









Б.Е. Жумадилов^{1,2} , А.К. Кенжегулов³ , Б.С. Медьянова¹ , А.Т. Оспанали¹ ,
Г.С. Суюндыкова¹ , Г. Партизан¹ , Е. Ерланұлы² , М.Т. Габдуллин^{2*} 

¹Лаборатория вакуумных нанотехнологий, Институт проблем горения, Казахстан, г. Алматы

²Казахско-Британский технический университет, Казахстан, г. Алматы

³АО «Институт металлургии и обогащения» при НАО «Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева», Казахстан, г. Алматы

*e-mail: gabdullin@physics.kz

СИНТЕЗ УГЛЕРОДНЫХ НАНОВОЛОКОН И АЛМАЗОПОДОБНЫХ УГЛЕРОДОВ МЕТОДОМ КИСЛОРОДНО-АЦЕТИЛЕНОВОЙ ГОРЕЛКИ

В данной работе представлен синтез углеродных нановолокон и алмазоподобных углеродов методом кислородно-ацетиленовой горелки. В качестве источника углерода был использован ацетилен, а в качестве катализатора были использованы металлические пленки, напыленные на кремниевые подложки. Морфологические и структурные свойства полученных углеродных наноматериалов были изучены с помощью сканирующей электронной микроскопии и спектроскопии комбинационного рассеяния света. При проведении экспериментов было изучено влияние продолжительности синтеза и соотношения концентраций газов на формирование структуры осаждаемых образцов. Алмазоподобный углерод был синтезирован при низкой скорости потока газов и коротком времени синтеза, а при увеличении этих параметров были получены углеродные нановолокна. Синтезированные углеродные нановолокна обладают цилиндрической формой с диаметром порядка 50 – 215 нм, при этом их длина достигает нескольких микрометров. Размеры алмазоподобных углеродов варьируются в пределах от 150 до 580 нм. Спектроскопия комбинационного рассеяния света определила, что углеродные нановолокна отличаются более хорошей степенью упорядоченности и графитизации. По результатам исследований, проведенных в данной работе, кислородно-ацетиленовая горелка может быть использована в качестве перспективной, низкочастотной альтернативой для крупномасштабного производства углеродных наноматериалов.

Ключевые слова: углеродные наноматериалы, углеродные нановолокна, алмазоподобный углерод, кислородно-ацетиленовая горелка, сканирующая электронная микроскопия, комбинационное рассеяние света.

B.E. Zhumadilov^{1,2}, A.K. Kenzhegulov³, B.S. Medyanova¹, A.T. Ospanali¹,
G.S. Suyundykova¹, G. Partizan¹, Ye. Yerlanuly², M.T. Gabdullin^{2*}

¹Laboratory of Vacuum Nanotechnology, Institute of Combustion Problems, Kazakhstan, Almaty

²Kazakh-British Technical University, Kazakhstan, Almaty

³Satbayev University, Institute of Metallurgy and ore beneficiation, Kazakhstan, Almaty

*e-mail: gabdullin@physics.kz

Synthesis of carbon nanofibers and diamond-like carbons by the oxygen-acetylene torch method

This work presents the synthesis of carbon nanofibers and diamond-like carbons by the oxygen-acetylene burner method. Acetylene was used as a carbon source, and metallic films sprayed on silicon substrates were used as a catalyst. The morphological and structural properties of the obtained carbon nanomaterials were studied by scanning electron microscopy and Raman spectroscopy. The influence of the synthesis duration and gas concentration ratio on the structure formation of the deposited samples was studied during the experiments. Diamond-like carbon was synthesized at low gas flow rates and short synthesis times, and carbon nanofibers were obtained when these parameters were increased. The synthesized carbon nanofibers have a cylindrical shape with a diameter of about 50 to 215 nm, and their length reaches several micrometers. The size of diamond-like carbons ranges from 150 to 580 nm. Raman spectroscopy determined that carbon

nanofibers have a better degree of ordering and graphitization. According to the results of the studies carried out in this work, the oxygen-acetylene burner can be used as a promising, low-cost alternative for the large-scale production of carbon nanomaterials.

Key words: carbon nanomaterials, carbon nanofibers, diamond-like carbon, oxygen-acetylene torch, scanning electron microscopy, Raman spectroscopy.

Б.Е. Жумадилов^{1,2}, А.К. Кенжегулов³, Б.С. Медьянова¹, А.Т. Оспанали¹,

Г.С. Суюндыкова¹, Г. Партизан¹, Е. Ерланұлы², М.Т. Габдуллин^{2*},

¹Вакуумдық нанотехнологиялар зертханасы, Жану проблемалары институты, Қазақстан, Алматы қ.

²Қазақстан-Британ техникалық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

³Сәтбаев университеті, Металлургия және кен байыту институты, Қазақстан, Алматы қ.

*email: gabdullin@physics.kz

Оттегі-ацетиленді жанарғы әдісімен көміртекті наноталшықтарды және алмаз тәріздес көміртекті синтездеу

Бұл жұмыста оттегі-ацетиленді жанарғы әдісімен көміртекті наноталшықтар мен алмаз тәрізді көміртектің синтезі ұсынылған. Көміртегінің көзі ретінде ацетилен пайдаланылды, ал кремний төсенішінің бетіне тозаңдатылған металл қабыршықтары катализатор ретінде қолданылды. Алынған көміртекті наноматериалдардың морфологиялық және құрылымдық қасиеттері сканерлеуші электронды микроскопия және жарықтың комбинациялық шашырау спектроскопиясы көмегі арқылы зерттелінді. Эксперименттер жүргізу барысында тұндырылған үлгілердің құрылымын қалыптастыруға синтез ұзақтығы мен газ концентрациясының арақатынасының әсері зерттелінді. Алмаз тәрізді көміртектің газ ағынының төменгі жылдамдық барысында және синтездің қысқа уақыт кезінде синтезделді, ал бұл параметрлер жоғарылаған кезде көміртекті наноталшықтар алынды. Синтезделген көміртекті наноталшықтардың диаметрі шамамен 50 – 215 нм болатын цилиндрлік пішінге ие, сонымен қатар олардың ұзындығы бірнеше микрометрге жетеді. Алмаз тәрізді көміртектің мөлшері шамамен 150-ден 580 нм-ге дейін өзгереді. Жарықтың комбинациялық шашырау спектроскопиясы көміртекті наноталшықтардың реттілік пен графиттенудің айтарлықтай жақсы дәрежесімен ерекшеленетінін анықтады. Осы жұмыста жүргізілген талдаулардың зерттеу нәтижелері бойынша оттегі-ацетиленді жанарғы көмегімен көміртекті наноматериалдарды ауқымды өндіру үшін перспективті және арзан балама ретінде пайдаланылуы мүмкін.

Түйін сөздер: көміртекті наноматериалдар, көміртекті наноталшықтар, алмаз тәрізді көміртекті, оттегі-ацетиленді жанарғы, сканерлеуші электронды микроскопия, жарықтың комбинациялық шашырауы.

Введение

Углеродные наноматериалы (УНМ) стремительно развиваются в связи с ростом потребностей во многих направлениях, в числе которых индустрия, сельское хозяйство, здравоохранение и радиоэлектроника [1-3]. В настоящее время известны девять аллотропных модификаций углерода, такие как графен, фуллерен, нанотрубки, нановолокна, наноалмазы [4-6] и т.д. Углеродные нановолокна (УНВ) представляют собой цилиндрические наноструктуры с графеновыми слоями, расположенными в виде уложенных конусов [7]. УНВ обладают превосходными механическими и химическими свойствами, также отличаются небольшим весом, простотой обработки, стойкостью к коррозии и хорошей армирующей

способностью [8, 9]. Алмазоподобный углерод (АПУ – один из видов аморфного углерода, который демонстрирует ряд характерных свойств алмаза [10]. Пленки АПУ отличаются высокой твердостью, значительной износостойкостью, низким коэффициентом трения, химической стабильностью, хорошими газобарьерными свойствами, антигорючими свойствами, высокой биосовместимостью [10, 11]. Благодаря своим уникальным электронным, механическим и физико-химическим свойствам УНМ нашли обширное применение в электронной технике [12], хранении энергии [13], композитных материалах [14], биомедицине [15], энергетике [16] и в машиностроении [17].

Существуют различные методы и технологии синтеза УНМ, такие как химическое осаждение из газовой фазы CVD [18, 19], плазменно-

химическое осаждение из газовой фазы PECVD [20, 21], лазерная абляция [22, 23], дуговой разряд [24, 25], пиролиз [26, 27], электроспиннинг [28, 29], плазменная струя [30, 31] и т.д. Однако некоторые из этих методов требуют особых технологических условий, таких как использование дорогостоящих высокотемпературных плазменных оборудовании, большие энергозатраты и низкий выход являются препятствиями для применения плазменных технологий в промышленности [32, 33]. В этой связи создание и совершенствование недорогого и высокопроизводительного метода получения УНМ является одной из наиболее приоритетных задач.

Кислородно-ацетиленовая горелка является не дорогим и перспективным методом осаждения УНМ благодаря своим превосходным характеристикам, таким как высокая скорость осаждения, возможность проведения осаждения на открытом воздухе, простота конструкции оборудования и т.д. Данный метод имеет потенциал для непрерывного производства в больших объемах при сниженных затратах по сравнению с другими методами [33, 34]. Учитывая вышеизложенное, в данной работе

исследован синтез различных УНМ методом кислородно-ацетиленовой горелки, а также изучено влияние металлических катализаторов на формирование структуры.

Материалы и методы

Схема экспериментальной установки представлено в работе [35] Установка состоит из двух кислородно-ацетиленовых горелок, держателя подложки с водяным охлаждением и двух массовых расходомеров газа. Прежде всего, образцы кремния марки BPS-20 очищали химическим методом в ультразвуковой ванне, в растворе смеси гидрата аммиака (NH_4OH), перекись водорода (H_2O_2) и дистиллированной воды в соотношении объёма 1:1:4.

Напыление металлических покрытий на поверхности кремниевой пластины проводились с помощью магнетронного метода. На рисунке 1 представлено СЭМ изображение поперечного сечения тонкой медной и никелевой пленки на кремниевой подложке, толщина медной пленки составляет 446,8 нм (рис. 1а), толщина никелевой пленки составляет 427,4 нм (рис. 1б).

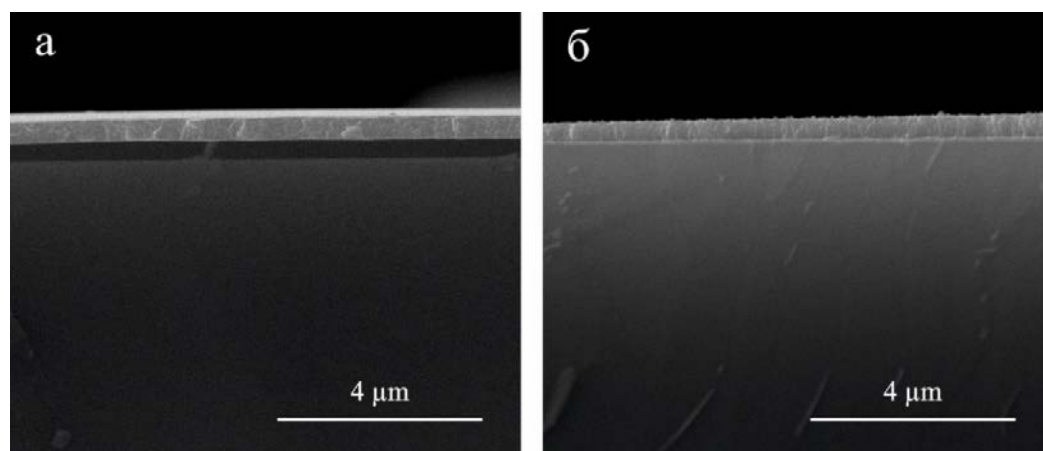


Рисунок 1 – СЭМ изображение поперечного сечения тонкой металлической пленки на кремниевой подложке: а – медь, б – никель

Ряд экспериментов был осуществлен на кремниевой пластине с тонкой пленкой металлического катализатора, в которой параметры синтеза составило: расстояние от сопла горелки до подложки $h = 4$ мм, диаметр сопла – 1,0 мм, длительность напыления $t = 15$ мин, 45 мин, угол наклона фронта пламени $\alpha = 90^\circ$, соотношение концентраций кислорода и ацетилена $\text{O}_2/\text{C}_2\text{H}_2 = 0.90, 0.92$. В смеси газов, использовавшихся для создания пламени, имеется избыток ацетилена над кислородом.

Избыток ацетилена образует так называемое ацетиленовое перо, в котором происходят сложные химические реакции [33, 34]. Параметры синтеза показаны в таблице 1.

Для характеристики морфологии поверхности и структурное качество полученных образцов исследовали методами сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) Quanta 3D 200i и комбинационного рассеяния света (КРС) NT-MDT Tegra Spectra (длина волны лазерного излучения $\lambda = 473$ нм).

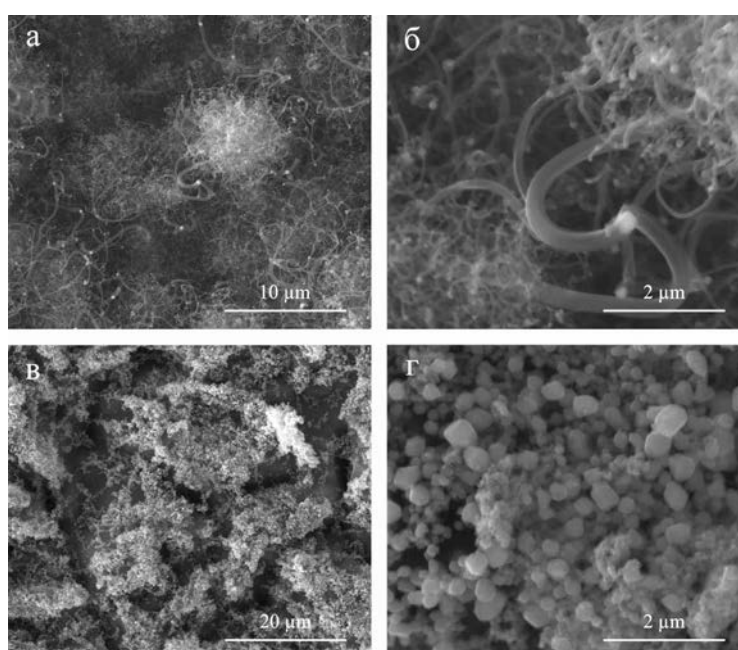
Таблица 1 – Параметры синтеза углеродных наноматериалов методом кислородно-ацетиленовой горелки

Эксперимент	CNMs	<i>h</i> , мм	<i>t</i> , мин	Расход O ₂ , slpm	Расход C ₂ H ₂ , slpm	C, O ₂ /C ₂ H ₂	Катализатор
№ 1	CNFs	4	45	0.27	0.30	0.90	Cu
№ 2	DLC	4	15	0.23	0.25	0.92	Ni

Результаты и обсуждение

На рисунке 2 представлены СЭМ изображения УНВ и АПУ, полученных методом кислородно-ацетиленовой горелки. Морфология УНВ, синтезированных в эксперименте № 1 показана на рисунке 2а, б. Из

СЭМ изображения видно, что на поверхности подложки были осаждены волокнистые структуры. Синтезированные УНВ имеют цилиндрическую форму с диаметром порядка от 50 до 215 нм. По наблюдениям СЭМ, длина УНВ достигает нескольких микрометров.

**Рисунок 2** – СЭМ изображение УНМ: а, б – УНВ; в, г – АПУ

СЭМ-изображения поверхности АПУ показана на рисунке 2в, г, осажденных в эксперименте № 2. СЭМ-изображения показывают, что полученные углеродные структуры, имеют четкие кристаллографические форму и можно заметить присутствие множественных двойников, а также наличие вторичного роста, т.е. кристаллов, зародившихся на ранее существовавших кристаллах. Размер отдельных кристаллитов варьируется порядка от 150 до 580 нм.

Далее были проведены анализы КРС полученных образцов. На рисунке 3 показан спектры комбинационного рассеяния УНВ и АПУ, синтезированных методом кислородно-ацетиленовой горелки. Данные анализа

рамановской спектроскопии показаны в таблице 2.

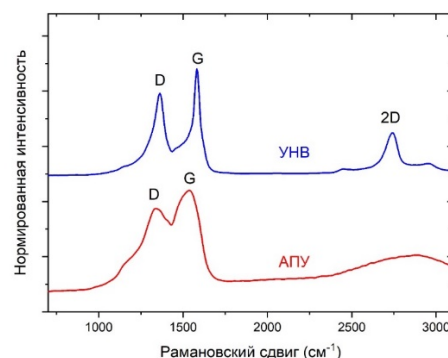
**Рисунок 3** – Рамановская спектроскопия УНМ: УНВ, АПУ

Таблица 2 – Данные анализа рамановской спектроскопии.

	УНВ	АПУ
G peak position	1581,80	1540,36
D peak position	1363,09	1330,51
2D peak position	2742,02	-
FWHM G	39,62	186,82
FWHM D	85,53	219,74
I(D)/I(G)	0,71	0,86
I(2D)/I(G)	0,39	-

Спектры КРС УНВ характеризуются интенсивным D-модом около 1363 см^{-1} . Хорошо известно, что D-мода тесно связана с неупорядоченными структурами в углеродных материалах. G мода проявляется при 1582 см^{-1} , что свидетельствует о наличии в УНВ графитоуглерода [36, 37]. Вторая область спектра образца состоит из 2D мода. На основании наличия отчетливо выраженного 2D пика и меньшего отношения интенсивности D и G пика ($I(D)/I(G) = 0,71$) можно предположить, что УНВ, полученные методом кислородно-ацетиленовой горелки на кремниевой подложке в эксперименте №1, имеют хорошую степень упорядоченности и графитизации.

Рамановские спектры образца полученных в эксперименте №2, показан на рисунке 3. На этом рисунке виден сильный пик при 1330 см^{-1} (D-полоса), что подтверждает преобладающее присутствие фазы кубического алмаза. Широкий фон при 1540 см^{-1} (G-полоса) обусловлен аморфным углеродом, который

всегда присутствует в небольших количествах [38, 39]. Это позволяет предположить, что синтезированные пленки являются типичными пленками алмазоподобного углерода.

Заключение

В ходе исследования, кислородно-ацетиленовая горелка была использована для получения УНВ и АПУ при различных параметрах синтеза. Ацетилен в качестве источника углерода и металлические пленки в качестве катализатора были использованы для синтеза УНМ. Синтез УНВ длился 45 мин, пленка меди использовался в качестве катализатора. На изображениях СЭМ видны волокнистые структуры с диаметром от 50 до 215 нм. Были также синтезированы АПУ при 15 мин времени синтеза, с размером от 150 до 580 нм, в качестве катализатора был использован пленка никеля. Рамановская спектроскопия подтвердил образование УНВ и АПУ. УНВ отличаются более хорошей степенью упорядоченности и графитизации. Данные результаты дают возможность для промышленного синтеза УНМ, так как кислородно-ацетиленовая горелка является относительно простым и экономически выгодным методом.

Благодарности

Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № AP08856684).

Литература

1. Luo, Mingchuan, and Shaojun Guo. Strain-controlled electrocatalysis on multimetallic nanomaterials // *Nature Reviews Materials*. – 2017. – Vol. 2(11). – P. 1-13.
2. Yang Y. et al. Graphene-based materials with tailored nanostructures for energy conversion and storage // *Mater. Sci. Eng. R Reports*. – 2016. – Vol. 102. – P. 1-72.
3. Tae-Hee H. et al. Extremely efficient flexible organic light-emitting diodes with modified graphene anode // *Nat. Photonics*. – 2012. – Vol. 6(2). – P. 105-110.
4. Villarreal, Claudia C., et al. Carbon allotropes as sensors for environmental monitoring // *Current Opinion in Electrochemistry*. – 2017. – Vol. 3(1). – P.106-113.
5. Nasir, Salisu, et al. Carbon-based nanomaterials/allotropes: A glimpse of their synthesis, properties and some applications // *Materials*. – 2018. – Vol. 11(2). – P. 295.
6. Islam, Md Saidul, Yuta Shudo, and Shinya Hayami. Energy conversion and storage in fuel cells and super-capacitors from chemical modifications of carbon allotropes: State-of-art and prospect // *Bulletin of the Chemical Society of Japan*. – 2022. – Vol. 95(1). – P. 1-25.
7. Suarez-Martinez, Irene, Nicole Grobert, and Christopher Ewels. Nomenclature of sp² carbon nanoforms // *Carbon*. – 2011. – Vol. 50. – P. 741-747.
8. Sebastia´n D., Suelves I., La´zaro M.J., Moliner R. Carbon nanofibers as electrocatalyst support for fuel cells: effect of hydrogen on their properties in CH₄ decomposition // *Power Sources*. – 2009. – Vol. 192. – P. 51-56.

9. Sebastia'n D., Ruiz A.G., Suelves I., Moliner R., La'zaro M.J. On the importance of the structure in the electrical conductivity of fishbone carbon nanofibers // *Mater. Sci.* – 2013. – Vol. 48. – P. 1423-1435.
10. Lu, Yimin, et al. Fabrication and applications of the optical diamond-like carbon films: a review // *Journal of Materials Science.* – 2022. – Vol. 48. – P. 1-22.
11. Love, C. A., et al. Diamond like carbon coatings for potential application in biological implants—a review // *Tribology International.* – 2013. – Vol. 63. – P. 141-150.
12. Jariwala, Deep, et al. Carbon nanomaterials for electronics, optoelectronics, photovoltaics, and sensing // *Chemical Society Reviews.* – 2013. – Vol. 42.7. – P. 2824-2860.
13. Pumera, Martin. Graphene-based nanomaterials for energy storage // *Energy & Environmental Science.* – 2011. – Vol. 4(3). – P. 668-674.
14. Ku, Sook Hee, Minah Lee, and Chan Beum Park. Carbon-based nanomaterials for tissue engineering // *Advanced healthcare materials.* – 2013. – Vol. 2(2). – P. 244-260.
15. Teradal, Nagappa L., and Raz Jelinek. Carbon nanomaterials in biological studies and biomedicine // *Advanced healthcare materials.* – 2017. – Vol. 6(17). – P. 1700574.
16. Menéndez-Manjón, Ana, et al. Nano-energy research trends: bibliometrical analysis of nanotechnology research in the energy sector // *Journal of Nanoparticle Research.* – 2011. – Vol. 13(9). – P. 3911-3922.
17. Ndukwu, M. C., et al. Nanomaterials application in greenhouse structures, crop processing machinery, packaging materials and agro-biomass conversion // *Materials science for energy technologies.* – 2020. – Vol. 3. – P. 690-699.
18. Yu, Jingxue, et al. Synthesis of high quality two-dimensional materials via chemical vapor deposition // *Chemical science.* – 2015. – Vol. 6(12). – P. 6705-6716.
19. Choi, Dong Sung, et al. Low-temperature chemical vapor deposition synthesis of Pt–Co alloyed nanoparticles with enhanced oxygen reduction reaction catalysis // *Advanced materials.* – 2016. – Vol. 28(33). – P. 7115-7122.
20. Liu, Rulin, et al. Synthesis of carbon nanowall by plasma-enhanced chemical vapor deposition method // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology.* – 2014. – Vol. 14(2). – P. 1647-1657.
21. Nozaki, Tomohiro, et al. A pressure-dependent selective growth of single-walled and multi-walled carbon nanotubes using plasma enhanced chemical vapor deposition // *Carbon.* – 2010. – Vol. 48(1). – P. 232-238.
22. Ismail, Raid A., et al. Preparation and characterization of carbon nanotubes by pulsed laser ablation in water for optoelectronic application. // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures.* – 2020. – Vol. 119. – P. 113997.
23. Ganash, Entesar A., Ghaliah A. Al-Jabarti, and Reem M. Altuwirqi. The synthesis of carbon-based nanomaterials by pulsed laser ablation in water // *Materials Research Express.* – 2019. – Vol. 7(1). – P. 015002.
24. Zhang, Da, et al. Controllable synthesis of carbon nanomaterials by direct current arc discharge from the inner wall of the chamber // *Carbon.* – 2019. – Vol. 142. – P. 278-284.
25. Corbella, Carles, et al. "Pulsed anodic arc discharge for the synthesis of carbon nanomaterials." // *Plasma Sources Science and Technology* 28.4 (2019): 045016.
26. Yao, Dingding, and Chi-Hwa Wang. Pyrolysis and in-line catalytic decomposition of polypropylene to carbon nanomaterials and hydrogen over Fe-and Ni-based catalysts // *Applied Energy.* – 2020. – Vol. 265. – P. 114819.
27. Zhang, Shun, et al. Sustainable production of value-added carbon nanomaterials from biomass pyrolysis // *Nature Sustainability.* – 2020. – Vol. 3(9). – P. 753-760.
28. Shi, Xiaomin, et al. Electrospinning of nanofibers and their applications for energy devices // *Journal of Nanomaterials.* – 2015. – Vol. 2015. – P. 20.
29. Ding, Yichun, et al. Electrospun polyimide nanofibers and their applications // *Progress in Polymer Science.* – 2016. Vol. 61. – P. 67-103.
30. Kuok, Fei-Hong, et al. Application of atmospheric-pressure plasma jet processed carbon nanotubes to liquid and quasi-solid-state gel electrolyte supercapacitors // *Applied Surface Science.* – 2017. – Vol. 425. – P. 321-328.
31. Fronczak, Maciej, et al. Continuous and catalyst free synthesis of graphene sheets in thermal plasma jet // *Chemical Engineering Journal.* – 2017. – Vol. 322. – P. 385-396.
32. Zhang, Biao, et al. Recent advances in electrospun carbon nanofibers and their application in electrochemical energy storage // *Progress in Materials Science.* – 2016. – Vol. 76. – P. 319-380.
33. Oulanti, Hanae, et al. Growth of carbon nanotubes on carbon fibers using the combustion flame oxy-acetylene method // *Carbon.* – 2015. – Vol. 95. – P. 261-267.
34. Liu, Ting-Chi, and Yuan-Yao Li. Synthesis of carbon nanocapsules and carbon nanotubes by an acetylene flame method // *Carbon.* – 2006. Vol. 44(10). – P. 2045-2050.
35. Zhumadilov, Bauyrzhan, et al. Synthesis of carbon nanostructures on copper films by the method of oxy-acetylene torch // *Materials Today: Proceedings.* – 2020. – Vol. 31. – P. 412-416.

36. Kim, Yoong A., et al. Carbon nanofibers // Springer handbook of nanomaterials. Springer, Berlin, Heidelberg. – 2013. – P. 233-262.
37. Lei, Shu-mei, et al. Deposition of carbon nanofibers on a low carbon steel substrate using an oxy-acetylene reducing flame // New Carbon Materials. – 2007. – Vol. 22(1). – P. 70-73.
38. Pang, Hua, et al. Characterization of diamond-like carbon films by SEM, XRD and Raman spectroscopy // Applied surface science. – 2010. – Vol. 256(21). – P. 6403-6407.
39. Ray, Sekhar C., W. F. Pong, and P. J. T. S. F. Papakonstantinou. Iron, nitrogen and silicon doped diamond like carbon (DLC) thin films: A comparative study // Thin Solid Films. – 2016. – Vol. 610. – P. 42-47.

References

1. M. Luo, and G. Shaojun, Nature Reviews Materials 2.11, 1-13 (2017).
2. Y. Yang et al., Mater. Sci. Eng. R Reports 102, 1-72 (2016).
3. H. Tae-Hee et al., Nat. Photonics 6.2, 105-110 (2012).
4. C.C. Villarreal, et al., Current Opinion in Electrochemistry 3.1, 106-113 (2017).
5. S. Nasir, et al., Materials 11.2, 295 (2018).
6. Islam, Md Saidul, Yuta Shudo, and Shinya Hayami, Bulletin of the Chemical Society of Japan 95.1, 1-25 (2022).
7. I. Suarez-Martinez, N. Grobert, and C. Ewels, Carbon. 50, 741-747 (2011).
8. D. Sebastián, I. Suelves, M.J. La´zaro, R. Moliner, Power Sources 192, 51-56 (2009).
9. D. Sebastián, A.G. Ruiz, I. Suelves, R. Moliner, M.J. La´zaro, Mater. Sci. 48, 1423-1435 (2013).
10. Y. Lu, et al., Journal of Materials Science 1-22 (2022).
11. C.A. Love, et al., Tribology International 63, 141-150 (2013).
12. D. Jariwala, et al., Chemical Society Reviews 42.7, 2824-2860 (2013).
13. M. Pumera, Energy & Environmental Science 4.3, 668-674 (2011).
14. S. Hee Ku, et al., Advanced healthcare materials 2.2, 244-260 (2013).
15. N.L. Teradal and J. Raz, Advanced healthcare materials 6.17, 1700574 (2017).
16. A. Menéndez-Manjón, et al., Journal of Nanoparticle Research 13.9, 3911-3922 (2011).
17. M.C. Ndukwu, et al., Materials science for energy technologies 3, 690-699 (2020).
18. J. Yu, et al., Chemical science 6.12, 6705-6716 (2015).
19. D.S., Choi, et al., Advanced materials 28.33, 7115-7122 (2016).
20. R. Liu, et al., Journal of Nanoscience and Nanotechnology 14.2, 1647-1657 (2014).
21. T. Nozaki, et al., Carbon 48.1, 232-238 (2010).
22. R. A. Ismail, et al., Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures 119, 113997 (2020).
23. E.A. Ganash, et al., Materials Research Express 7.1, 015002 (2019).
24. D. Zhang, et al., Carbon 142, 278-284 (2019).
25. C. Corbella, et al., Plasma Sources Science and Technology 28.4, 045016 (2019).
26. D. Yao, and Chi-Hwa Wang. Applied Energy 265, 114819 (2020).
27. S. Zhang, et al., Nature Sustainability 3.9, 753-760 (2020).
28. X. Shi, et al., Journal of Nanomaterials 2015, 20 (2015).
29. Y. Ding, et al., Progress in Polymer Science 61, 67-103 (2016).
30. Fei-Hong Kuok, et al., Applied Surface Science 425, 67-103 (2017).
31. M. Fronczak, et al., Chemical Engineering Journal 322, 385-396 (2017).
32. B. Zhang, et al., Progress in Materials Science 76, 319-380 (2016).
33. H. Oulanti, et al., Carbon 95, 261-267 (2015).
34. Ting-Chi Liu, and Yuan-Yao Li. Carbon 44.10, 2045-2050, (2006).
35. B. Zhumadilov, et al., Materials Today: Proceedings. 31. 412-416 (2020).
36. Y.A. Kim, et al., Springer handbook of nanomaterials, (Springer, Berlin, Heidelberg, 2013), pp.233-262.
37. Shu-mei Lei, et al., New Carbon Materials 22.1, 70-73 (2007).
38. H. Pang, et al., Applied surface science 256.21, 6403-6407 (2010).
39. S.C. Ray, et al., Thin Solid Films 610, 42-47 (2016).