

УДК 669.056.9:620.3

О СТРУКТУРООБРАЗУЮЩЕЙ РОЛИ КОМПОЗИТНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ

ВАГАНОВ В. Е., к. т. н., доц.

Кафедра литейного производства и конструкционных материалов, ФГБОУ ВПО "Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых", пр. Строителей, 11, г. Владимир, Владимирская обл., Россия, 600024, тел. +7 492 233-73-02, e-mail : vaganovv@bossmail.ru, ORCID ID : 0000-0002-4123-4036

Аннотация. Постановка проблемы. Развитие современной науки и техники предъявляет повышенные требования к материалам конструкционного и функционального назначения. Значительные успехи в этой области были достигнуты с развитием композиционных материалов (КМ) на основе металлов, полимеров, строительных цементных и гипсовых вяжущих. Наибольшее распространение получили металломатричные КМ, упрочненные высокомодульными армирующими частицами, волокнами, усами. По сравнению с традиционными сплавами КМ на их основе отличаются более высокими значениями удельной прочности и жесткости при сохранении или незначительном снижении электро- и теплопроводности, что обеспечивает им конкурентные преимущества в ряде отраслей науки и техники. Несмотря на постоянно возрастающий интерес к нанокompозитам на различной основе упрочненных углеродных наноструктур (УНС), систематических исследований и последующих технологических решений в данном направлении явно недостаточно. Это связано с новизной данной проблемы, а именно, с тем, что методы обращения с наноматериалами – управление размерами, структурой, фазовым составом, состоянием поверхности и т. д. находятся на стадии накопления фундаментальных знаний. Таким образом, разработка методов получения КМ, упрочненных УНС, и исследование их структуры и свойств является актуальной задачей, представляющей научный и практический интерес. **Цель работы** – получение углеродных наноматериалов заданной морфологии и структуры для последующего применения в композитных материалах. **Вывод.** В рамках единой материальной, методологической и приборной базы исследованы процессы структурообразования КМ, проведены исследования структуры и физико-механических свойств КМ.

Ключевые слова: композиционные материалы, углеродные наноструктуры, наноматериалы, структура, свойства, металл.

ПРО СТРУКТУРОУТВІРНУ РОЛЬ КОМПОЗИТНИХ НАНОМАТЕРІАЛІВ

ВАГАНОВ В. Є., к. т. н., доц.

Кафедра ливарного виробництва і конструкційних матеріалів, ФДБНЗ ВПО "Володимирський державний університет ім. О. Г. і М. Г. Столетових", пр. Будівельників, 11, м. Володимир, Володимирська обл., Росія, 600024, тел. +7 492 233-73-02, e-mail : vaganovv@bossmail.ru, ORCID ID : 0000-0002-4123-4036

Анотація. Постановка проблеми. Розвиток сучасної науки і техніки висуває підвищені вимоги до матеріалів конструкційного і функціонального призначення. Значних успіхів у цій галузі було досягнуто з розвитком композиційних матеріалів (КМ) на основі металів, полімерів, будівельних цементних і гіпсових в'язучих. Найбільшого поширення набули металоматричні КМ, зміцнені високомодульними армувальними частинками, волокнами, вусами. Порівняно з традиційними сплавами КМ на їх основі відрізняються більш високими значеннями питомої міцності і жорсткості в умовах збереження або незначного зниження електро- і теплопроводності, що забезпечує їм конкурентні переваги в ряді галузей науки і техніки. Незважаючи на постійно зростаючий інтерес до нанокompозитів на різній основі, зміцнених вуглецевих наноструктур (ВНС), систематичних досліджень і наступних технологічних рішень в даному напрямі явно недостатньо. Це пов'язано з новизною даної проблеми, а саме, з тим, що методи поводження з наноматеріалами – управління розмірами, структурою, фазовим складом, станом поверхні тощо перебувають на стадії накопичення фундаментальних знань. Таким чином, розроблення методів отримання КМ, зміцнених ВНС, і дослідження їх структури і властивостей є актуальним завданням, яке становить науковий і практичний інтерес. **Мета роботи** – отримання вуглецевих наноматеріалів заданої морфології та структури для подальшого застосування в композитних матеріалах. **Висновок.** У рамках єдиної матеріальної, методологічної та приладової бази досліджено процеси структуроутворення КМ, проведено дослідження структури і фізико-механічних властивостей КМ.

Ключові слова: композиційні матеріали, вуглецеві наноструктури, наноматеріали, структура, властивості, метал.

ABOUT STRUCTURE-FORMING ROLE OF COMPOSITE NANOMATERIALS

VAGANOV V. E., *Cand. Sc. (Tech.), Ass. of Prof.*

Department of foundry and construction materials, VPO "Vladimir State University named after A. G. and N. G. Stoletovs", Ave. Stroiteley, 11, Vladimir, Vladimir region, 600024, Russia, tel. +7 492 233-73-02, e-mail : vaganovv@bossmail.ru, ORCID ID : 0000-0002-4123-4036

Summary. Raising of problem. The development of modern science and technology places high demands on the materials of the structural and functional applications. Significant progress in this area has been achieved with the development of composite materials (CM) on the basis of metals, polymers construction of cement and gypsum binders. The most widely used metal-KM-reinforced high-modulus reinforcing particles, fibers, whiskers. Compared with conventional alloys KM based on them have higher values of specific strength and stiffness, while maintaining or slightly reducing electrical and thermal conductivity, which gives them a competitive advantage in a number of fields of science and technology. Despite the growing interest in the nanocomposites based on various reinforced carbon nanostructures (CNS), systematic research and subsequent technological solutions in this area is not enough. This is due to the novelty of the problem, namely the fact that the methods of treatment of nanomaterials - control the size, structure, phase composition, surface condition, etc. They are in the process of accumulation of basic knowledge. Thus, the development of methods for obtaining the CM, CNS strengthened, and the study of their structure and properties is an important task, representing the scientific and practical interest. **Purpose** – obtaining carbon nanomaterials predetermined morphology and structure for their preparation for the subsequent application in composite materials. **Conclusion.** Within the framework of a single material, methodological and instrument base, the processes of structure formation of the Cabinet, held comprehensive comparative study of the structure and mechanical properties of the CM.

Keywords: composite materials, carbon nanostructures, nanomaterials, structure, properties, metal.

Введение

Развитие современной науки и техники предъявляет повышенные требования к материалам конструкционного и функционального назначения. Значительные успехи в этой области были достигнуты с развитием композиционных материалов (КМ) на основе металлов, полимеров, строительных цементных и гипсовых вяжущих. Наибольшее распространение получили металломатричные КМ, упрочненные высокомолекулярными армирующими частицами, волокнами, усами. По сравнению с традиционными сплавами КМ на их основе отличаются более высокими значениями удельной прочности и жесткости при сохранении или незначительном снижении электро- и теплопроводности, что обеспечивает им конкурентные преимущества в ряде отраслей науки и техники.

Несмотря на постоянно возрастающий интерес к наноккомпозитам на различной основе, упрочненных углеродных наноструктур (УНС), систематических исследований и последующих технологических решений в данном направлении явно недостаточно [1–11]. Это связано с новизной данной проблемы, а именно, с тем, что методы обращения с наноматериалами – управление размерами, структурой, фазовым составом, состоянием поверхности и т. д. находятся на стадии накопления фундаментальных знаний.

Таким образом, разработка методов получения КМ, упрочненных УНС, и исследование их структуры и свойств является актуальной задачей, представляющей научный и практический интерес.

Цель работы – получение углеродных наноматериалов заданной морфологии и структуры для последующего применения в композитных материалах.

Материал и методики исследований

Объектом исследований являлись процессы формирования структуры и свойств композиционных материалов.

Исследования структуры композиционных материалов было проведено с применением современных методов структурного анализа: просвечивающей электронной микроскопии, (ПЭМ) JEM-2010; сканирующей электронной микроскопии (СЭМ): Quanta 200 3D, FEI Inc., Голландия; JSM-7600F.

Механические свойства полученных образцов КМ определяли с помощью универсальной испытательной машины Instron 5982. Исследования на трение без смазки и износ проводили по схеме осевого нагружения «палец (образец) – диск (контртело из стали 45 (HRC \geq 63))» на установке CETR UMT Multi-Specimen Test System. Температуропроводность определяли методом лазерной вспышки с помощью измерителя температуропроводности LFA 457/2/G MicroFlash.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Варьирование структурообразующими характеристиками УНТ проводилось путем их химической функционализации. Одним из способов управляемого регулирования структуры УНТ (а, соответственно, и тонкого варьирования

свойств) является их химическая модификация [12] как за счет создания дополнительных ковалентных связей (формирование на поверхности УНТ гетероатомных функциональных групп, например, атомов галогена, карбоксильной группы и др.), так и нековалентных (π - π) взаимодействий. По сравнению с исходными структурами модифицированные функциональными группами углеродные нанотрубки проявляют другие физические и физико-химические свойства, появляется возможность как их диспергации до отдельных трубок, так и формирование плотных сборок в один упорядоченный массив [5].

Существенной проблемой химической функционализации является то, что углеродные нанотрубки химически инертны, условия проведения процессов далеки от оптимальных, что зачастую приводит к образованию значительного количества дефектов и, тем самым, к потере уникальных свойств УНТ.

В данной работе рассмотрены аспекты ковалентной и нековалентной модификации многослойных углеродных нанотрубок. Общую схему модификации ковалентно связанными функциональными группами можно представить следующей схемой (рис. 1).

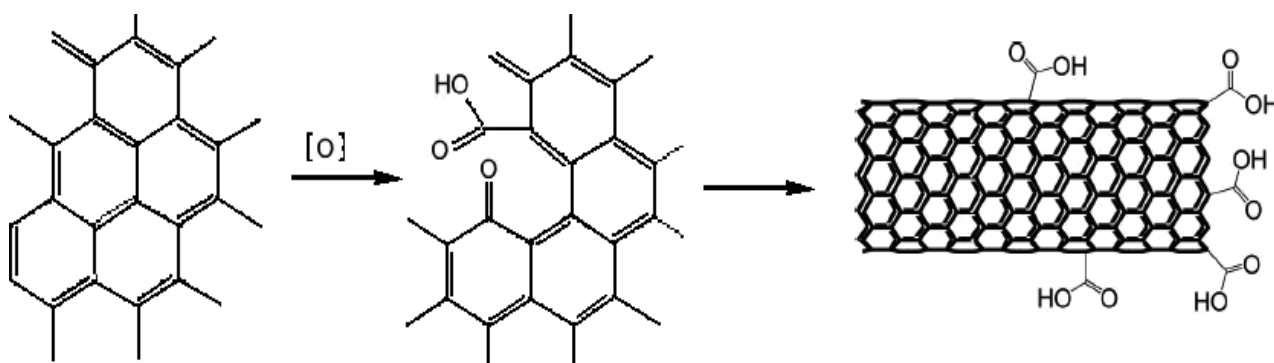


Рис. 1. Схема химической модификации ковалентно связанными функциональными группами в окислительных процессах / Fig. 1. Scheme of chemical modification is covalently bound functional groups in oxidative processes

Исходным этапом модификации выбрано окисление до образования карбоксильных групп. В качестве сопутствующих при этом образуются также карбонильные и гидроксильные фрагменты.

Карбоксилизацию многостенных углеродных нанотрубок (МУНТ) осуществляли путем воздействия различными окислительными агентами (азотная кислота в различных средах, соли хрома, марганца в высших степенях окисления, пероксид водорода). Были выбраны мягкие условия проведения процесса при использовании в качестве окислителя водного раствора азотной кислоты, что позволило рассчитывать на проведение процесса только по реакционноспособным фрагментам нанотрубок. Применение окислительных процессов в присутствии азотной кислоты позволило также решить еще одну проблему. В синтезированных УНТ в значимых количествах присутствуют аморфный углерод и следы катализатора, что может отрицательно влиять на свойства формируемого композиционного материала. Обработка азотной кислотой даже в незначительных количествах позволяет избавиться как от первого (окисляется и

выводится из системы), так и от второго (растворяется и уходит с водным раствором при промывке). Поскольку значительный интерес представляют функционализированные объекты со слабо нарушенной морфологией (как сохраняющие базовые свойства углеродных нанотрубок), то подразумевается введение сравнительно небольшого числа функциональных групп.

Это ограничение необходимо для исключения значительных изменений структуры трубки, появления большого числа разрывов стенок, полного освобождения от «шапочек» и др.

В указанном диапазоне условий, который приведен на графиках рисунка 2, отмечается варьирование степени функционализации по карбоксильной группе в диапазоне от 3,03 ммоль до 13,85 ммоль кислотного фрагмента на 100 г полученного продукта. При высших значениях изменяемых условий степень функционализации меняется незначительно, что может свидетельствовать об участии в процессе подавляющего большинства реакционных центров.

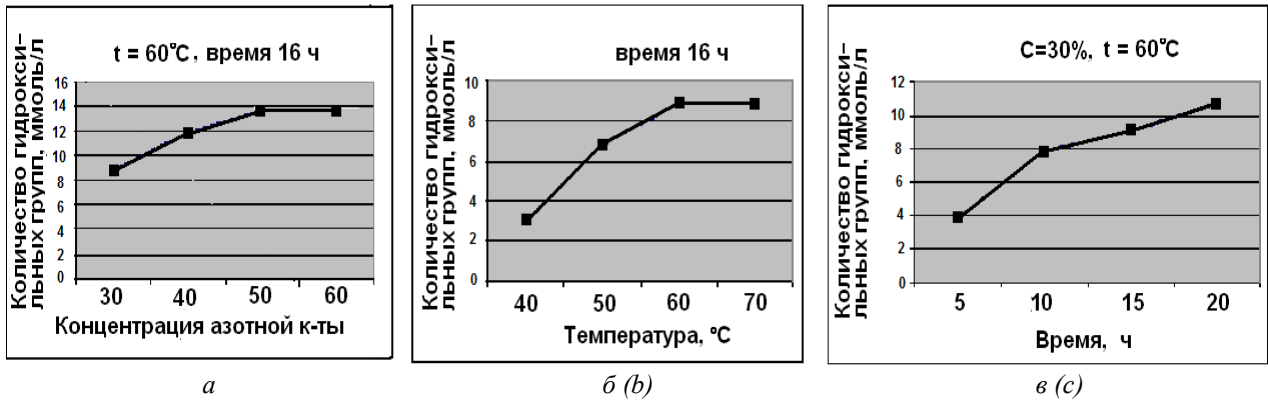


Рис. 2. Степень функционализации многостенных углеродных нанотрубок при окислении водным раствором азотной кислоты в зависимости от условий проведения процесса / Fig. 2. The degree of functionalization of multiwalled carbon nanotubes by oxidation with an aqueous solution of nitric acid, depending on the process conditions

Образование химических соединений подтверждено данными физико-химических методов анализа (потенциометрическое титрование, ИК-спектроскопия). Эти методы идеально подходят для контроля процессов функционализации УНТ, поскольку не требуют обязательного перенесения анализируемых объектов в раствор. На ИК-спектре можно наблюдать появление полосы поглощения с волновым числом $1\ 640\ \text{см}^{-1}$, соответствующей валентным колебаниям карбонильной группы, а также полосы с волновым числом $3\ 410\ \text{см}^{-1}$, которую можно отнести к валентным колебаниям гидроксильной группы.

Возможным и достаточно дешевым путем функционализации является формирование гидроксильных групп на поверхности УНТ. Их введение происходило при взаимодействии нанотрубок с расплавом гидроксида калия (температура плавления $280\ ^\circ\text{C}$). На ИК-спектре присутствует полоса поглощения гидроксильной группы при волновом числе $3\ 392,66\ \text{см}^{-1}$, а также полосы деформационных колебаний при волновом числе $800 - 1\ 300\ \text{см}^{-1}$. Количество щелочного остатка по оценке методом прямого титрования соляной кислотой составляет $12,47\ \text{ммоль}$ на $100\ \text{г}$ продукта.

Однако проведение процесса в столь жестких условиях приводит к значительной эрозии поверхности УНТ, появлению многочисленных спаек, что может существенно и не вполне предсказуемо изменить свойства углеродных нанообъектов и, соответственно, композитного материала, а также затрудняет диспергирование трубок.

Расширение возможностей манипуляции с УНТ в органических растворителях может быть

осуществлено путем формирования объемных органических заместителей на основе дальнейшего преобразования карбоксильных фрагментов. При этом следует отметить, что УНТ с различной структурой отличаются по возможностям формирования органической периферии.

Характеризуя немодифицированные УНТ, следует отметить, что их диаметр варьируется в диапазоне $10-20\ \text{нм}$. Следует также отметить отсутствие «шляпок» у некоторых образцов. При этом поверхность трубок имеет значительное количество дефектов, являющихся потенциальными реакционными центрами.

Введение периферийных групп ароматического характера осуществлялось путем взаимодействия паранитроанилина с углеродными нанотрубками. Ароматический компонент растворяли в $10\ \%$ растворе серной кислоты и охлаждали до $5-10\ ^\circ\text{C}$. Затем добавляли раствор нитрита натрия, охлажденного до такой же температуры. Спустя $20\ \text{минут}$ при постоянном перемешивании продукты диазотирования перемещали в трехгорлую колбу и добавляли углеродные нанотрубки.

Смесь нагревали до $60\ ^\circ\text{C}$ и спустя $4\ \text{часа}$, после остывания, отделяли фильтрованием под вакуумом, промывая сначала дистиллированной водой, а затем этанолом до обесцвечивания промывных вод.

На ИК-спектре продукта видно появление полос, характерных для паранитроанилина. В области $1\ 342, 1\ 554, 1\ 602, 1\ 627\ \text{см}^{-1}$ отмечены полосы поглощения, характерные для нитрозамещенного ароматического ядра. Это позволило предположить, что реализуется следующий процесс, представленный на рисунке 3.

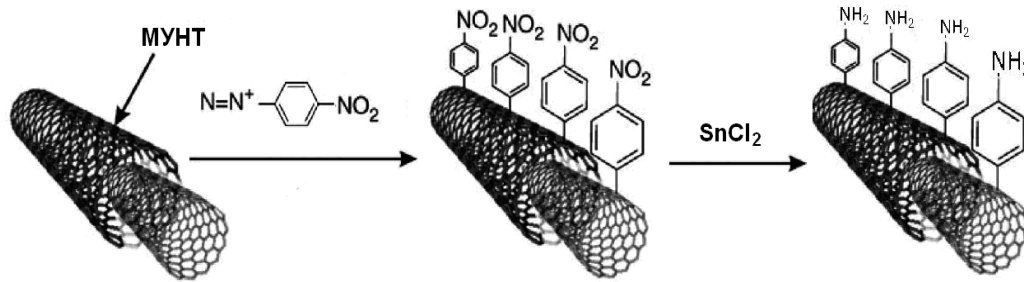


Рис. 3. Схема формирования периферийных групп ароматического характера / Fig. 3. The scheme of formation of peripheral groups of aromatic character

Исследования морфологии образовавшихся объектов с использованием метода электронной микроскопии представлены на рисунке 4. Прежде всего, можно отметить значительный диаметр трубчатых объектов до 100 нм и более. Причиной

этого может быть усиление взаимодействия многослойных УНТ после введения периферии ароматической природы, что зачастую наблюдается для нековалентных видов модификации УНТ карбо- и гетероаренами.

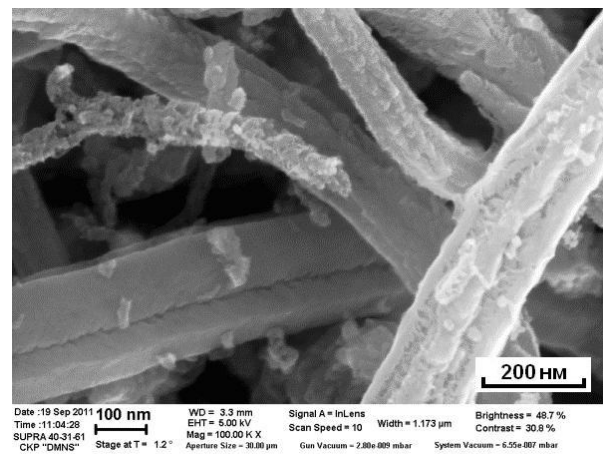
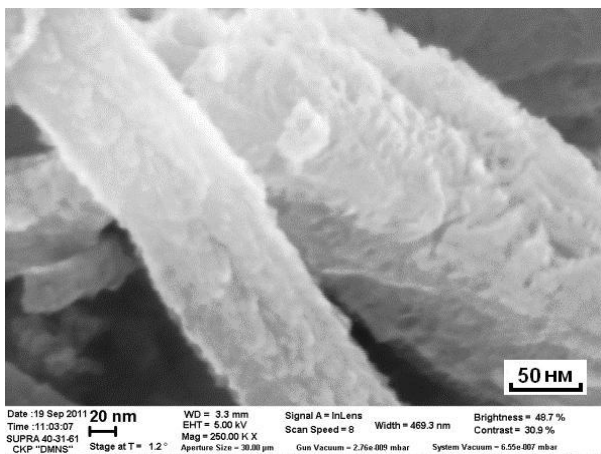


Рис. 4. МУНТ после взаимодействия с *n*-нитроанилином (диазотирование) / Fig. 4. MWCNT after interaction with *n*-nitroaniline (diazotization)

Определяли величины плотности, условного предела текучести, удельной прочности, твердости и температуропроводности алюмоматричных КМ АД0, упрочненных УНС.

Как видно из таблицы, максимальными прочностными характеристиками обладают КМ, содержащие поверхностно-активные вещества (ПАВ) и 8 об. % УНС. Относительная деформация всех исследуемых образцов при испытаниях на сжатие составила 12–15 %.

Таблица

Механические свойства алюмоматричных КМ, упрочненных УНС, полученных методом горячего прессования (290 °С, 650 МПа, 7 мин.) / The mechanical properties of aluminum-matrix КМ, UNS strengthened obtained by hot pressing (290°C, 650 MPa, 7 min.)

КМ	Условный предел текучести, МПа / Удельная прочность, км / Твердость, НВ					
	Концентрация УНС в КМ с ПАВ, об. %				Концентрация УНС в КМ без ПАВ, об. %	
	0	2	5	8	8	11
АД0 + C ₆₀	215/8,4/100	390/15,1/135	525/20,5/160	560/22,1/210	425/16,5/175	525/20,5/190
АД0 + УНТ		260/10,0/135	390/14,9/150	506/19,3/158	415/15,5/163	464/17,3/174
АД0 + УДА		270/10,5/136	295/11,4/151	317/12,1/158	290/10,9/140	300/11,4/143
АД0 + OLC		265/10,2/136	307/11,9/160	445/17,5/156	350/13,4/172	450/17,2/190
АД0 + Графит		250/9,7/114	400/15,7/129	525/20,5/167	365/14,0/156	430/16,5/167

Образцы, полученные с применением ПАВ, обладают более высокими прочностными характеристиками, что объясняется меньшим

размером кристаллитов и более равномерным распределением УНС по объему материала. Кроме того, квантово-химические расчеты показали, что

применение ПАВ способствует образованию прочных металлоуглеродных комплексов.

Повышение прочности (до 215 МПа) и твердости (до 100 HV) алюмоматричных КМ без УНС в основном объясняется измельчением зерен (эффект Холла–Петча), накоплением напряжений в кристаллической решетке и присутствием в матрице небольшого количества оксидов (до об. %) и других соединений. Увеличение механических свойств за счет введения УНС обусловлено дополнительным снижением размера кристаллитов алюминия, образованием прочных металлоуглеродных комплексов, многофазным и твердорастворным видами упрочнения. При этом очень важно отметить, что пластичность модифицированного алюминия сохраняется на достаточно высоком уровне.

Для практического применения полученных материалов кроме механических свойств также важны их транспортные свойства, в частности, температуропроводность. Как известно, температуропроводность материалов складывается из электронной и фононной составляющих. Для наноструктурных материалов уменьшение размера кристаллитов снижает температуропроводность КМ за счет рассеяния электронов и фононов на межкристаллитных границах, количество которых на несколько порядков больше, чем в макро- и микромаериалах.

Измерения показали, что температуропроводность полученных образцов оказалась

в ≈ 2 раза ниже ($40 \text{ мм}^2/\text{с}$), чем у исходного матричного сплава ($85 \text{ мм}^2/\text{с}$). Этот результат согласуется с аналогичными исследованиями других авторов для различных нанокристаллических материалов.

Несмотря на снижение температуропроводности при уменьшении размеров кристаллитов, УНС оказали влияние на эту характеристику. Например, для алюмоматричного КМ без УНС со средним размером кристаллитов 90 нм (удельная поверхность $25,6 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{кг}$) температуропроводность составила $\approx 40 \text{ мм}^2/\text{с}$. Можно предположить, что при дальнейшем уменьшении размеров кристаллитов до ≈ 40 нм (удельная поверхность $54 \cdot 10^3 \text{ м}^2/\text{кг}$) температуропроводность снизится еще больше. Однако измерения для КМ, содержащих 8 об. % УНС со средним размером кристаллитов 40–70 нм, показали, что они имеют температуропроводность $\approx 40 \text{ мм}^2/\text{с}$, т. е. не отличаются от сплава со средним размером кристаллитов 90 нм без УНС.

Механизм влияния УНС на транспортные свойства алюмоматричных КМ крайне сложен и включает в себя множество факторов, изучение которых не входит в рамки данного исследования.

Выводы. В рамках единой материальной, методологической и приборной базы исследованы процессы структурообразования КМ, проведены комплексные сравнительные исследования структуры и физико-механических свойств КМ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Laplaze D. Carbon nanotubes : the solar approach / D. Laplaze, P. Bernier, W. K. Maser, etc. // Carbon. – 1998. – Vol. 36. – № 5–6. – P. 685–688.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008622398000256>

2. Rodriguez N. M. A review of catalytically grown carbon nanofibers / N. M. Rodriguez // J. Mater. Res. – 1993. – Vol. 8. – № 12. – P. 3233–3250.

<http://journals.cambridge.org/action/displayAbstract?fromPage=online&aid=8169328&fileId=S0884291400072551>

3. Кечин В. А. Основные тенденции создания наноструктурированных материалов / В. А. Кечин, В. Е. Ваганов // *Металлургия и машиностроение*. – 2010. – № 2. – С. 27–30.

Kechin V. A., Vaganov V. E. Osnovnyye tendentsii sozdaniya nanostrukturirovannykh materialov [Main tendencies of creating nanostructured materials]. *Metallurgy and mechanical engineering*. – 2010. – № 2. – S. 27–30.

http://www.foundrymag.ru/mm_2010_02.html

4. Koyama T. Formation of Carbon Fibers from Benzene / T. Koyama // Carbon. – 1972. – Vol. 10. – № 6. – P. 757–758.

<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00086223>

5. Baird T. Carbon Formation on Iron and Nickel Foils by Hydrocarbon Pyrolysis—Reactions at 700 °C / T. Baird, J. R. Fryer, B. Grant // Carbon. – 1974. – Vol. 12. – № 5. – P. 591–602.

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008622374900608>

6. Oberlin A. Filamentous growth of carbon through benzene decomposition / A. Oberlin, M. Endo, T. Koyama // *J. of Crystal Growth*. – 1976. – Vol. 32. – P. 335–349.

<http://endomoribu.shinshu-u.ac.jp/member/papers.pdf>

7. Tibbets G. G. Carbon fibers produced by pyrolysis of natural gas in stainless steel tubes / G. G. Tibbets // *Appl. Phys. Lett.* – 1983. – Vol. 42. – P. 666–667.

<https://books.google.com.ua/books?id=MgHxCAAAQBAJ&pg=PA92&dq=Tibbets+G.+G.+Carbon+fibers+produced+by+pyrolysis+of+natural+gas+in+stainless+steel+tubes+Appl.+Phys.+Lett.+1983&hl=ru&sa=X&ved=0CC4Q6AEwAGoVChMIIThmpCiyAIVSI8sCh1SrAOF#v=onepage&q=Tibbets%20G.%20G.%20Carbon%20fibers%20produced%20by%20pyrolysis%20of%20natural%20gas%20in%20stainless%20steel%20tubes%20Appl.%20Phys.%20Lett.%201983&f=false>

8. G. G. Tibbets, Why Are Carbon Filaments Tubular / G. G. Tibbets // *Appl. Phys. Lett.* – 1984. – Vol. 66. – P. 632.

<https://books.google.com.ua/books?id=ammoVEI-H2gC&pg=PA190&dq=G.G.Tibbets.+Why+Are+Carbon+Filaments+Tubular&hl=ru&sa=X&ved=0CBoQ6AEwAGoVChMI1p aQpZGivAIVihIsCh1WMO51#v=onepage&q=G.G.Tibbets%20C%20Why%20Are%20Carbon%20Filaments%20Tubular&f=false>

9. Endo M. Formation of carbon nanofibers / M. Endo, H. W. Kroto // J. Phys. Chem. – 1992. – Vol. 96. – P. 6941–6944.

<https://books.google.com.ua/books?id=IXbsCAAAQBAJ&pg=PA169&dq=Endo+M.+Formation+of+carbon+nanofibers&hl=ru&sa=X&ved=0CCgQ6AEwAGoVChMIjvv6-ZGiyAIVSAssCh1dtgmm#v=onepage&q=Endo%20M.%20Formation%20of%20carbon%20nanofibers&f=false>

10. Charlier J. C. Microscopic growth mechanisms for carbon nanotubes / J. C. Charlier, A. De Vita, X. Blasé, etc. // Science. – 1997. – Vol. 275. – P. 646–649.

<https://books.google.com.ua/books?id=V132ZsSJyIC&pg=PA164&dq=Charlier+J.+C.+Microscopic+growth+mechanisms+for+carbon+nanotubes&hl=ru&sa=X&ved=0CDAQ6AEwAWoVChMIqpi-8pKiyAIVjAssCh163wMU#v=onepage&q=Charlier%20J.%20C.%20Microscopic%20growth%20mechanisms%20for%20carbon%20nanotubes&f=false>

11. Dai H. Probing electrical transport in nanomaterials: Conductivity of individual carbon nanotubes / H. Dai, E. W. Wong, C. M. Lieber // Science. – 1996. – Vol. 272. – P. 523–526.

<https://books.google.com.ua/books?id=UfBXDPdrAjUC&pg=PA153&dq=Dai+H.+Probing+electrical+transport+in+nanomaterials:+Conductivity+of+individual+carbon+nanotubes&hl=ru&sa=X&ved=0CCgQ6AEwAGoVChMIkqr2wZOiyAIVAo0sCh2AHAED#v=onepage&q=Dai%20H.%20Probing%20electrical%20transport%20in%20nanomaterials%3A%20Conductivity%20of%20individual%20carbon%20nanotubes&f=false>

12. Шибает Д. А. Химическая модификация углеродных нанотрубок / Д. А. Шибает, В. Ю. Орлов, Д. А. Базлов, В. Е. Ваганов // Известия вузов. Серия

«Химия и химические технологии». – 2011. – Т. 54. – № 7. – С. 38–41.

Shibaev D. A., Orlov V. Yu., Bazlov D. A., Vaganov V. E. Khimicheskaya modifikatsiya uglerodnykh nanotrubok [Chemical modification of carbon nanotubes]. Proceedings of the universities. A series of "Chemistry and chemical technology. – 2011. – Т. 54. – № 7. – P. 38–41. Available at:

[http://irbis.bti.secna.ru/cgi-bin/irbis64r_12/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21COM=S&I21DBN=MARS&P21DBN=MARS&S21FMT=infow_wh&S21ALL=\(%3C.%3EK%3D%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F%20%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%84%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F%3C.%3E\)&Z21ID=&S21SRW=AVHEAD&S21SRD=&S21STN=1&S21REF=10&S21CNR=30](http://irbis.bti.secna.ru/cgi-bin/irbis64r_12/cgiirbis_64.exe?LNG=&C21COM=S&I21DBN=MARS&P21DBN=MARS&S21FMT=infow_wh&S21ALL=(%3C.%3EK%3D%D1%85%D0%B8%D0%BC%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F%20%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D1%84%D0%B8%D0%BA%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F%3C.%3E)&Z21ID=&S21SRW=AVHEAD&S21SRD=&S21STN=1&S21REF=10&S21CNR=30)

13. Ваганов В. Е. Влияние углеродсодержащих наноструктур на оптические и физические свойства материалов, включая жидкие кристаллы / Н. В. Каманина, В. Е. Ваганов // Жидкие кристаллы. – 2010. – № 2. – С. 5–24.

Kamanina N. V., Vaganov V. E. Vliyanie uglerod-soderzhashchikh nanostruktur na opticheskiye i fizicheskiye svoystva materialov vklyuchaya zhidkiye kristally [Influence of carbon-containing nanostructures in the optical and physical properties of materials including liquid crystals] Liquid Crystals. – 2010. – № 2. – P. 5–24.

http://nano.ivanovo.ac.ru/journal/ru/articles/article.php?year=2010&issue=2&first_page=5

Статья рекомендована к публикации д-ром техн. наук, проф. В. И. Большаковым (Украина); д-ром техн. наук, проф. Ю. И. Дубровым (Украина)

Статья поступила в редколлегию 22.09.2015