится ситуация, в качественном плане представленная на рис. 3.

Вторым неожиданным наблюдением стало то, что при нагреве нанокompозита Co-C фиксируется потеря массы образца (рис. 3). Этот процесс имеет тенденцию к ускорению в районе температур регистрации первого и второго эндотермических эффектов при нагреве. Общее изменение массы навески при нагреве лежит в районе 10–11 %. Из приведённых на рис. 3 и 4 данных следует что, как и в случае с данными DSC, при охлаждении заметных изменений массы образца в районе температур полиморфного превращения nCo не наблюдается.

Данные TG послужили основанием для предположения о том, что после охлаждения и переноса навески нанокompозита Co-C из нейтральной в окислительную атмосферу (воздух) происходит частичное окисление наночастиц кобальта. Это закономерно, поскольку известно, что в высокотемпературном состоянии кобальт пиррофорен. Это неоднократно фиксировалось и в наших экспериментах. Если тигель с нанокompозитом Co-C после предварительного нагрева до 700 °C достают из установки на воздух при температуре выше 100 °C, то наблюдается искрение образца.

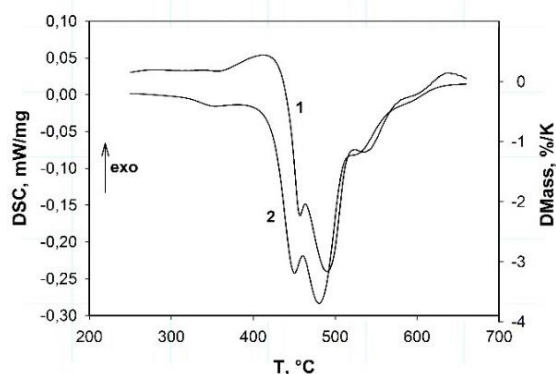


Рис. 5. Вид сигнала DSC (1) и DTG (2) при нагреве нанокompозита Co-C со скоростью 10 K/мин

С увеличением скорости нагрева кривая TG(T) смещается в область более высоких температур (рис. 4). А на рис. 5 приведены изменение сигнала DSC и первой производной изменения массы, DTG, в районе температур полиморфного, $\alpha \rightarrow \beta$, превращения в nCo. Характер изменения этих зависимостей указывает на взаимосвязанность процессов, обуславливающих потерю массы навески и тепловых эффектов при $\alpha \rightarrow \beta$, превращения в nCo. Более того, во всем температурном интервале $\alpha \rightarrow \beta$, превращения в nCo изменение TG всегда предшествует изменению сигнала DSC.

По результатам влияния скорости нагрева на температуру максимума DTG методом Киссинджера [11] была определена эффективная энергия активации процесса, ответственного за изменение массы навески в районе температур $\alpha \rightarrow \beta$ превращения. Она оказалась равной 140 ± 20 кДж/моль, что

практически совпадает с эффективной энергией активации $\alpha \rightarrow \beta$ превращения nCo 140 ± 20 кДж/моль [7].

Оказалось, что при нагреве нанокompозита Co-C после его нахождения на воздухе (третий цикл) вновь фиксируется изменение сигнала DSC и потеря массы навески (рис. 3), которая имеет тенденцию к ускорению в районе температур регистрации первого и второго эндотермических эффектов при нагреве: 1.2 % для первого и 7.9 % для второго.

Поэтому был реализован следующий эксперимент. Нанокompозит Co-C после предварительного нагрева в атмосфере аргона до 700 °C и последующего охлаждения до комнатной температуры выдерживался 3 часа в атмосфере аргона и затем вновь нагревался в атмосфере аргона с регистрацией сигнала DSC и изменения его массы (рис. 6). Затем охлаждали в атмосфере аргона до комнатной температуры. Ничего особенного в районе температур полиморфного превращения в nCo на DSC и TG зависимостях не обнаружено. Однако если после этого тигель в установке выдержать три часа на воздухе и вновь реализовать цикл нагрева и охлаждения в атмосфере аргона, то наблюдается ситуация, близкая к той, которая показана на рис. 3.

Возникла необычная ситуация. Нагрев нанокompозита Co-C вызывает появление хорошо выраженного эндотермического эффекта в районе температур реализации α -Co $\rightarrow$ β -Co превращения в nCo. Однако при охлаждении обратный фазовый переход не реализуется. Он становится возможным только после того, как произойдет частичное окисление β -nCo. По-видимому, по какому-то механизму осуществляется при этом переход β -nCo $\rightarrow$ α -nCo.

В этом случае при последующем нагреве реализуются два процесса. Первый, в процессе которого окисленная составляющая в нанокompозите Co-C диссоциирует с удалением продуктов разложения потоком защитного газа. И второй, собственно полиморфное превращение α -nCo $\rightarrow$ β -nCo.

Что касается термодинамических характеристик процессов, происходящих при нагреве нанокompозита Co-C, то, как указывалось, тепловой эффект превращения эндотермического процесса на порядок больше, чем это регистрируется при полиморфном превращении в образцах массивного mCo. Энергия активации полиморфного превращения равна ≈ 140 кДж/моль для нанокompозита и 380 кДж/моль для массивного mCo [8]. Температура начала превращения при скорости нагрева 5, 10, 20 и 40 K/мин соответственно равны 400, 411, 438, 449 °C. То есть, с увеличением скорости нагрева она смещается в сторону более высоких температур, а тепловой эффект соответственно увеличивается и равен 24, 65, 70, 75 Дж/г. Это более чем на порядок больше того, что наблюдается в mCo.

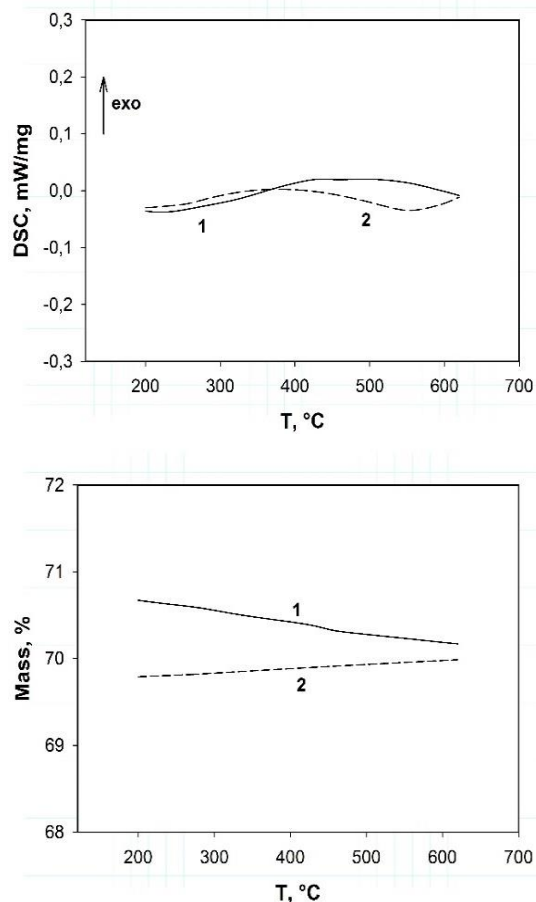


Рис. 6. Изменение сигналов DSC (сверху) и TG (снизу) при нагреве (1) и охлаждении (2) после выдержки навески композита Co-C в аргоне в течение 3 часов. Скорость термоциклирования 40 К/мин

4. Заключение

При анализе полученных в данной работе и работе [7] результатов следует учесть, нахождение в конгломерате Co-C изолированных друг от друга наночастиц nCo, отделённых друг от друга углеродным (графеновым) покрытием, что, по-видимому, может оказывать влияние на энергетические затраты при фазовой трансформации в таком специфическом объекте.

Можно отметить следующие особенности поведения нанокompозита Co-C при нагреве и охлаждении в диапазоне температур 20-700 °C:

1. Полиморфное превращение при нагреве α -nCo начинается при более низких, а завершается при существенно более высоких температурах, чем в mCo.
2. Тепловой эффект превращения в nCo в разы превышает его значения при фазовой трансформации в mCo.
3. Энергия активации фазовых трансформаций при нагреве в nCo значительно меньше тех значений, которые установлены в аналогичных условиях для mCo (380 кДж/моль).

4. Наличие двух максимумов в спектре эндотермического эффекта может быть следствием присутствия в структуре преимущественно двух различающихся по размеру групп частиц nCo. Повторный нагрев приводит к ещё большей дифференциации таких частиц по их размерам. С увеличением скорости нагрева различия в DSC-зависимостях, обусловленные размерами частиц nCo-C, сглаживаются.

5. При нагреве концентрата nCo-C обнаружено изменение массы навески концентрата особенно активное вблизи температур реализации тепловых эффектов при α -nCo $\rightarrow$ β -nCo. Изменение сигнала TG всегда воспроизводит, в качественном плане, изменение сигнала DSC, но всегда предшествует ему по температуре. Оба процесса характеризуются практически одинаковыми значениями эффективной энергии активации. Эти факторы свидетельствуют о взаимосвязанности ответственных за эти явления механизмов.

6. Фазовые превращения α -nCo $\rightarrow$ β -nCo наблюдаются только тогда, когда нанокompозит Co-C перед нагревом взаимодействует с кислородом воздуха.

7. По предположению, изменение массы навески нанокompозита Co-C при нагреве связано с термической диссоциацией продуктов окисления наночастиц Co.

9. Взаимодействие nCo в нанокompозите с кислородом воздуха приводит к активизации перехода $\beta \rightarrow \alpha$ в таких наночастицах. При нагреве такого объекта в частицах nCo реализуется обратный переход $\alpha \rightarrow \beta$. Это явление следует считать неизвестной ранее особенностью поведения материала с полиморфизмом в наносостоянии. Особенность, о которой ранее не сообщалось.

Список литературы

1. Tsiberkin K. B., Sosunov A. V., Govorina V. V., Neznakhin D. S., Henner V. K., Sumanasekera G. Magnetic properties of carbon nanocages: pure and with the Ni or Co inclusions // Solid State Sciences. 2025. Vol. 162, 107862. DOI: 10.1016/j.solidstatesciences.2025.107862
2. Li Z., Li B., Yu C., Wang H., Li Q. Recent progress of hollow carbon nanocages: general design fundamentals and diversified electrochemical applications // Adv. Sci. 2023. Vol. 10, 2206605. <https://doi.org/10.1002/advs.202206605>
3. Wang, X., Tan, Z., Zeng, M. et al. Carbon nanocages: A new support material for Pt catalyst with remarkably high durability // Sci. Rep. 2014. Vol. 4, 4437. <https://doi.org/10.1038/srep04437>
4. Wu Q., Yang L., Wang X., Hu Z. Carbon-based nanocages: a new platform for advanced energy storage and conversion // Adv. Mater. 2020. Vol. 32, 1904177. doi: 10.1002/adma.201904177
5. Šádovská G., Honcová P., Morávková J., et al. The thermal stability of carbon materials in the air:

- quantitative structural investigation of thermal stability of carbon materials in air // *Carbon*. 2023. Vol. 206. P. 211–225. DOI: 10.1016/j.carbon.2023.02.042.
6. Рудаков Г. А., Сосунов А. В., Пономарев Р. С. и др. Синтез полых углеродных нанооболочек и их применение для суперконденсаторов // *Физика твердого тела*. 2018. Т. 60, вып. 1. С. 165–170. DOI: 10.21883/FTT.2018.01.45304.127
 7. Спивак Л. В., Сосунов А. В., Щепина Н. Е. Фазовые превращения нанокомпозита Co-C при нагреве // *Письма ЖТФ*. 2022. Т. 48, № 16. С. 30–33. DOI: 10.21883/PJTF.2022.16.53204.19258
 8. Спивак Л. В., Щепина Н. Е. Особенности полиморфного превращения при нагреве и охлаждении кобальта // *ЖТФ*, 2022. Т. 92. № 4. С. 569–574. DOI: 10.21883/JTF.2022.04.52244.295-21
 9. Brown M.E. *Introduction to thermal analysis*. New York: Kluwer Academic, 2001. 264 p.
 10. Yosida Y., Shida S., Ohsuna T., Shiraga N. Synthesis, Identification, and Growth Mechanism of Fe, Ni, and Co Crystals Encapsulated in Multiwalled Carbon Nanocages // *J. Appl. Phys.* 1994. Vol. 76 (8). P. 4533–4539. DOI: 10.1063/1.358446
 11. Kissinger H. E. *Reaction Kinetics in Differential Thermal Analysis* // *Anal. Chem.* 1957. Vol. 29 (11). P. 1702–1706. DOI: 10.1021/ac60131a045
 - applications. *Adv. Sci.*, 2023, vol. 10, 2206605. <https://doi.org/10.1002/advs.202206605>
 3. Wang, X., Tan, Z., Zeng, M. et al. Carbon nanocages: A new support material for Pt catalyst with remarkably high durability. *Sci. Rep.*, 2014, vol. 4, 4437. DOI: 10.1038/srep04437
 4. Wu Q., Yang L., Wang X., Hu Z. Carbon-based nanocages: a new platform for advanced energy storage and conversion. *Adv. Mater.*, 2020, vol. 32, 1904177. DOI: 10.1002/adma.201904177
 5. Sádovská G., Honcová P., Morávková J., et al. The thermal stability of carbon materials in the air: Quantitative structural investigation of thermal stability of carbon materials in air. *Carbon*, vol. 206, 2023, pp. 211–225. DOI: 10.1016/j.carbon.2023.02.042.
 6. Rudakov G.A., Sosunov A.V., Ponomarev R. S. et al. Synthesis of hollow carbon nanoshells and their application for supercapacitors. *Physics of the Solid State*, 2018, vol. 60, no. 1, pp. 167–172. DOI: 10.1134/S1063783418010213
 7. Spivak L.V., sosunov A.V., Shchepina N.E. Phase transitions Co–C nanocomposite at heating. *Technical Physics Letters*, 2022, vol. 48, no. 8, pp. 66–68. DOI: 10.21883/TPL.2022.08.55066.19258
 8. Spivak L.V., Shchepina N.E. Features of polymorphic transformation during heating and cooling of cobalt. *Technical Physics*, 2022, vol. 67, no. 4, pp. 478–483. doi: 10.21883/TP.2022.04.53604.295-21
 9. Brown M. E. *Introduction to thermal analysis*. New York: Kluwer Academic, 2001. 264 p.
 10. Yosida Y., Shida S., Ohsuna T., and Shiraga N. Synthesis, Identification, and Growth Mechanism of Fe, Ni, and Co Crystals Encapsulated in Multiwalled Carbon Nanocages. *J. Appl. Phys.* 1994, vol. 76 (8), pp. 4533–4539. DOI: 10.1063/1.358446
 11. Kissinger H. E. Reaction kinetics in differential thermal analysis. *Anal. Chem.*, 1957, vol. 29 (11), pp. 1702–1706. DOI: 10.1021/ac60131a045

References

1. Tsiberkin K. B., Sosunov A. V., Govorina V. V., Neznakhin D. S., Henner V. K., Sumanasekera G. Magnetic properties of carbon nanocages: pure and with the Ni or Co inclusions. *Solid State Sciences*. 2025, vol. 162, 107862. DOI: 10.1016/j.solidstatesciences.2025.107862
2. Li Z., Li B., Yu C., Wang H., Li Q. recent progress of hollow carbon nanocages: general design fundamentals and diversified electrochemical

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Спивак Л. В., Сосунов А. В. Аномалии фазовых переходов при термоциклировании нанокомпозита Co-C // *Вестник Пермского университета. Физика*. 2026. № 2. С. 75–80. doi: 10.17072/1994-3598-2026-2-75-80

Please cite this article in English as:

Spivak L. V., Sosunov A. V. Anomalies of phase transitions during thermal cycling of a Co-C nanocomposite. *Bulletin of Perm University. Physics*, 2026, no. 2, pp. 75–80. doi: 10.17072/1994-3598-2026-2-75-80

Сведения об авторах

1. Спивак Лев Волькович, д-р. физ.-мат. наук, профессор кафедры нанотехнологий и микросистемной техники, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614068
2. Сосунов Алексей Владимирович, к.т.н., доцент кафедры нанотехнологий и микросистемной техники, Пермский государственный национальный исследовательский университет, ул. Букирева, 15, Пермь, 614068

Author information

1. Lev V. Spivak, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Department of Nanotechnologies and Microsystems Engineering, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia
2. Alexey V. Sosunov, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Department of Nanotechnologies and Microsystems Engineering, Perm State University; 15, Bukireva st., Perm, 614068, Russia