

СИНТЕЗ ОДНОМЕРНЫХ НАНОСТРУКТУР ВОССТАНОВЛЕНИЕМ АЛКИЛКАРБОКСИЛАТОВ НИКЕЛЯ, РАЗЛИЧАЮЩИХСЯ ДЛИНОЙ УГЛЕВОДОРОДНОЙ ЦЕПИ

© 2022 г. А. М. Воробьев, А. И. Титков, О. А. Логутенко*

*Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук,
ул. Кутателадзе 18, Новосибирск, 630128 Россия
e-mail: ologutenko@solid.nsc.ru

Поступило в Редакцию 12 ноября 2021 г.
После доработки 7 декабря 2021 г.
Принято к печати 9 декабря 2021 г.

Нанопроволоки никеля получены при восстановлении алкилкарбоксилатов никеля гидразингидратом в этиленгликоле. Увеличение длины цепи монокарбоновых кислот приводит к уменьшению длины нанопроволок, но их средний диаметр изменяется незначительно. Полученные частицы исследованы методами рентгенофазового анализа и электронной микроскопии.

Ключевые слова: никель, алкилкарбоксилаты, наночастицы, этиленгликоль, гидразингидрат, восстановление

DOI: 10.31857/S0044460X22030106

Наночастицы, обладающие магнитными свойствами, используются в различных областях техники, медицины и биологии. На их основе изготавливают контрастные материалы в магниторезонансной томографии, сенсоры биомолекул и микробиологических объектов, их используют для целенаправленной доставки биологически активных и лекарственных соединений. Магнитные наночастицы никеля используются в качестве биосенсоров, слоев топливных элементов, композитов и материалов для солнечной энергетики, а также в качестве магнитных наножидкостей [1, 2]. Наночастицы металлов (серебра, золота, меди, никеля, алюминия и цинка) применяются для приготовления чернил и паст для 2D- и 3D-печати электропроводящих элементов печатной электроники, в частности антенн и микроэлектродов [3–7].

Для синтеза наночастиц никеля различной формы разработан ряд физических и химических методов, однако большинство из этих методов энергоемки и требуют специального оборудова-

ния [8–10]; к их недостаткам относятся трудности контроля химического состава продукта синтеза, загрязнение наночастиц исходными реагентами и их окисление. В связи с этим разработка новых более эффективных и экологически безопасных способов получения наночастиц никеля представляется актуальной задачей. Одно из перспективных направлений в этой области – использование полиольного метода, в котором роль восстановителя и одновременно растворителя играют многоатомные спирты, чаще всего – этиленгликоль, пропиленгликоль и диэтиленгликоль [11–13]. Полиольный метод приводит к образованию как изотропных, так и анизотропных структур [4, 11], он позволяет контролировать размер, степень полидисперсности частиц, их форму и перспективен для промышленного внедрения из-за относительной простоты и невысокой стоимости.

Среди различных форм наночастиц наиболее востребованы анизотропные наноструктуры, в том числе нанопроволоки, поскольку их оптиче-

ские, электронные, магнитные и каталитические свойства зачастую превосходят свойства сферических наночастиц [14]. Для практического использования эффекта морфологической анизотропии в магнитных материалах перспективны одно- и двумерные наноструктуры, поскольку уже незначительное отклонение формы наночастиц от сферической приводит к резкому возрастанию коэрцитивной силы и снижает вероятность их перехода в суперпарамагнитное состояние [8]. Пленки, полученные из чернил и паст на основе нанопроволок, спекаются при более низких температурах при термическом отжиге и имеют более низкое сопротивление [15, 16]. Присутствие небольших количеств нанопроволок в медных чернилах (до 5 мас%) значительно увеличивает плотность и гибкость полученных в результате спекания структур при механическом изгибе [17].

Поскольку никель относится к магнитным металлам, направленный рост, размеры и форму анизотропных частиц контролируют внешним магнитным полем, и синтез проводят в пространственно-ограниченных средах (темплата). Магнитное поле – ключевой фактор, управляющий движением и ориентацией магнитных наночастиц [18, 19]. Кроме того, для обеспечения анизотропного роста необходимо присутствие поверхностно-активных веществ, которые могут избирательно адсорбироваться на гранях кристаллов и препятствовать их росту в определенных направлениях. Формирование одномерных структур никеля происходит в результате селективной адсорбции стабилизатора на грани (100) кристалла, при этом подавляется присоединение атомов к ней и блокируется дальнейший рост в этом направлении; анизотропный рост кристалла происходит вдоль грани (111). Один из таких стабилизаторов – поли(1-винилпирролидин-2-он) [20]. Наностержни никеля образуются при высокой концентрации гексадециламина в реакционной среде [21], а додецилбензолсульфонат натрия играет ключевую роль в росте нанополосок никеля [22]. Однако получить анизотропные частицы никеля в отсутствие темплата и магнитного поля достаточно сложно.

Ранее мы сообщали о получении нанопроволок никеля при восстановлении формиата никеля гидразингидратом в гликоле [23, 24]. Для получения наночастиц металлов в качестве исходно-

го соединения целесообразно использовать соли карбоновых кислот, которые проявляют себя как эффективные стабилизаторы и способствуют анизотропному росту частиц [25, 26]. Контролируемый термолиз алкилкарбоксилатов никеля – один из наиболее перспективных методов синтеза нанокompозитов на основе никеля [27].

Нами исследованы морфологические характеристики никелевых наночастиц, образующихся при восстановлении различных алкилкарбоксилатов никеля гидразингидратом в этиленгликоле, изучено влияние длины углеводородной цепи карбоновой кислоты на диаметр и длину нанопроволок, а также на их выход. Предложен простой метод синтеза нанопроволок никеля, которые можно использовать для создания новых композиций электропроводящих чернил и паст для 2D- и 3D-печати, а также магнитных полимерных композитов. Простота метода состоит в том, что формирование одномерных наноструктур протекает в отсутствие полимеров, например, поли(1-винилпирролидин-2-он), темплата или внешнего магнитного поля.

Поскольку окислительно-восстановительный потенциал никеля ниже, чем у меди или серебра [-0.24 В (Ni^{2+}/Ni), $+0.337$ В (Cu^{2+}/Cu) и $+0.799$ В (Ag^+/Ag)], восстановление ионов никеля до металла проводят в более жестких условиях, например, в присутствии щелочных агентов и при температуре кипения этиленгликоля (198°C). Восстановление никеля при более низких температурах необходимо проводить в присутствии относительно сильных восстановителей, например, гидразингидрата. Формиат никеля восстанавливается гидразингидратом в этиленгликоле без дополнительного подщелачивания среды, что исключает образование гидроксида никеля в качестве промежуточного соединения и позволяет избежать загрязнения им наночастиц никеля. Восстановление формиата никеля начинается при температуре выше 120°C ; продукты реакции, полученные при 130°C , представляют собой нанопроволоки металлического никеля длиной 3–10 мкм и диаметром около 100–150 нм (в зависимости от концентрации соли никеля).

Влияние длины алкильной цепи карбоксилата на морфологию и свойства наночастиц никеля исследовано на примере восстановления формиата,

Таблица 1. Элементный состав алкилкарбоксилатов никеля

Соединение	Ni, %		C, %		H, %	
	найдено	вычислено	найдено	вычислено	найдено	вычислено
Бутират $\text{Ni}(\text{C}_3\text{H}_7\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	23.22	23.41	38.10	38.29	5.47	5.58
Каприлат $\text{Ni}(\text{C}_7\text{H}_{15}\text{COO})_2$	17.04	17.01	55.12	55.63	8.34	8.69
Валерат $\text{Ni}(\text{C}_4\text{H}_9\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	26.71	21.06	43.44	43.06	6.52	6.46
Пропионат $\text{Ni}(\text{C}_2\text{H}_5\text{COO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	29.13	26.45	32.48	32.33	4.45	4.49

ацетата, пропионата, бутирата, валерата и каприлата никеля гидразингидратом в этиленгликоле. Алкилкарбоксилаты никеля охарактеризованы методами электронной микроскопии и рентгенофазового анализа, данные элементного анализа количественно подтверждают их состав. Расчетные и найденные количества никеля, углерода и водорода в полученных соединениях хорошо согласуются между собой (табл. 1).

Согласно данным рентгенофазового анализа (рис. 1), формиат и ацетат никеля представляют собой кристаллические соединения, тогда как пропионат, бутират, валерат и каприлат никеля рентгеноаморфны. Все полученные порошки состоят из частиц размером от 10 до 1 мкм и, за исключением каприлата никеля, хорошо растворяются в этиленгликоле, образуя растворы с концентрацией никеля около 0.1 моль/л и более.

Восстановление алкилкарбоксилатов проводили в условиях синтеза нанопроволоки из формиата

никеля: мольное отношение Ni^{2+} –гидразингидрат 1:18, температура 130°C, концентрация никеля в растворе 0.035 моль/л [23, 24]. Окончание восстановления контролировали, анализируя количество ионов никеля в органической фазе. Практически количественный выход наночастиц никеля (95–97%) достигается при проведении реакции в течение 3–5 мин.

По данным электронно-микроскопического исследования морфологии (рис. 2), полученные при восстановлении формиата никеля наночастицы никеля представляют собой нанопроволоки со средним диаметром 248.9 ± 54.1 нм и длиной 3–10 мкм. При восстановлении ацетата никеля также получены нанопроволоки с уменьшенными средним диаметром и длиной (163.6 ± 35.8 нм и 3–5 мкм соответственно). Длина и средний диаметр нанопроволок, полученных при восстановлении пропионата никеля, уменьшились до 1.0–1.5 мкм и 153.6 ± 33.8 нм соответственно. При восстановле-

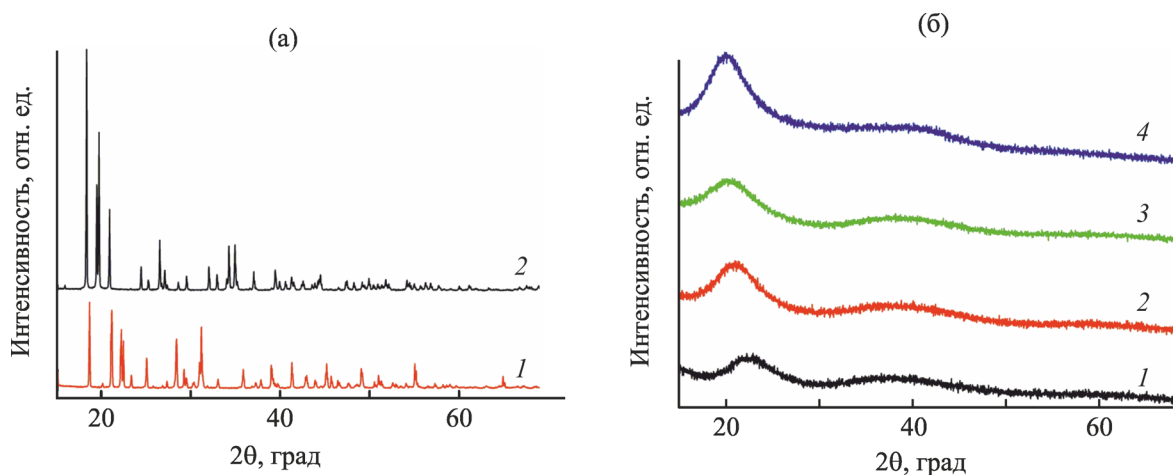


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы алкилкарбоксилатов никеля: (а) – ацетат (1), формиат (2); (б) – пропионат (1), бутират (2), валерат (3), каприлат (4).

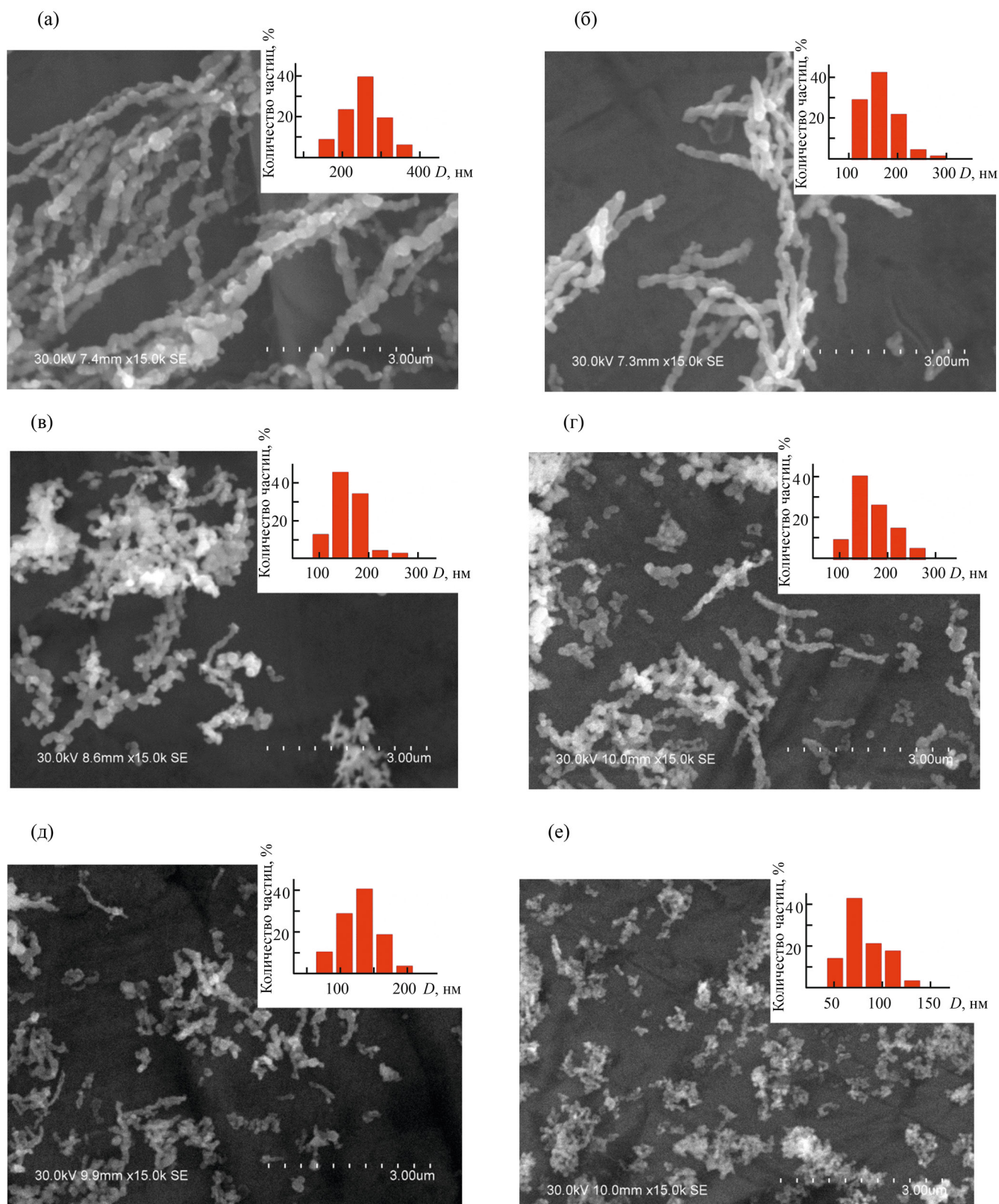


Рис. 2. Микроснимки и гистограммы распределения по размерам частиц порошков, полученных при восстановлении формиата (а), ацетата (б), пропионата (в), бутирата (г), валерата (д) и каприлата (е) никеля гидразингидратом в этиленгликоле. Соотношение Ni^{2+} –гидразингидрат 1:18, 130°C.

нии валерата и бутирата никеля образуется смесь, состоящая из нанопроволок и отдельных частиц сферической формы (средний диаметр и длина нанопроволок 146.9 ± 42.9 и 127.6 ± 26.2 нм, 0.75 – 1.5 и 0.3 – 1.2 мкм соответственно). При восстановлении каприлата никеля в этих условиях получить нанопроволоки не удалось, продукт восстановления представлял собой агрегаты сферических частиц с размерами 81.5 ± 19.9 нм.

При восстановлении во всех случаях получен кристаллический чистый металлический никель (данные РФА, рис. 3) с характерными дифракционными максимумами, 2θ 44.5 , 51.98 и 76.4° , соответствующими дифракции от плоскостей (111), (200), (220) гранецентрированной кубической структуры никеля (JCPDS, файл № 04-0850). На дифрактограммах не обнаружено рефлексов, принадлежащих другим кристаллическим фазам, включая NiO, что подтверждает получение в этих условиях чистого металлического никеля (табл. 2).

Учитывая результаты наших предыдущих исследований, а также литературные данные, восстановление ионов никеля гидразином в этиленгликоле можно представить следующим образом. При растворении алкилкарбоксилатов никеля в этиленгликоле происходит сольватация катионов никеля молекулами этиленгликоля [28] (1), а при добавлении раствора гидразингидрата они замещаются на гидразин с образованием комплексных соединений $[\text{Ni}(\text{N}_2\text{H}_4)_m](\text{RCOO})_2$ (2), о чем свиде-

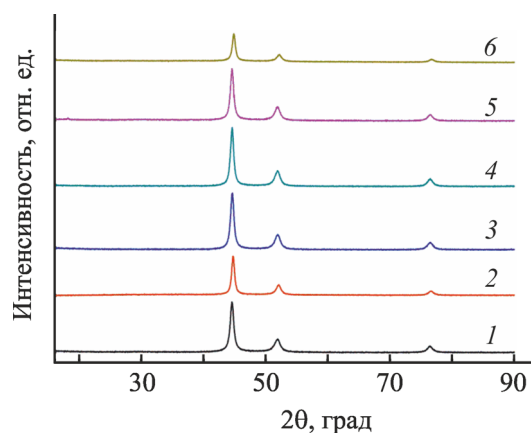
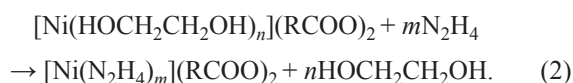
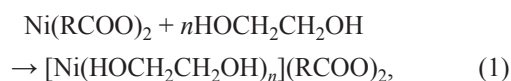


Рис. 3. Рентгенограммы порошков, полученных при восстановлении формиата (1), ацетата (2), пропионата (3), бутирата (4), валерата (5) и каприлата (6) никеля гидразингидратом при 130°C . Соотношение Ni^{2+} –гидразингидрат 1:18.

тельствует появление сине-фиолетового осадка, характерного для комплексов никеля с гидразингидратом.



Гидразингидрат, выступая в роли мостикового бидентатного лиганда по отношению к метал-

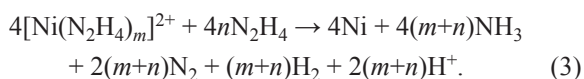
Таблица 2. Влияние условий синтеза на размер и морфологию наночастиц, полученных при восстановлении алкилкарбоксилатов никеля, гидразингидратом в этиленгликоле^a

Соединение никеля	Размер частиц (данные РЭМ), нм	Состав (данные РФА)	Морфология частиц
Формиат	d 248.9 ± 54.1 l 3 – 10 мкм	Ni	Нанопроволоки
Ацетат	d 163.6 ± 35.8 l 3 – 5 мкм	Ni	Нанопроволоки
Пропионат	d 153.6 ± 33.8 l 1.0 – 1.5 мкм	Ni	Нанопроволоки
Бутират	d 146.9 ± 42.9 l 0.75 – 1.5 мкм	Ni	Нанопроволоки и сферические частицы, ~ 150 нм
Валерат	d 127.6 ± 26.2 l 0.3 – 1.2 мкм	Ni	Нанопроволоки и сферические частицы, ~ 150 нм
Каприлат	d 81.5 ± 19.9	Ni	Агрегаты сферических частиц

^a Концентрация никеля в растворе 0.035 моль/л, температура 130°C , соотношение Ni^{2+} –гидразингидрат 1:18.

лу, образует различные комплексные соединения, состав которых зависит от количества гидразингидрата, введенного в систему, а также от кислотности среды [29]. Согласно литературным данным [24, 29, 30], в водном растворе из хлорида никеля и гидразингидрата образуется несколько стабильных комплексов: $\text{Ni}(\text{N}_2\text{H}_4)_2\text{Cl}_2$, $\text{Ni}(\text{N}_2\text{H}_4)_3\text{Cl}_2$, $\text{Ni}(\text{N}_2\text{H}_4)_6\text{Cl}_2$.

Комплекс никеля, полученный в этиленгликоле при взаимодействии формиата никеля и гидразингидрата при 130°C , имеет состав $\text{Ni}(\text{N}_2\text{H}_4)_2(\text{CHOO})_2$ [31]. Этот же комплекс образуется при 130°C или при более низкой температуре в виде фиолетово-розовых сильно вытянутых кристаллов шириной от 400 до 800 нм и длиной около 4 мкм. В данной системе каждый алкилкарбоксилат образует соответствующий комплекс с гидразином. При температуре выше 130°C кристаллы комплексов растворяются, а при дальнейшем нагревании раствора свободный (избыточный) гидразин восстанавливает ионы никеля до металла (3).



При восстановлении сначала образуются первичные частицы Ni, дальнейший анизотропный рост кристаллов может происходить путем ориентированного присоединения (самосборки) первичных частиц. Грани кристалла притягиваются и соединяются, при этом снижается поверхностная энергия. При формировании монокристаллических одномерных структур ориентированное присоединение происходит в направлении грани $\langle 111 \rangle$ [32]. Образование поликристаллических одномерных структур может происходить под действием собственного магнитного поля, которым обладают частицы никеля и благодаря которому они могут агрегировать с образованием линейных наноструктур (согласно литературным данным, наночастицы с магнитными свойствами могут спонтанно выстраиваться в цепь). С помощью модельных расчетов показано, что образование цепей наночастиц железа длиной до 300 мкм может быть обусловлено магнитным взаимодействием между ферромагнитными частицами в реакционной среде [33]. Это подтвердили расчеты, выполненные для металлических цепей из магнитных наночастиц Fe, Co и Ni [34]. Таким образом, ди-

поль-дипольное магнитное взаимодействие между наночастицами никеля может быть причиной формирования одномерных проволочных структур в этиленгликоле.

Уменьшение длины нанопроволок и увеличение выхода сферических частиц с увеличением длины углеводородного радикала карбоновой кислоты может быть вызвано стерическими препятствиями, которые создают более крупные анионы карбоновой кислоты, нарушая взаимную ориентацию частиц никеля и препятствуя образованию одномерных частиц. Поэтому при восстановлении каприлата никеля вместо нанопроволок формируются бесформенные агрегаты из сферических частиц. Необходимо отметить, что при восстановлении хлорида никеля в аналогичных условиях в отсутствие алкилкарбоксилатов не удастся получить одномерные структуры, а образуются наночастицы никеля в виде бесформенных пластин размером 50–100 нм [35]. Следовательно, анионы карбоновой кислоты оказывают существенное влияние на формирование нанопроволок никеля.

Растворитель играет ключевую роль при формировании нанопроволок. Взаимодействие некоторых растворителей с атомами металлов способствует росту анизотропных структур, тогда как другие растворители полностью подавляют его. Морфология нанокристаллитов Ni тесно связана с типом растворителя [36]. Нановолокна Ni образуются только в среде растворителей с двумя гидроксильными группами. Наши исследования показали, что нанопроволоки никеля образуются в этиленгликоле, а при замене его на диэтиленгликоль, пропан-1,2-диол и пентан-1,5-диол в тех же условиях образуются агрегаты сферических частиц никеля [23].

Таким образом, при восстановлении алкилкарбоксилатов никеля в этиленгликоле в зависимости от длины алкильной цепи карбоновой кислоты образуются нанопроволоки, а также сферические частицы никеля. Выход и длина нанопроволок никеля контролируются длиной алкильной цепи карбоновой кислоты. С увеличением длины алкильной цепи карбоновой кислоты длина и диаметр нанопроволок уменьшаются. Анизотропный рост с образованием нанопроволок никеля наблюдается только при восстановлении формиата, ацетата, пропионата и бутирата никеля. При восстанов-

лении валерата никеля (C_5) выход нанопроволок незначителен, а при восстановлении каприлата никеля (C_7) рост одномерных структур прекращается, что, по-видимому, связано с тем, что карбоновая кислота с длинной алкильной цепью создает стерические препятствия для анизотропного роста кристаллов, в результате чего формируются изотропные структуры.

Вследствие геометрической анизотропии оптические, магнитные и каталитические свойства нанопроволок никеля превосходят свойства сферических наночастиц, поэтому нанопроволоки – более перспективный материал для сенсоров и диагностики. Пленки, полученные из чернил на основе несферических наночастиц, должны быть более однородными, иметь меньшее электрическое сопротивление и улучшенные механические свойства по сравнению с аналогичными пленками, приготовленными из сферических частиц.

К существенным недостаткам большинства современных методов получения анизотропных наночастиц никеля относятся высокая стоимость и сложность используемого оборудования, многостадийность синтеза и малый выход продуктов реакции. Предлагаемый нами метод позволяет получать одномерные наноструктуры без использования внешнего магнитного поля в отсутствие щелочи, полимеров, темплата или предварительно синтезированных зародышей. Кроме того, он не требует использования уникального и дорогостоящего оборудования и легко масштабируется.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе использовали формиат никеля $(\text{HCOO})_2\text{Ni}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (ЧДА, ТУ 6-09-743-77, массовая доля основного вещества $\geq 98.0\%$), ацетат никеля $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Ni}\cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ($>99.0\%$, Sigma Aldrich, США), пропионовую кислоту ($>99.5\%$, BASF, Германия), масляную кислоту (Ч, ТУ 6-09-530-75, $>99.0\%$), каприловую кислоту (Ч, ТУ 6-09-529-75, $>98.5\%$), валериановую кислоту $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ (Ч, ТУ 6-09-528-75, 99.0%), этиленгликоль (ЧДА, ГОСТ 10164-76, 99.5%), пропан-2-ол (ХЧ, ТУ 2632-181-44493179-14, 99.8%), гидразингидрат (100% , ГОСТ 7803-57-8) и этиловый спирт (ГОСТ Р 51723-2001, 95.0%).

Карбоксилаты никеля(II). Карбоновую кислоту нагревали до 70°C и добавляли к ней при

перемешивании стехиометрическое количество карбоната никеля, смесь перемешивали 3 ч, затем фильтровали и выпаривали воду. К полученному остатку добавляли этанол, перемешивали и выпаривали растворитель. Полученный алкилкарбоксилат никеля выдерживали в сушильном шкафу при $60\text{--}70^\circ\text{C}$ и анализировали.

Восстановление никеля(II). В термостойкий стеклянный стакан помещали навеску соли никеля, добавляли этиленгликоль (массовое соотношение твердой и жидкой фаз 1:100), перемешивали при нагревании на масляной бане до 130°C . Затем в реакционную смесь при непрерывном перемешивании добавляли гидразингидрат в мольном отношении никель–гидразингидрат 1:18. По окончании синтеза смесь охлаждали на воздухе и декантировали отстоявшийся слой жидкости. Полученный порошкообразный никель промывали несколько раз водой и этанолом, после чего сушили на воздухе при комнатной температуре. Размер частиц и их морфологию исследовали с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) и рентгенофазового анализа (РФА).

РФА продуктов осаждения проводили на дифрактометре Bruker D8 Advance (CuK_α -излучение, одномерный детектор Lynx–Eye с никелевым фильтром, шаг 0.02° , время накопления в точке 35.4 с). Морфологию, диаметр и длину наночастиц никеля изучали методом растровой электронной микроскопии с использованием сканирующего электронного микроскопа Hitachi 3400 N (Hitachi Ltd., Япония).

Элементный анализ образцов выполнен на анализаторе EuroVector EA 3000 CHN. Точность полученных значений охарактеризована доверительным интервалом с 95% вероятностью. Количество никеля в растворах определяли комплексонометрическим титрованием, индикатор – мурексид.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Воробьев Александр Михайлович, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4896-3821>

Титков Александр Игоревич, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0835-9985>

Логутенко Ольга Алексеевна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1523-5446>

ФОНДОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии твердого тела и механохимии СО РАН (проект № 0237-2019-0002).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Губин С.П., Кокшаров Ю.А., Хомутов Г.Б., Юрков Г.Ю. // Усп. хим. 2005. Т. 74. № 6. С. 539; Gubin S.P., Koksharov Yu.A., Khomutov G.B., Yurkov G.Yu. // Russ. Chem. Rev. 2005. Vol. 74. N 6. P. 489. doi 10.1070/RC2005v074n06ABEH000897
2. Гусев А.И. // Усп. физ. наук. 1998. Т. 168. № 1. С. 55.
3. Kamyshny A., Steinke J., Magdassi S. // Open Appl. Phys. J. 2010. Vol. 4. P. 19. doi 10.2174/1874183501104010019
4. Espera A.H. Jr., Dizon J.R.C., Chen Q., Advincula R.C. // Prog. Addit. Manuf. 2019. Vol. 4. N 3. P. 245. doi 10.1007/s40964-019-00077-7
5. Titkov A.I., Bulina N.V., Ulihin A.S., Shundrina I.K., Karpova E.V., Gerasimov E.Yu., Yukhin Yu.M., Lyakhov N.Z. // J. Mater. Sci. Mater. Electron. 2017. Vol. 28. N 2. P. 2029. doi 10.1007/s10854-016-5762-0
6. Titkov A.I., Shundrina I.K., Gadirov R.M., Odod A.V., Kurtsevich A.E., Yukhin Yu M., Lyakhov N.Z. // Mater. Today: Proc. 2018. Vol. 5. N 8. Pt 2. P. 16042. doi 10.1016/j.matpr.2018.05.049
7. Remadevi A., Sreedeviamma D.K., Surendran K.P. // ACS Omega 2018. Vol. 3. N 10. P. 14245. doi 10.1021/acsomega.8b01422
8. Елисеев А.А., Лукашин А.В. Функциональные наноматериалы / Под ред. Ю.Д. Третьякова. М.: ФИЗМАТЛИТ. 2010. 456 с.
9. Третьяков Ю.Д. // Усп. хим. 2003. Т. 72. № 8. С. 731; Tretyakov Yu.D. Russ. Chem. Rev. 2003. Vol. 72. N 8. P. 651. doi 10.1070/RC2003v072n08ABEH000836
10. Белоусов О.В., Борисов Р.В., Белоусова Н.В., Зеер Г.М., Романченко А.С. // ЖНХ 2021. Т. 66. № 10. С. 1380; Belousov O.V., Borisov R.V., Belousova N.V., Zeer G.M., Romanchenko A.S. // Russ. J. Inorg. Chem. 2021. Vol. 66. P. 1463. doi 10.1134/S003602362110003X
11. Fievet F., Ammar-Merah S., Brayner R., Chau F., Giraud M., Mammari F., Peron J., Piquemal J.Y., Sicard L., Viau G. // Chem. Soc. Rev. 2018. Vol. 47. P. 5187. doi 10.1039/c7cs00777a
12. Tsai C.Y., Chang W.C., Chen G.L., Chung C.H., Liang J.X., Ma W.Y., Yang T.N. // Nanoscale Res. Lett. 2015. Vol. 10. N 1. P. 357. doi 10.1186/s11671-015-1069-y
13. Revathy R., Varmaa M.R., Surendran K.P. // Mater. Res. Bull. 2019. Vol. 120. P. 110576. doi 10.1016/j.materresbull.2019.110576
14. Pearce A.K., Wilks T.R., Arno M.C., O'Reilly R.K. // Nat. Rev. Chem. 2021. Vol. 5. P. 21. doi 10.1038/s41570-020-00232-7
15. Ren H.M., Guo Y., Huang S.Y., Zhang K., Yuen M.M.F., Fu X.Z., Yu S., Sun R., Wong C.P. // ACS Appl. Mater. Interfaces 2015. Vol. 7. P. 13685. doi 10.1021/acsomega.5b03571
16. Lee Y.I., Kim S., Jung S.B., Myung N.V., Choa Y.H. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2013. Vol. 5. N 13. P. 5908. doi 10.1021/am401757y
17. Joo S.J., Park S.H., Moon C.J., Kim H.S. // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2015. Vol. 7. P. 5674. doi 10.1021/am506765p
18. Wang S., Chen K., Wang M., Li H., Chen G., Liu J., Xu L., Jian Y., Meng C., Zheng X., Liu S., Yin C., Wang Z., Du P., Qu S., Leung C.W. // J. Mater. Chem. (C). 2018. Vol. 6. P. 4737. doi: 10.1039/c7tc05970a
19. Muangnapoh T., Srimara P., Vas-Umnuy P. // ACS Omega 2020. Vol. 5. P. 24584. doi 10.1021/acsomega.0c03077
20. Xia Z., Wen W. // Nanomaterials 2016. Vol. 6. N 1. P. 19. doi 10.3390/nano6010019
21. Cordente N., Respaud M., Senocq F., Casanove M.J., Amiens C., Chaudret B. // Nano Lett. 2001. Vol. 1. N 10. P. 565. doi 10.1021/nl0100522
22. Liu Z.P., Li S., Yang Y., Peng S., Hu Z.K., Qian Y.T. // Adv. Mater. 2003. Vol. 15. P. 1946. doi: 10.1002/adma.200305663
23. Логутенко О.А., Тутков А.И., Воробьев А.М., Юхин Ю.М., Ляхов Н.З. // Химия в интересах устойчивого развития. 2016. Т. 24. № 5. С. 619.
24. Logutenko O.A., Titkov A.I., Vorob'yov A.M., Yukhin Yu.M., Lyakhov N.Z. // J. Nanomater. 2016. Article ID 9058686. doi: 10.1155/2016/9058686
25. Mrad K., Schoenstein K., Nong H.T.T., Anagnostopoulou E., Viola A., Mouton L., Mercone S., Ricolleau C., Jouini N., Abderraba M., Lacroix L.-M., Viau G., Piquemal J.-Y. // Cryst. Eng. Commun. 2017. Vol. 19. P. 3476. doi 10.1039/C7CE00714K
26. Soulantica K., Chaudret B., Lacroix L.-M. Magnetic nano- and microwires: design, synthesis, properties and applications. 2020. P. 185. doi 10.1016/B978-0-08-102832-2.00007-4
27. Пронин А.С., Семенов С.А., Дробот Д.В., Волчкова Е.В., Джардималиева Г.И. // ЖНХ 2020. Т. 60. № 8. С. 1061; Pronin A.S., Semenov S.A., Drobot D.V., Volchkova E.V., Dzhardimalieva G.I. // Russ. J. Inorg.

- Chem. 2020. Vol. 65. N 8. P. 1073. doi 10.1134/S0036023620080136
28. *Ai D., Kang S.* // *Mater. Trans.* 2006. Vol. 47. N 8. P. 2056. doi 10.2320/matertrans.47.2056
29. *Cheng R., Qian L., Fa D., Miao Y.* // *Polyhedron* 2017. Vol. 138. P. 161. doi 10.1016/j.poly.2017.09.036
30. *Guo L., Liu C.M., Wang R.M., Xu H.B., Wu Z.Y., Yang S.H.* // *J. Am. Chem. Soc.* 2004. Vol. 126. N 14. P. 4530. doi 10.1021/ja039381h
31. *Park J.W., Chae E.H., Kim S.H., Li J.H., Kim J.W., Yoon S.M., Choi J.Y.* // *Mater. Chem. Phys.* 2006. Vol. 97. N 2–3. P. 371. doi 10.1016/j.matchemphys.2005.08.028
32. *Li Z., Su Y., Liu Y., Wang J., Geng H., Sharma P., Zhang Y.* // *Cryst. Eng. Commun.* 2014. Vol. 16. P. 8442. doi 10.1039/c4ce00868e
33. *Huelser T.P., Wiggers H., Ifeacho P., Dmitrieva O., Dumpich G., Lorke A.* // *Nanotechnology* 2006. Vol. 17. N 13. P. 3111. doi 10.1088/0957-4484/17/13/005
34. *Hucht A., Buschmann S., Entel P.* // *Europhys. Lett.* 2007. Vol. 77. P. 57003. doi 10.1209/0295-5075/77/57003
35. *Logutenko O.A., Titkov A.I., Vorob'yov A.M., Balaev D.A., Shaikhutdinov K.A., Semenov S.V., Yukhin Y.M., Lyakhov N.Z.* // *Eur. Polym. J.* 2018. Vol. 99. P. 102. doi 10.1016/j.eurpolymj.2017.12.017
36. *Gong C.H., Zhang Y., Zhang X., Yu L., Zhang P., Wu Z., Zhang Z.* // *J. Phys. Chem. (C).* 2010. Vol. 114. P. 10101. doi 10.1021/jp100697x

Synthesis of One-Dimensional Nanostructures by Reduction of Nickel Alkyl Carboxylates with Different Hydrocarbon Chain Lengths

A. M. Vorobyov, A. I. Titkov, and O. A. Logutenko*

*Institute of Solid State Chemistry and Mechanochemistry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences,
Novosibirsk, 630128 Russia
e-mail: ologutenko@solid.nsc.ru

Received November 12, 2021; revised December 7, 2021; accepted December 9, 2021

Nickel nanowires were obtained by reducing nickel alkyl carboxylates with hydrazine hydrate in ethylene glycol. An increase in the chain length of monocarboxylic acids leads to a decrease in the length of nanowires, but their average diameter changes insignificantly. The resulting particles were studied by X-ray phase analysis and electron microscopy.

Keywords: nickel, alkyl carboxylates, nanoparticles, ethylene glycol, hydrazine hydrate, reduction