

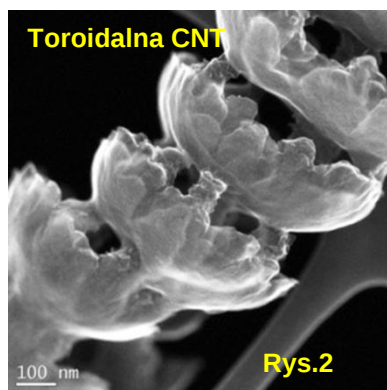
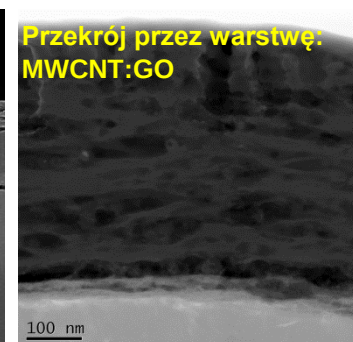
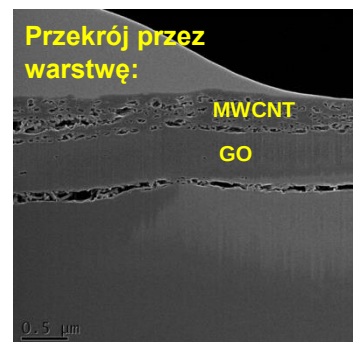
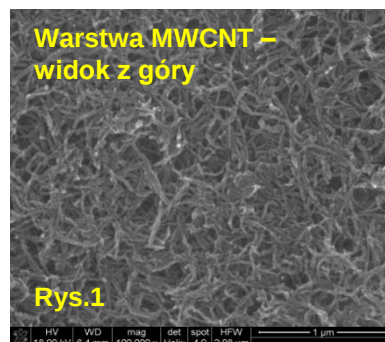
SyntCarbon



Badania

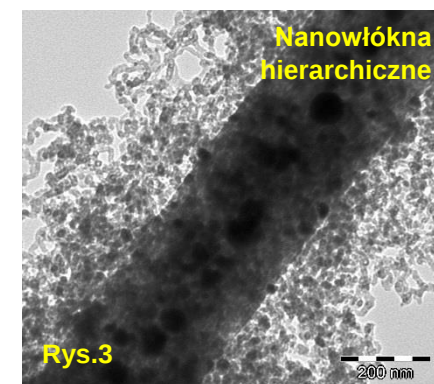
Badania prowadzone w zespole dotyczą zagadnień, w których główną rolę odgrywają syntetyczne materiały węglowe, czyli materiały które powstają w wyniku obróbki termicznej, czy też pirolizy prekursorów organicznych zarówno stałych, ciekłych jak i gazowych. W wyniku tych procesów uzyskuje się zarówno materiały w skali nanomaterycznej jak nanorurki węglowe (CNTs), nanowłókna węglowe (CNFs), jak również włókna węglowe, warstwy pirolityczne czy warstwy typu DLC, węgle aktywne, czy też kompozyty i nanokompozyty węglowe. W obszarze zainteresowań naszej grupy są w zasadzie wszystkie z wymienionych rodzajów węgla, przy czym szczególną uwagę skupiamy na nanomateriałach węglowych w tym CNTs ich modyfikacji, celem której jest nadanie pożądanych właściwości użytkowych. Dzięki procesom zróżnicowanej funkcjonalizacji chemicznej, otwieramy drogę dla wielu potencjalnych zastosowań, zarówno z zakresu przemysłu, czy elektroniki, jak i dla wytwarzania zaawansowanych rozwiązań biomedycznych. W obszarze naszych zainteresowań znajdują się m.in. zagadnienia

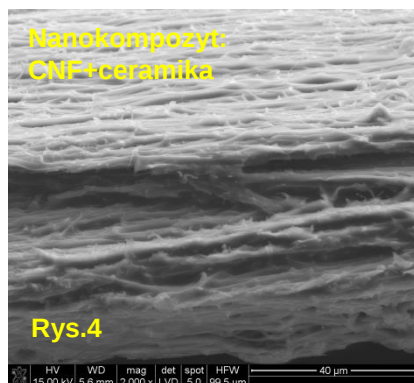
z obszaru inżynierii tkankowej, umożliwiające regenerację tkanek o niskim potencjale regeneracyjnym, jak tkanka kostna, chrzęstna, nerwowa czy mięśniowa. W tym obszarze stosowane są zarówno nanomateriały o różnym stopniu i rodzaju funkcjonalizacji, nanomateriały w postaci warstw na podłożach metalicznych (Rys.1), jak również układy trójwymiarowe uzyskiwane m.in. metodą druku 3D, biodruku oraz elektroprzędzenia.



W obszarze naszych zainteresowań są również prace prowadzone w kierunku syntezy nowych nanostruktur węglowych, takich jak toroidalne nanorurki węglowe (Rys.2), grafen i nanorurki węglowe o pożądanych właściwościach fizykochemicznych, otrzymywane z rozkładu wielopierścienionych węglowodorów aromatycznych (WWA).

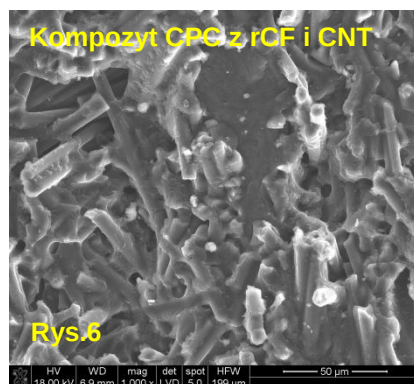
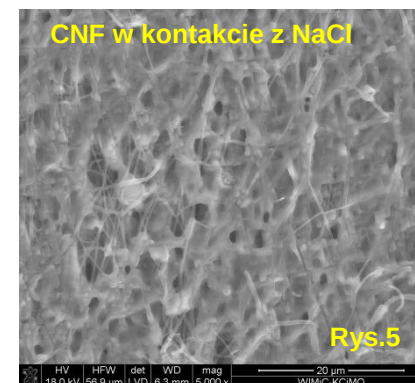
Prowadzimy również prace nad otrzymywaniem nanokompozytów hierarchicznych na bazie nanowłókien węglowych, otrzymywanych z wykorzystaniem techniki elektroprzędzenia i modyfikowanych nanorurkami węglowymi, syntezowanymi metodą CVD. Przykładem są nanowłókna węglowe o strukturze hierarchicznej, znane w literaturze również jako nanowłókna rozgałęzione. W skali nanometrycznej, w budowie takich włókien można wyróżnić rdzeń z CNF, od którego w kierunkach prostopadłych do głównej osi wyrastają CNTs (Rys.3). Taki rodzaj hierarchicznego uporządkowania prowadzi do znacznie zwiększonej powierzchni właściwej, dużej gęstości miejsc aktywnych katalitycznie i sorpcyjnie, lepszej przewodności elektrycznej, stabilności mechanicznej jak i zwiększonych zdolnościach detekcyjnych. Dlatego hierarchiczna struktura tych materiałów poszerza ich potencjalny obszar zastosowania, zwłaszcza w dziedzinach konwersji i magazynowania energii, katalizie, nanoelektronice, chemii analitycznej, biomateriałach, filtracji etc.





Kolejnym obszarem naszych badań są ceramiczne nanokompozyty modyfikowane nanowłóknami i mikrowłóknami węglowymi, w których faza ceramiczna powstała w wyniku termicznej przemiany polimeru zawierającego krzem (Rys.4). Pochodzące z polisiloksanu kompozyty z matrycą ceramiczną i nanokompozyty (CMC lub CMNC) z fazami węglowymi stanowią interesującą ścieżkę rozwoju materiałów mających zastosowanie w nowoczesnej elektronice jako wielofunkcyjne nanokompozyty, elektrochemiczne źródła zasilania dla nowej generacji akumulatorów litowo-jonowych, elektrody elastyczne, ogniwa paliwowe i superkondensatory.

Prowadzone przez nas prace badawcze obejmują również chemiczne modyfikowanie nanowłóknin węglowych o niekierunkowym i kierunkowym ułożeniu włókien. Główne obszary potencjalnego wykorzystania tych materiałów to podłoża do regeneracji tkanek jak również membrany do oczyszczania, czy odsalania wód (Rys.5). Przeprowadzamy modyfikacje zarówno materiałów komercyjnie dostępnych, jak i wytwarzanych przez nas na drodze karbonizacji włóknistych mat wytwarzanych poprzez elektroprzędzenie prekursorów węglowych, jak poliakrylonitryl.



Kolejnym istotnym zagadnieniem, nad którym prowadzimy prace badawcze jest otrzymywanie polimerowych kompozytowych materiałów elektroprzewodzących (CPC). Przy zastosowaniu właściwego rodzaju wypełniacza oraz przy jego optymalnej dyspersji w matrycy, możliwe jest przekroczenie tzw. progu perkolacji i otrzymanie wysoce elektroprzewodzącego materiału. W naszym przypadku, fazę modyfikującą stanowią włókna węglowe po recyklingu (rCF), grafit i/lub fazy nanometryczne w postaci CNT, grafenu czy różnego rodzaju sadz węglowych (Rys.6). Obecność recyklatu w postaci włókien węglowych w osnowie z żywicy epoksydowej w znacznym stopniu modyfikuje właściwości elektryczne, mechaniczne i termiczne otrzymanych kompozytów. Wprowadzenie do takiego układu, nanonapełniacza drugorzędowego w postaci CNT umożliwia polepszenie fizycznego kontaktu pomiędzy pojedynczymi mikrowłóknami oraz skrócenie ścieżki przewodzenia co stanowi główne powody znacznego polepszenia przewodności materiałów. Wyniki te wskazują, że rCF mogą być wykorzystywane jako wypełniacze do CPC, a dodatek niewielkiej ilości nanomateriałów węglowych pozwala na tworzenie hybrydowych

kompozytów o potencjalnych zastosowaniach w ekranowaniu elektromagnetycznym, ogniwach paliwowych, czujnikach, jak również jako spoiwo przewodzące. W przypadku elastomerów, dodatek niewielkiej ilości CNTs w matrycy pozwolił na uzyskanie elastycznego materiału elektroprowadzącego, który daje się przetwarzać z wykorzystaniem technik druku 3D. Tego typu materiały mogą posłużyć do drukowania precyzyjnych i elastycznych układów elektroprowadzących, które mogą znaleźć zastosowanie m.in. w medycynie jako sensory sygnałów biomedycznych. Z kolei modyfikacja nanomateriałami węglowymi biomateriałów umożliwia otrzymanie elektroprowadzących podłoży do hodowli komórek i tkanek w warunkach *in vitro*.

Kolejną ciekawą grupą wytwarzanych przez nas materiałów są kompozyty węgiel-węgiel (C-C) oraz węglowe kompozyty ziarniste, które, szczególnie dzięki współpracy z przemysłem tj. firmą Tokai Cobex Polska czy SGL Carbon, znalazły się w obszarze naszych intensywnych badań. Kompozyty C-C to klasa wysoko wyspecjalizowanych syntetycznych kompozytów węglowych, charakteryzujących się szerokim zakresem unikalnych właściwości fizycznych i chemicznych. Obecnie, najszerzej są one stosowane w takich dziedzinach, jak inżynieria lotnicza, motoryzacja, biomateriały, fizyka wysokich energii, technologia półprzewodników, materiały ogniotrwałe itp. Z kolei jednym z najważniejszych zastosowań kompozytów ziarnistych jest produkcja elektrod węglowych i grafitowych dla przemysłu aluminiowego, krzemowego i stalowego. Obecnie, materiały te stanowią około połowy światowej produkcji węgla przemysłowego.

Prace badawcze realizowane są na Uczelni jak również poza nią, w międzyuczelnianych zespołach badawczych o charakterze interdyscyplinarnym, jak również we współpracy z przemysłem.

Tematyka badawcza zespołu (1)

- Nanostruktury węglowe – synteza, funkcjonalizacja, właściwości;
- Nanowłókna węglowe i hybrydowe nanowłókna węglowe;
- Warstwy z nanomateriałów węglowych;
- Nowej generacji włókna węglowe;
- Kompozyty węgiel-węgiel;
- Kompozyty węglowo-ceramiczne;

- Ziarniste kompozyty węglowe;
- Węglowo-polimerowe kompozyty przewodzące;
- Alternatywne spoiwa/lepiszcza dla technologii materiałów węglowo-grafitowych;
- Recykling kompozytów z włóknem węglowym;
- Druk 3D, biodruk, elektroprzędzenie kompozytów z nanonapełniaczami węglowymi.

Zakres aplikacyjny opracowywanych materiałów

1. Medycyna
 - regeneracja nerwów, mięśni (w tym tkanki serca), tkanki kostnej, tkanki chrzęstnej;
 - elektrostymulacja;
 - biosensory;
 - ocena stopnia toksyczności;
 - nanomateriały węglowe jako nośniki leków.
2. Magazynowanie i konwersja energii
 - barwnikowe ogniwa fotowoltaiczne;
 - ogniwa paliwowe;
 - baterie litowo-jonowe.
3. Materiały węglowe w ochronie środowiska.
4. Materiały ablacyjne/wysokotemperaturowe poszycia rakiet.
5. Węglowe, grafitowe elektrody dla przemysłu ciężkiego.
6. Materiały węglowe o podwyższonej odporności na utlenianie.
7. Nanomateriały węglowe i nanokompozyty dla chemii analitycznej.

Skład osobowy zespołu badawczego

- **Dr hab. inż. Aneta Frączek-Szczypta, prof. AGH – kierownik zespołu**
- Dr hab. inż. Ewa Stodolak-Zych, prof. AGH
- Dr hab. inż. Barbara Szaraniec, prof. AGH
- Dr inż. Aleksandra Benko - adiunkt
- Dr inż. Maciej Gubernat – adiunkt
- Dr inż. Anna Lis - adiunkt
- Mgr inż. Marcel Zambrzycki – asystent, doktorant
- Mgr inż. Krystian Sokołowski – doktorant
- Mgr inż. Ewa Dzierzkowska - doktorant

Projekty badawcze realizowane i zrealizowane

Aktualnie realizowane projekty badawcze

- *BiofunCardio - Biofunkcyjne podłoża do różnicowania komórek macierzystych w kierunku kardiomiocytów przy wykorzystaniu procesu elektrostymulacji.* Źródło: NCBiR, projekt Lider, Czas realizacji: 2021-2024.
- UMO-2019/33/N/ST5/02500, *Właściwości elektryczne i aktywność katalityczna względem reakcji redoks par I-/I3- hierarchicznych nanostruktur węglowych z nowym katalizatorem bimetalicznym Ni-Co.* Źródło: NCN, Czas realizacji: 2020-2022.
- UMO-2019/35/N/ST5/02532, *Od powierzchni międzyfazowej do oddziaływań między polimerami zawierającymi krzem a włóknistym węglem : Kompleksowe badania otrzymywania nanokompozytów typu włóknisty węgiel/węglik.* Źródło: NCN, Czas realizacji: 2020-2022.
- UMO-2018/31/B/ST8/02418 *Wpływ hybrydowych struktur węglowych na proces regeneracji tkanki chrzęstnej/kostnej.* Źródło: NCN, Czas realizacji: 2019-2022.

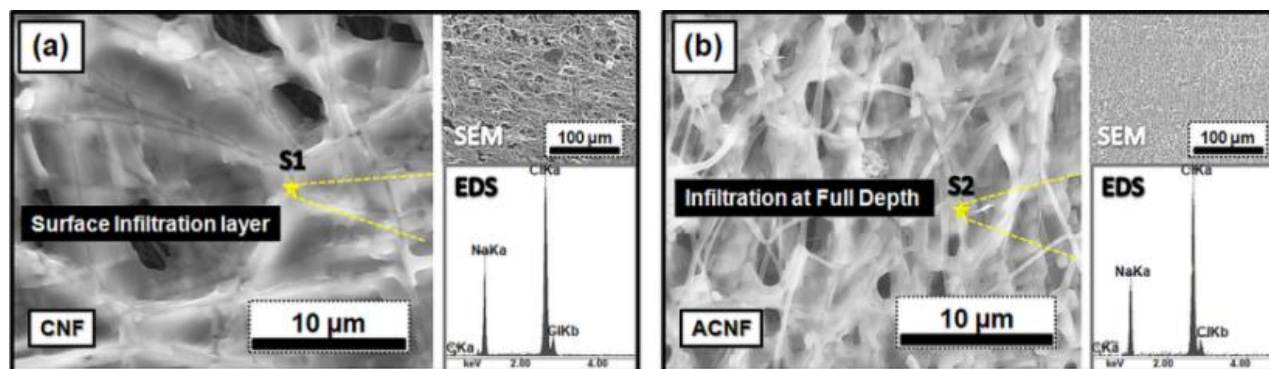
- 2017/24/C/ST8/00400, *Wpływ parametrów fizykochemicznych i elektrycznych na właściwości biologiczne nanowłóknistych materiałów węglowych*. Źródło: NCN, Czas realizacji: 2017-2021.

Projekty badawcze zakończone

- 2019/03/X/ST5/00684, *Synteza nanorurek węglowych wspomagana nowymi katalizatorami krzemianowymi*, Źródło: NCN, Czas realizacji: 2019-2020.
- 2013/11/N/ST8/01357, *Ocena wpływu parametrów procesu elektroforetycznego osadzania nanorurek na właściwości otrzymywanych materiałów kompozytowych*. Źródło: NCN, Czas realizacji: 2014-2017.
- UMO-2013/11/D/ST8/032, *Warstwy z nanomateriałów węglowych na powierzchni metalu, jako potencjalne układy do regeneracji i stymulacji komórek układu nerwowego*. Źródło: NCN, Czas realizacji: 2014-2017
- PBS2/B5/27/2013, *Alternatywne spoiwa o obniżonej zawartości wielopierścieniowych węglowodorów aromatycznych dla technologii materiałów węglowych i grafitowych*. Program Badań Stosowanych (PBS2), Źródło: NCBiR, Czas realizacji: 2013-2016.
- UMO-2011/01/ B/ST5/06 424, *Analiza fizyko-chemicznych i biologicznych właściwości nanoform węgla przeznaczonych dla zastosowań medyczny*. Źródło: NCN, Czas realizacji: 2011-2014.
- N N507 402039, *Badanie biogodności nanorurek węglowych oraz ich wpływ na procesy naprawcze tkanek*. Źródło: MNiSzW, Czas realizacji: 2010-2013.
- Grant agreement no.: 230766, *Biocompatibility of carbon nanoparticles with tissues of the neuromuscular system*. Seventh Framework Programme the People Programme. Czas realizacji: 2009-2013.
- N N507 463537, *Nanokompozytowe materiały dla medycyny regeneracyjnej*. Źródło: MNiSzW, Czas realizacji: 2009-2011.

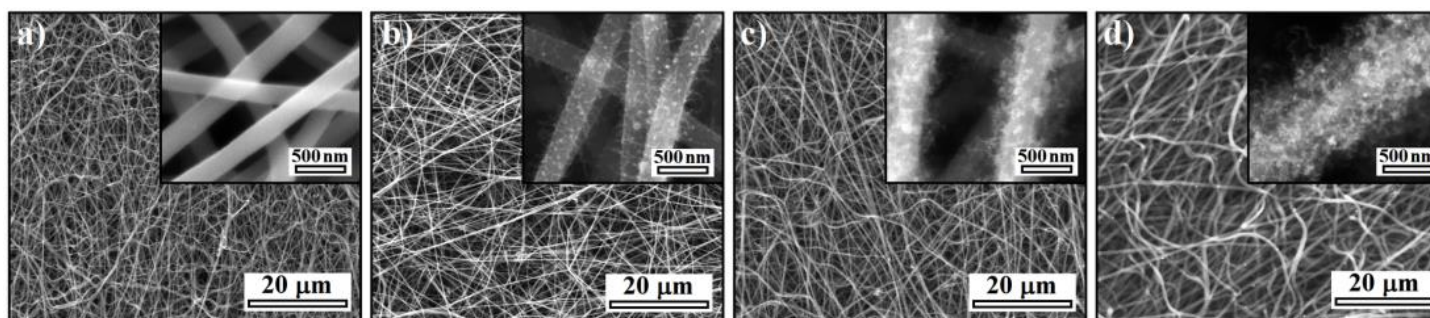
Wybrane publikacje z ostatnich lat

1. K. Sokołowski, S. Błażewicz, M. Nocuń, A. Frączek-Szczypta. *Carbon micro- and nanofibrous materials with high adsorption capacity for water desalination*. Desalination 503 (2021) 1-17.



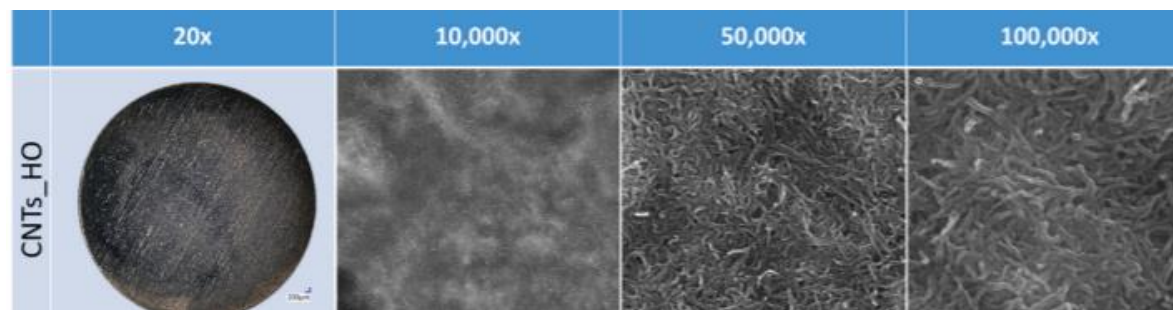
Rys. 1 Obrazy SEM i analizy EDS depozytu NaCl na powierzchni a) CNFs, b) ACNFs.

2. M. Zambrzycki, S. Łoś, A. Frączek-Szczypta. *Structure and electrical transport properties of carbon nanofibres/carbon nanotubes 3D hierarchical nanocomposites: impact of the concentration of acetylacetonate catalyst*. Ceramics International 47 (2021) 4020–4033.



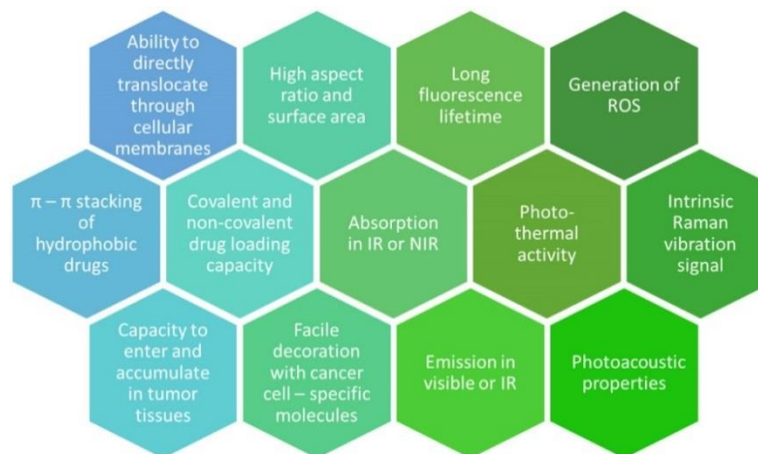
Rys. 2 Obrazy SEM nanokompozytów hierarchicznych eCNF/dCNT, zawierających odpowiednio 0% (a), 1,5% (b), 3% (c) i 4,5% (d) $\text{Fe}(\text{Acac})_3$.

3. A. Benko, D. Medina-Cruz, J. Duch, T. Popiela, S. Wilk, M. Bińczak, M. Nocuń, E. Menaszek, L.D. Geoffrion, G. Guisbiers, A. Kotarba, T.J. Webster, *Conductive all-carbon nanotube layers: results on attractive physicochemical, anti-bacterial, anticancer and biocompatibility properties*. Materials Science and Engineering. C, Materials for Biological Applications 120 (2021) 1-11.



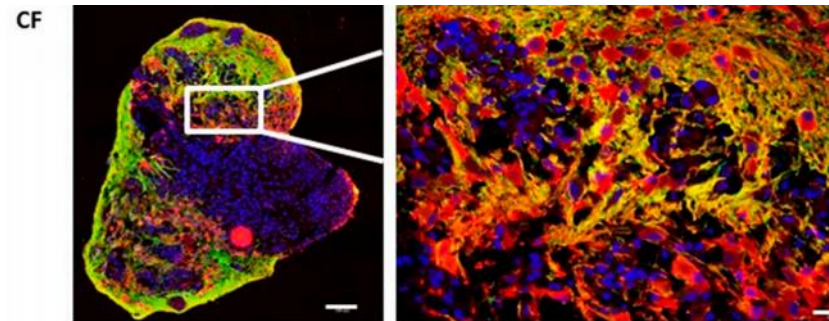
Rys. 3 Obrazy mikroskopowe warstw z nanorurek węglowych przy różnym powiększeniu.

4. A. Benko, D. Medina-Cruz, A. Vernet-Crua, C.P. O'Connell, M. Świętek, H. Barabadi, M. Saravanan, T.J. Webster, *Nanocarrier drug resistant tumor interactions: novel approaches to fight drug resistance in cancer*, Cancer Drug Resistance 4 (2021)



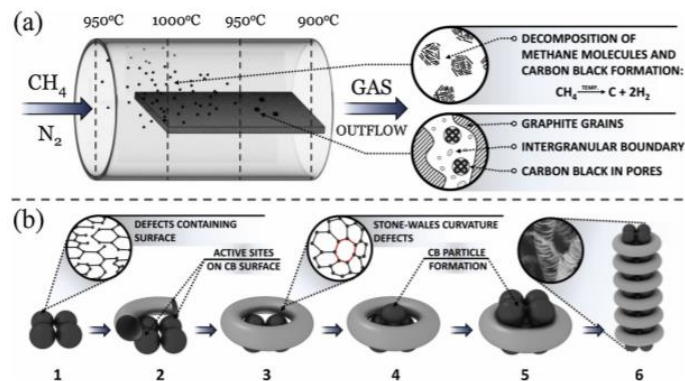
Rys. 4 Cechy nanomateriałów węglowych, które decydują o ich przydatności w leczeniu nowotworów

5. A. Teichman, A. Znój, P. Chlebowska, A. Frączek-Szczypta, M. Majka. *Carbon fibers as a new type of scaffold for midbrain organoid development*. International Journal of Molecular Sciences 21 (2020) 1–14.



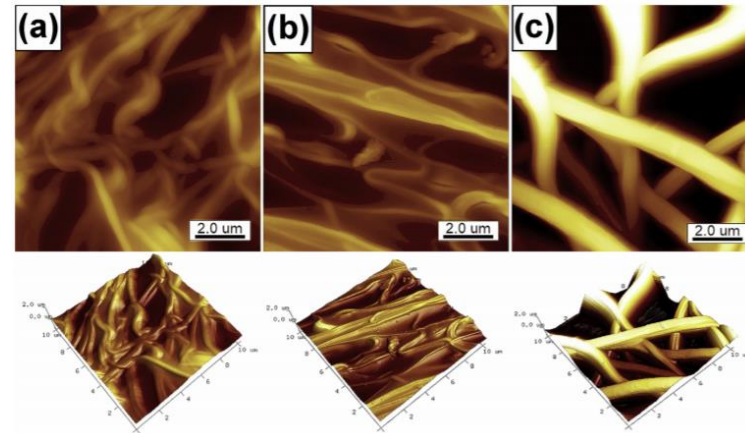
Rys. 5 Immunofluorescencyjna charakterystyka organoidów w kontakcie z włóknem węglowym.

6. M. Gubernat, M. Zambrzycki, A. Frączek-Szczypta, S. Błażewicz. *Structural and microstructural study of novel stacked toroidal carbon nanotubes*. Micron 130 (2020) 1–9.



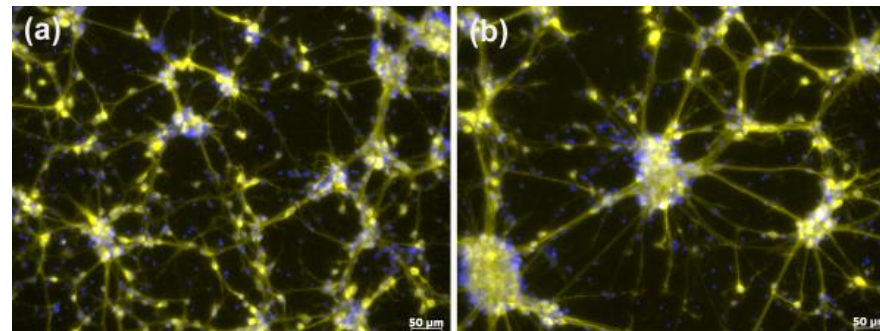
Rys. 6 Schemat przedstawiający wzrost toroidalnych nanorurek węglowych

7. K. Sokołowski, P. Palka, S. Błażewicz, A. Frączek-Szczypta. *Carbon nanofibers-based nanocomposites with silicon oxy-carbide matrix*. *Ceramics International* 46 (2020) 1040–1051.



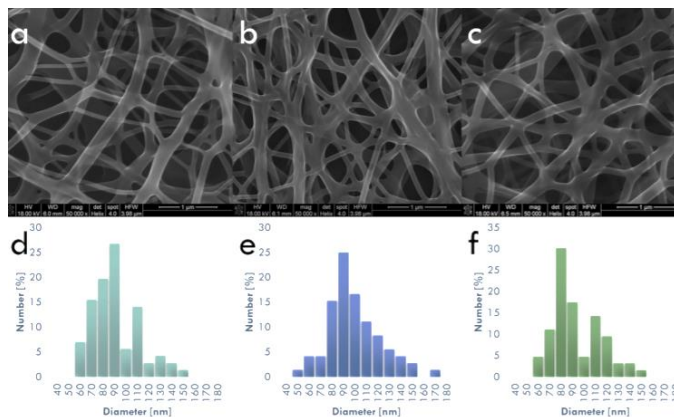
Rys. 7 Obrazy AFM powierzchni nanokompozytów SiOC/CNF w otrzymanych w różnych warunkach.

8. A. Frączek-Szczypta, D. Jantas, F. Ciepiela, J. Grzonka. *Graphene oxide-conductive polymer nanocomposite coatings obtained by the EPD method as substrates for neurite outgrowth*. *Diamond and Related Materials* 102 (2020) 1–15.



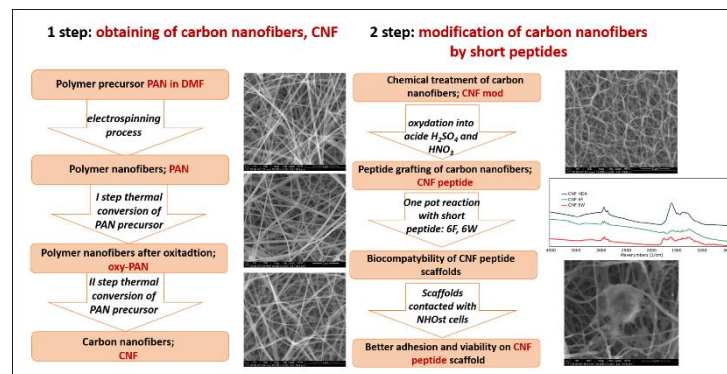
Rys. 8 Mikrofotografie wybarwionych neuronów NeuO / Hoechst 33342 wyhodowanych na nanokompozytach GO: PANI_16: 1 po 4 i 6 dniach hodowli.

9. A. Benko, M. Nocuń, M. Gajewska, M. Błażewicz. *Addition of carbon nanotubes to electrospun polyacrylonitrile as a way to obtain carbon nanofibers with desired properties*. Polymer Degradation and Stability 161 (2019) 260–276.



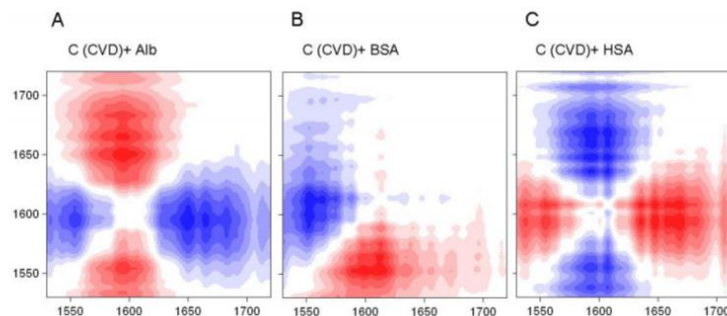
Rys. 9 Obrazy SEM nanowłókien węglowych i rozkłady wielkości średnic.

10. E. Dzierzkowska, E. Menaszek, M. Nocuń, B. Kolesińska, E. Stodolak-Zych, *Effect of carbon nanofibers surface modification with biomolecules on structural properties and cellular response*, Electrospinning and related techniques 1 (2019) 48-50.



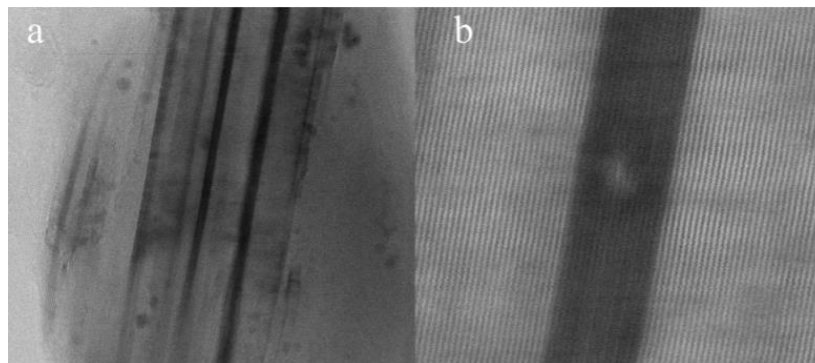
Rys. 10 Warstwa nanometryczna z albumin otrzymana na: MWCNTs nanoszonych metodą EPD(A), nanowłóknach węglowych CNF (B).

11. A. Weselucha-Birczyńska, P. Moskal, M. Dużyja, E. Stodolak-Zych, E. Długoń, S. Kluska, J. Sacharz, M. Błażewicz. *2D correlation Raman spectroscopy of model micro- and nano-carbon layers in interactions with albumin, human and animal*. Journal of Molecular Structure 1171 (2018) 587–593.



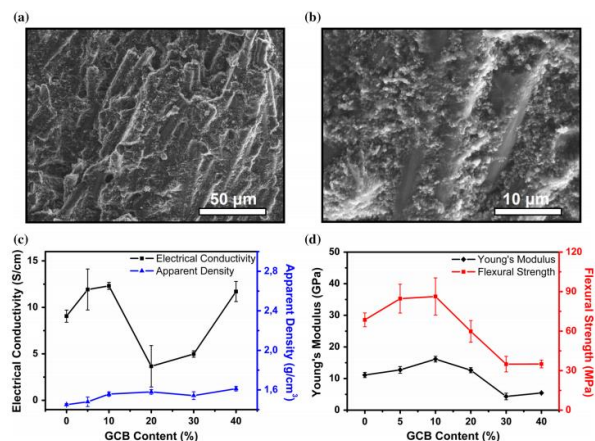
Rys. 11 Asynchroniczne widma ramanowskie próbek węglowych inkubowanych różnymi rodzajami albumin

12. M. Gubernat, A. Frączek-Szczypta, J. Tomala, S. Błażewicz. *Catalytic effect of montmorillonite nanoparticles on thermal decomposition of coal tar pitch to carbon*. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 130 (2018) 90–98.



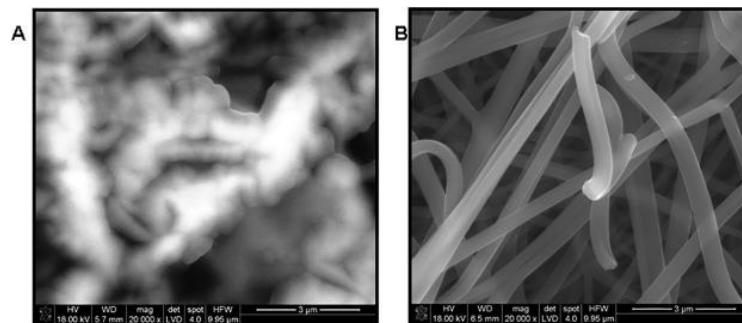
Rys. 12 Obrazy TEM i HRTEM CNT otrzymane z paku węglowego z dodatkiem nanocząstek ceramicznych.

13. M. Zambrzycki, A. Frączek-Szczypta. *Conductive hybrid polymer composites based on recycled carbon fibres and carbon nanofillers*. Journal of Materials Science 53 (2018) 7403–7416.



Rys. 13 Obrazy SEM nanokompozytu przewodzącego: żywica epoksydowa + rCF + sadza grafityzowana oraz wyniki badań elektrycznych i mechanicznych tych próbek.

14. A. Weselucha-Birczyńska, K. Morajka, E. Stodolak-Zych, E. Długoń, M. Dużyja, T. Lis, M. Gubernat, M. Ziąbka, M. Błazewicz, *Raman studies of the interactions of fibrous carbon nanomaterials with albumin*, Spectrochimica Acta. Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy 196 (2018) 262–267.



Rys. 14 Warstwa nanometryczna z albumin otrzymana na: MWCNTs nanoszonych metodą EPD(A), nanowłóknach węglowych CNF (B).

Współpraca

Ośrodki naukowe w kraju i zagranicą

- Department of Chemical Engineering, Northeastern University, Boston, MA, United States.
- Stanford Cardiovascular Institute, Stanford, CA, United States.
- Department of Physics and Astronomy, University of Arkansas at Little Rock, United States.
- Department of Biomaterials and Tissue Engineering, Institute of Physiology, Academy of Sciences of the Czech Republic.
- Institute of Macromolecular Chemistry, Czech Academy of Sciences, Prague 16206, Czech Republic.
- University College London, Wielka Brytania.
- Materials Science Institute (MSI), Lancaster University, United Kingdom.
- Katedra i Zakład Biochemii i Biotechnologii, Uniwersytet Medyczny, Lublin.
- Instytut Farmakologii im. Jerzego Maja Polskiej Akademii Nauk, Zakład Neuroendokrynologii Doświadczalnej, Kraków.
- Collegium Medicum UJ, Wydział Farmacji, Zakład Cytobiologii, Kraków.
- Uniwersytet Jagielloński, Wydział Chemii.
- Zakład Biotechnologii Medycznej Wydział Biochemii, Biofizyki i Biotechnologii UJ.
- Uniwersytet Jagielloński, Instytut Zoologii i Badań Biomedycznych.
- Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk, Kraków.
- Uniwersytet Medyczny im. Piastów Śląskich we Wrocławiu, Wydział Lekarsko-Stomatologiczny, Zakład Chirurgii Eksperymentalnej i Badania Biomateriałów.
- Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Instytut Fizyki.
- Instytut Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Polskiej Akademii Nauk, Kraków.
- Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Włókiennictwa w Łodzi.
- Politechnika Łódzka, Wydział Chemii.

- Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Biopolimerów i Włókien Chemicznych w Łodzi.

Przemysł

- TOKAI COBEX Polska sp. z o.o. w Nowym Sączu i Raciborzu
- SGL Graphite Solutions Polska sp. z o.o. w Nowym Sączu
- JSW Innowacje S.A. w Katowicach
- SpaceForest Sp. z o.o. w Gdyni

