

Katarzyna MORDAL¹, Arkadiusz SZAREK¹

¹Zakład Bioinżynierii i Obróbki Plastycznej, Instytut Technologii Mechanicznych, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, Politechnika Częstochowska, Częstochowa

MODELOWANIE STANU NAPRĘŻEŃ I ODKSZTAŁCEŃ W KOMPOZYCIE UHMWPE – WŁÓKNO WĘGLOWE

Streszczenie: Artykuł poświęcono modelowaniu stanu naprężeń i odkształceń kompozytu UHMWPE – włókno węglowe. Część wstępna obejmuje kwestie związane z biomateriałami, kompozytami oraz właściwościami osnowy i włókien analizowanego materiału. Z kolei w części badawczej zaprezentowano zagadnienia dotyczące przygotowania modelu badanego kompozytu oraz wyniki badań z wykorzystaniem metody elementów skończonych obrazujące rozkład naprężeń i odkształceń w materiale powstający w wyniku ściskania.

Słowa kluczowe: biomateriały, kompozyty, UHMWPE, włókno węglowe, modelowanie

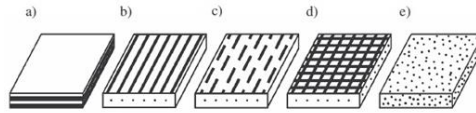
1. WPROWADZENIE

Przełom XX – XXI wieku przyniósł postęp w takich dziedzinach jak: bioinżynieria, inżynieria materiałowa czy medycyna, co było właściwie efektem niektórych negatywnych zjawisk związanych z rozwojem cywilizacyjnym (np. wzrostu liczby wypadków, różnych chorób, zwiększającej się otyłości). To przyczyniło się do powstania interdyscyplinarnych zespołów pracujących nad materiałowymi rozwiązaniami w zakresie rekonstrukcji chorych lub uszkodzonych narządów ludzkich, gdyż obecnie w tym celu stosuje się najczęściej transplantację żywych tkanek i wszczepianie sztucznych implantów. Nastąpił także dynamiczny rozwój biomateriałów, od których, obok bardzo dobrych właściwości wytrzymałościowych (np. wysoka wytrzymałość zmęczeniowa), tribologicznych (np. zużycie ściernie) i technologicznych (m.in.: łatwość obróbki i sterylizacji, niskie koszty) wymaga się przede wszystkim biogodności oraz wysokiej odporności na korozję w ustroju [12, 15].

2. KOMPOZYTY W BIOINŻYNIERII

Niekiedy metale, polimery lub bioceramika ze względu na swoje właściwości nie są w stanie sprostać oczekiwaniom dzisiejszej medycyny, stąd optymalnym rozwiązaniem (coraz częściej stosowanym) stają się kompozyty, które pozwalają świadomie kształtować pożądane parametry w stopniu niedostępnym w przypadku pozostałych typów biomateriałów. Składają się one z minimum dwóch komponentów o różnych właściwościach, które w połączeniu pozwalają uzyskać materiał o lepszych (niż w przypadku pojedynczych składników) parametrach. Kompozyt zazwyczaj zbudowany jest z fazy ciągłej – osnowy, zwanej także matrycą (polimerowej, metalowej lub ceramicznej) i fazy rozproszonej, czyli

zbrojenia (wzmocnienia) mającego postać cząsteczek (dyspersyjnych lub dużych ziaren) bądź włókien (krótkich lub długich). Matryca nadaje wyrobom pożądany kształt, utrzymując cały układ w zwartej formie, chroni wzmocnienie przed zniszczeniem i przenosi na nie obciążenia. Z kolei zbrojenie odpowiada za poprawę wytrzymałości, odporności na ścieranie i z reguły zmniejsza ryzyko powstawania i propagacji pęknięć. Ze względu na jego postać kompozyty dzielą się na: strukturalne (laminaty i wielowarstwowe), włókniste i zbrojone cząsteczkami, co przedstawia rys. 1 [2, 7, 15-16].



Rys. 1. Podział kompozytów ze względu na postać wzmocnienia: warstwowe (a), włókniste (b, c, d) i wzmacniane cząsteczkami (e) [16]

W inżynierii biomedycznej najczęściej wykorzystuje się biokompozyty na osnowie polimerowej wzmacniane cząstkami ceramicznymi, włóknami szklanymi czy węglowymi, np. PE z wypełnieniem hydroksyapatytowym (HAp) lub bioszklanym bądź kompozyty polimerowo-węglowe. Ich zastosowanie jest bardzo duże, począwszy od drenów, laparoskopów, cewników, wzierników przez soczewki kontaktowe czy sondy, a skończywszy na mających bezpośredni kontakt ze środowiskiem ustrojowym niciach chirurgicznych i klejach do klejenia tkanek [5, 15].

2.1. Polimerowe kompozyty włókniste i ich właściwości

Obecnie kompozyty wzmacniane włóknami (*FRP*) dominują na rynku materiałów kompozytowych, ponieważ wykazują najlepsze właściwości mechaniczne przy najmniejszym ciężarze. Trzeba przy tym nadmienić, że ich parametry zależą od kilku znaczących czynników. Po pierwsze są to właściwości poszczególnych faz i ich zawartość, które determinują odporność cieplną, gęstość i moduł sprężystości materiału. Przykładowo gęstość kompozytu ρ_c oblicza się ze wzoru 1, wykorzystując gęstość osnowy ρ_m , włókien ρ_f i ich objętości (V_m i V_f):

$$\rho_c = \rho_m V_m + \rho_f V_f \quad (1)$$

Z kolei moduł Younga E_c dla kompozytu obciążonego równolegle do osi włókna stanowi średnią ważoną modułów osnowy E_m i wzmocnienia E_f (2), zaś w przypadku prostopadłego obciążenia jest znacznie mniejszy (3), co wynika kolejno ze wzorów:

$$E_c = E_m V_m + E_f V_f \quad (2) \quad E_c = \frac{E_m E_f}{\rho_m V_m + \rho_f V_f} \quad (3)$$

Istotne są także parametry geometryczne zbrojenia – kształt włókien, ich rozkład, orientacja i koncentracja w osnowie oraz rozmiary. Przykładowo ich średnica powinna być nie większa niż 15 μm , gdyż w przeciwnym przypadku zwiększa się prawdopodobieństwo wystąpienia wad powierzchniowych (zarysowań i mikropęknięć). Ponadto warunkiem uzyskania optymalnych właściwości wytrzymałościowych kompozytu jest doskonałe powiązanie osnowy i zbrojenia, co zależy od zwilżalności powierzchni włókien [3, 5, 7, 13].

2.2. Osnowa kompozytu – UHMWPE

Osnowa badanego kompozytu, czyli polietylen o ultrawysokiej masie cząsteczkowej (UHMWPE), należy do grupy tworzyw częściowo krystalicznych i elastycznych. Na ogół jest to bezbarwne ciało stałe w postaci proszku, granulek lub półproduktów (arkusze, bloki, profile itp.), charakteryzujące się bardzo dobrą biotolerancją, odpornością na większość chemikaliów (z wyjątkiem np. stężonego HNO_3 i niektórych środków czyszczących) i przepuszczalnością dla tlenu, CO_2 i większości substancji zapachowych. Ponadto UHMWPE, w porównaniu z innymi gatunkami polietylenu, charakteryzuje się lepszymi właściwościami mechanicznymi i fizykochemicznymi (z których część zebrano w tabeli 1), co wynika z bardzo wysokiej masy cząsteczkowej (przekraczającej 5 mln g/mol). Jest to bowiem materiał o dobrej odporności termicznej, wytrzymałości na ścieranie, pękanie i rozciąganie, dość dobrej udarności, a także o bardzo dobrych właściwościach ślizgowych. Z kolei łatwość przetwarzania i sterylizacji oraz smarowność predysponują go do niektórych zastosowań medycznych, głównie do wytwarzania elementów ślizgowych endoprotez biodra, kolana czy rzadziej stosowanych barku, łokcia i stawu skokowego bądź implantów dysków kręgosłupa i płytek kostnych. Jednakże PE nie jest odporny na działanie czynników atmosferycznych (promieniowania UV i O_2), powodujących przyspieszoną fotooksydację, która z kolei przyczynia się do depolimeryzacji, zrywania łańcuchów i niszczenia powłok naskórka i odpowiada m.in.: za pojawianie się mikropęknięć i zwiększoną kruchość wyrobów z tworzyw. [4, 8, 10, 15]. W związku z tym UHMWPE najczęściej poddaje się modyfikacjom celem zmiany bądź nadania nowych właściwości, np. poprawy tribologicznych (w tym odporności na zużycie ścierne) i odporności na starzenie fotooksydację. Zazwyczaj dokonuje się tego poprzez sieciowanie: radiacyjne (z wykorzystaniem promieniowania UV) lub za pomocą dodatku stabilizatorów (np. witaminy E, czyli α -tokoferolu), w efekcie którego powstają wiązania poprzeczne tworzące przestrzenną sieć [1, 6, 8, 14-15].

2.3. Zbrojenie kompozytu – włókna węglowe

Zbrojenie badanego kompozytu stanowią włókna węglowe (o średnicy ok. $6\div 9\ \mu\text{m}$), które charakteryzują się dużą sztywnością i wytrzymałością, kilkukrotnie przewyższającą parametry samego węgla. Zwykle mają one postać tzw. rovingu – pasm o wielu włóknach elementarnych (filamentach), a ich wytwarzanie odbywa się z wykorzystaniem dwóch różnych prekursorów (substratów wyjściowych). Pierwsza metoda wymaga zastosowania technicznych włókien poliakrylonitrylowych PAN, które najpierw w fazie pirolizy ogrzewa się w temp. $220\div 250^\circ\text{C}$ przez 50 h, celem ich utlenienia. Następnie, w fazie karbonizacji ogrzewa w temp. 1000°C , by usunąć wszystkie składniki (oprócz węgla). Na koniec w temp. 3000°C , pod podwyższonym ciśnieniem dochodzi do krystalizacji węgla i struktura włókien upodobnia się do struktury naturalnego grafitu. Z kolei drugi, rzadko stosowany sposób oparto na rafinowanych pakach mezogenicznych, z których przedzie się włókna, poddając je kolejno stabilizacji, karbonizacji i niekiedy grafityzacji [5, 11].

Włókna węglowe są prawie w całości zbudowane z grafitu, co powoduje ich nietopliwość i odporność chemiczną. Ponadto charakteryzują się małą gęstością, wysoką wytrzymałością zmęczeniową, odpornością chemiczną, termiczną, na ścieranie i pełzanie oraz dobrą zdolnością do tłumienia drgań. Z kolei ich wysoce zorganizowana struktura zapewnia dużą wytrzymałość mechaniczną (w tym na rozciąganie) i moduł Younga (tab. 1). Jedyłą ich wadą jest słaba zdolność do połączeń z polimerami, co wynika ze słabego zwilżania przez żywice, stąd wcześniej powierzchnię włókien utlenia się i pokrywa odpowiednią preparacją zabezpieczającą przed wilgocią i pękaniem [3, 5].

Tab. 1. Właściwości UHMWPE oraz włókien węglowych, opr. własne na podst. [7-9, 11]

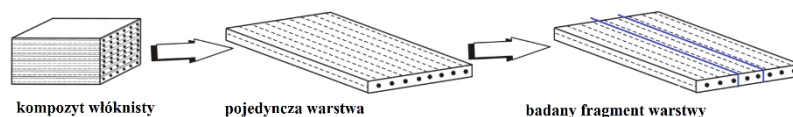
WŁAŚCIWOŚĆ	UHMWPE	WŁÓKNA WĘGLOWE	
		WYSOKOWYTRZYMAŁE (HS)	WYSOKOMODUŁOWE (HM)
Gęstość [g/cm ³]	0,93÷0,96	1,74÷1,8	1,83÷1,86
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	3÷21	2500÷2900	1500÷1600
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	22	3400÷4500	2300÷2700
Wydłużenie przy zerwaniu [%]	>50	0,7 ÷1,2	1,6÷2,1
Moduł Younga [GPa]	0,5÷1,0	230÷270	380÷400
Krystaliczność [%]	39÷75	-	-
Współczynnik Poissona	0,4÷0,46	0,28÷0,32	0,28÷0,35

3. ANALIZA NUMERYCZNA KOMPOZYTU UHMWPE - WŁÓKNO WĘGLOWE

Analiza zjawisk zachodzących w kompozytach jest bardziej złożona niż w przypadku pozostałych typów materiałów, ponieważ wiąże się z występowaniem różnych faz i niejednorodności materiału. W związku z powyższym najczęściej modeluje się je, stosując metody analityczne bądź numeryczne. W celach dydaktycznych oraz naukowych wykonano symulacje komputerowe, gdzie badanym materiałem był kompozyt UHMWPE wzmocniony włóknami węglowymi, który może być w przyszłości wykorzystywany na komponenty endoprotez. Jednocześnie ze względu na fakt, że podczas obciążania implantów stosowanych w organizmie ludzkim największe obciążenia przenoszone są w jego warstwie wierzchniej mającej kontakt z drugim elementem endoprotezy, dokonano wstępnej analizy stanu naprężeń i odkształceń nie w pełnej objętości komponentu, a jedynie w jego wierzchniej warstwie.

3.1. Model fizyczny kompozytu. Metodyka badań.

Model fizyczny kompozytu UHMWPE wzmocnionego włóknami węglowymi ułożonymi w jednym kierunku opracowano w programie SolidWorks 2017, przy czym dla potrzeb symulacji numerycznych dokonano uproszczenia geometrii (rys. 2) – analizowano jedynie fragment warstwy badanego kompozytu, w którym włókna węglowe charakteryzowały się przekrojem kwadratowym. Grubość rozpatrywanej warstwy przyrównano do szerokości włókna węglowego zwilżonego (pokrytego) powłoką polimerową (0.2 mm). Model 3D badanego fragmentu opracowany w programie ADINA System 9.4 przedstawia rys. 3a.



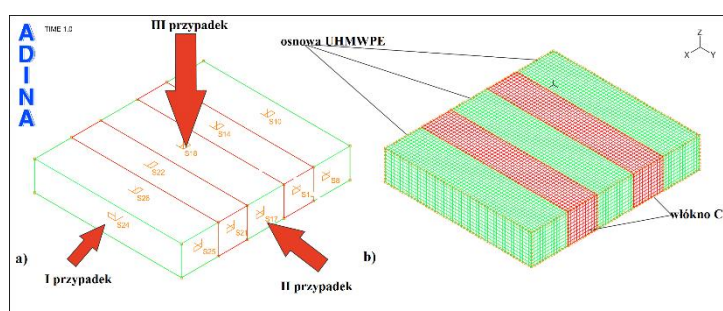
Rys. 2. Uproszczenie geometrii kompozytu włóknistego

Na podstawie analizy literatury określono parametry materiałów osnowy (UHMWPE) i włókna (CF), które scharakteryzowano jako elastyczne, izotropowe, zgodnie z tabelą 2.

Tab. 2. Parametry materiałowe UHMWPE i włókien węglowych wykorzystane w symulacji, opr. wł. na podst. tab. 1

WŁAŚCIWOŚĆ	UHMWPE	CF (HS)
Gęstość [g/mm^3]	$0,93 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$
Moduł Younga [MPa]	$0,75 \cdot 10^3$	$240 \cdot 10^3$
Współczynnik Poissona	0,43	0,285

Analizę numeryczną modelu przeprowadzono z wykorzystaniem metody elementów skończonych (MES), zadając odpowiednie warunki brzegowe (tj. umocowanie sztywne założone na jednej ze ścian) oraz obciążenie ściskające rozłożone równomiernie na powierzchni o wartości całkowitej 80N, przy czym rozpatrywane dla jego dwóch przypadków – działającego zgodnie z kierunkiem ułożenia włókien i w kierunku poprzecznym do nich (rys. 3a). Na koniec zdefiniowano typ elementów skończonych (3D Solid) i dokonano dyskretyzacji modelu warstwy kompozytu włóknistego na 29 500 elementów 8-węzłowych, co zostało pokazane na rys. 3b.

**Rys. 3. Model geometryczny (a) oraz numeryczny (b) warstwy kompozytu**

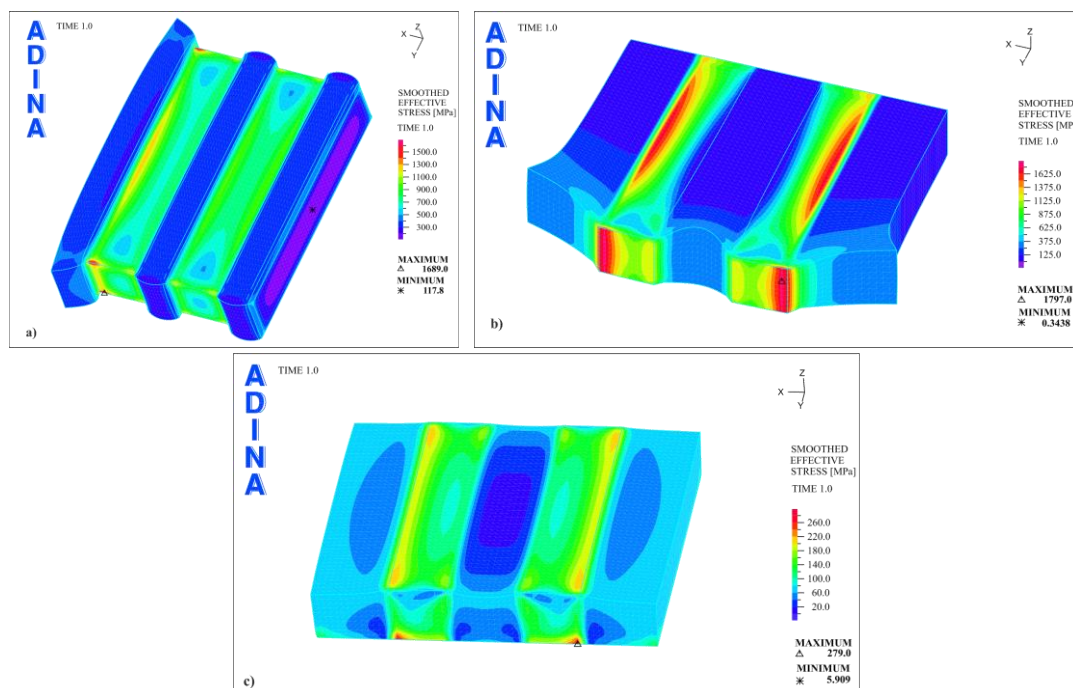
3.2. Analiza wyników

Symulacja numeryczna pozwoliła uzyskać rozkład naprężeń oraz odkształceń w warstwie kompozytu UHMWPE wzmocnionego włóknami węglowymi. Uzyskane wyniki badań numerycznych, opracowane z wykorzystaniem modułu Post-Processing programu ADINA, porównano w zależności od przyłożonego obciążenia. Analiza przeprowadzonych symulacji pozwoliła na określenie ekstremalnych wartości naprężeń i odkształceń kompozytu, co zostało zebrane w tabeli 3, przy czym dane te są pozbawione informacji na temat miejsca ich występowania oraz samych rozkładów. Na rysunkach 4÷5 pokazano przykładowe wyniki stanów naprężeń i odkształceń dla wymienionych przypadków obciążeń.

Tab. 3. Otrzymane uśrednione ekstremalne wartości naprężeń efektywnych oraz odkształceń dla badanych przypadków ściskania warstwy kompozytu UHMWPE wzmocnionego włóknami węglowymi

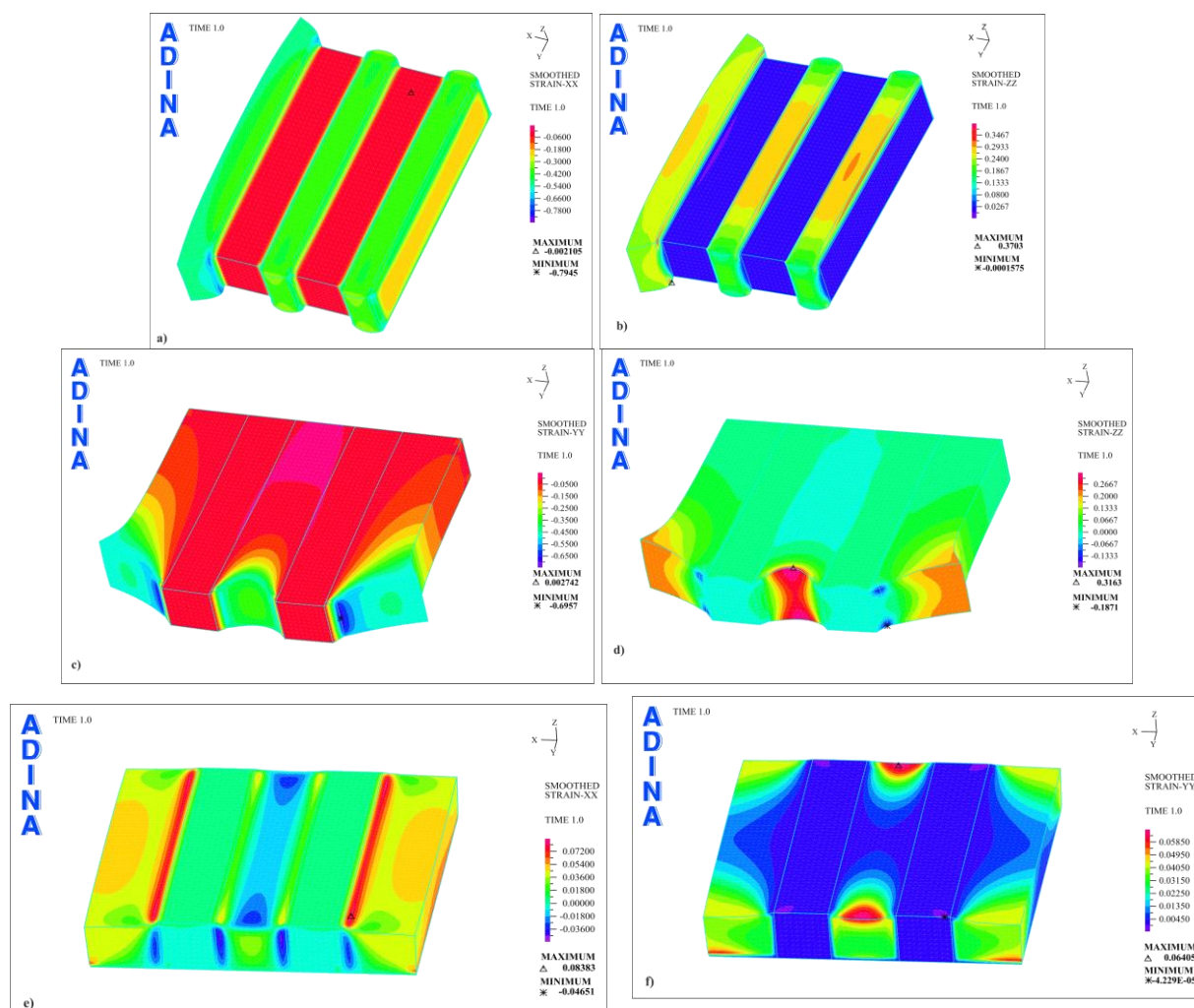
		kierunek poprzeczny do włókien (I)	kierunek równoległy do włókien (II)	kierunek poprzeczny do włókien (III)
naprężenia [MPa]	min	117,8	0,3438	5,909
	max	1689,0	1797,0	279,000
odkształcenia (Strains XX)	min	-0,7945	-0,1004	-0,04651
	max	-0,002105	0,8056	0,08383
odkształcenia (Strains YY)	min	-0,0009669	-0,6957	-4,229e-05
	max	0,3852	0,002742	0,06405
odkształcenia (Strains ZZ)	min	-0,0001575	-0,1871	-0,1576
	max	0,3703	0,3163	0,0001234

Z wyników zaprezentowanych w tabeli 3 można zauważyć, że w przypadku obciążenia przyłożonego poprzecznie do włókien (I) maksymalne wartości naprężeń są niższe niż w przypadku równoległym, przy czym dla wszystkich trzech przypadków ściskania (rys. 4), zaobserwowano, że największe naprężenia są zlokalizowane na granicach włókien z osnową, nie przekraczając wartości wytrzymałości włókien na ściskanie, gdzie dla I i II przypadku obciążania wynoszą one odpowiednio 1689 MPa i 1797 MPa, zaś w III badanym przypadku są ok. sześciokrotnie niższe i równe 279 MPa. Ponadto widać, że w osnowie kompozytu naprężenia są znacznie niższe niż w obrębie włókien węglowych. Dla przykładu w przypadku ściskania zgodnie z kierunkiem ułożenia zbrojenia (II) naprężenia w UHMWPE są o ok. 1000 MPa mniejsze od tych występujących we wzmocnieniu węglowym. Ponadto analiza deformacji dowodzi, że w wyniku obciążania maksymalne zmiany kształtu następują w obszarze UHMWPE, podczas gdy włókno węglowe pozostaje bez zmian. Mają na to wpływ skrajnie różne parametry wytrzymałościowe obu materiałów tj. moduł Younga i współczynnik Poissona. Zastosowane włókna węglowe stanowią więc swoistego rodzaju zbrojenie i nie zmieniają znacznie swojego kształtu w porównaniu do osnowy UHMWPE.



Rys. 4. Rozkład naprężeń w kompozycie UHMWPE wzmocnionego włóknami węglowymi przy obciążeniu ściskającym: a- I przypadek, b- II przypadek, c- III przypadek

Wyniki dotyczące odkształceń (XX -, YY -, ZZ -*Strains*) kompozytu UHMWPE wzmocnionego włóknami węglowymi wskazują, że zarówno w przypadku obciążania działającego poprzecznie do włókien, jak i zgodnie z kierunkiem ich ułożenia największe wartości tych parametrów występują w osnowie kompozytu (rys. 5). Dla przykładu, w pierwszym przypadku ściskania odkształcenia matrycy UHMWPE w kierunku x oraz z wynoszą odpowiednio ok. $-0,1$ i $\sim 0,37$, podczas gdy włókna węglowe charakteryzują się nieznacznymi wartościami tych parametrów ($\epsilon_{xx} = -0,002$ i $\epsilon_{zz} = 0,0005$). Podobnie jest w II i III badanym przypadku obciążania, gdzie odkształcenia wzmocnienia węglowego są praktycznie zerowe, co widać na rys. 5c – 5f.



Rys. 5. Rozkład odkształceń badanego kompozytu przy I (a, b) II (c, d) i III (e, f) przypadku obciążenia

4. PODSUMOWANIE

Badania numeryczne warstwy kompozytu UHMWPE wzmocnionego włóknami węglowymi przy obciążaniu zgodnie z kierunkiem ułożenia włókien, jak i poprzecznie do niego, umożliwiły wizualizację rozkładu naprężeń i odkształceń w tym materiale. Analizowane przykłady pokazały, że największe naprężenia występują na granicach włókien z osnową, a silne ich spiętrzenia w otoczeniu ich końców, co potwierdziło znaczną różnicę modułów Younga obu materiałów. Poza tym badania pokazały, że największe odkształcenia były zlokalizowane w matrycy UHMWPE, zaś włókna nieznacznie zmieniały swój kształt.

Przeprowadzone symulacje numeryczne pozwolą na opracowanie kompozytowych modeli fizycznych, które poddane zostaną badaniom doświadczalnym. Stanowią bazę informacji do dalszych badań związanych z modelowaniem wielowarstwowych kompozytów UHMWPE z włóknami węglowymi, różniących się między sobą cechami geometrycznymi (orientacją, rozkładem i koncentracją wzmocnienia) i materiałowymi. Analiza wstępnie przeprowadzonych symulacji pozwala bowiem założyć, że w dalszej perspektywie kompozyt UHMWPE wzmocniony włóknami węglowymi może znaleźć zastosowanie na elementy endoprotez stawowych, w których przenoszenie naprężeń i odkształceń będzie mieć miejsce w całej objętości implantu, co może wpłynąć na wydłużenie czasu eksploatacji kompozytowych elementów sztucznych stawów człowieka.

LITERATURA

- [1] Bladen C.L. et al.: Analysis of wear, wear particles and reduced inflammatory potential of vitamin E ultrahigh-molecular-weight polyethylene for use in total joint replacement, *Journal of Biomedical Material Research Part B: Applied Biomaterials*, vol. 101B (3), 2013, p. 458-466.
- [2] Boczkowska A., Krzesiński G., *Kompozyty i techniki ich wytwarzania*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2016.
- [3] Chukov D.I. et al.: Surface modification of carbon fibres and its effect on the fiber-matrix interaction of UHMWPE based composites. *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 586, 2014, p. 459-463.
- [4] Czaja K.: *Poliolefiny*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.
- [5] Fejdyś M., Łandwajt M.: Włókna techniczne wzmacniające materiały kompozytowe. „*Techniczne Wyroby Włókiennicze*”, nr 1/2, 2010, s. 12-22.
- [6] Gigante A. et al.: Effectiveness of Vitamin-E-Doped Polyethylene in Joint Replacement: A Literature Review, *Journal of Functional Biomaterials*, vol. 6, 2015, p. 889-900.
- [7] Kaczorowski M., Krzyńska A.: *Konstrukcyjne materiały metalowe, ceramiczne i kompozytowe*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.
- [8] Kurtz S.: *UHMWPE Biomaterials Handbook*. Third Edition. Elsevier Inc., USA 2016.
- [9] Mayer P., Kaczmar J.: Właściwości i zastosowania włókien szklanych i węglowych. „*Tworzywa sztuczne i chemia*”, nr 6, 2008, s. 52-56.
- [10] Malito L. G. et al.: Material properties of ultra-high molecular weight polyethylene: Comparison of tension, compression, nanomechanics and microstructure across clinical formulations, *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 83, 2018, p. 9-19.
- [11] Newcomb B.: Processing, structure and properties of carbon fibres. *Composites: Part A*, vol. 91, 2016, p. 262-282.
- [12] Nowacki J, Dobrzański L., Gustavo F.: *Biomateriały w konstrukcji implantów*, [w:] *Implanty śródszpikowe w osteosyntezie kości długich*. International OCSCO World Press, Gliwice 2018, s. 52-62.
- [13] Oczóś K.E., *Kompozyty włókniste - właściwości, zastosowanie, obróbka ubytkowa*. „*Mechanik*”, nr 7, 2008, s. 578-592.
- [14] Podrez-Radziszewska M., Głuszewski W.: Radiacyjna modyfikacja polietylenowych implantów chirurgicznych. „*Współczesna Onkologia*”, nr 9(8), 2005, s. 365-367.
- [15] Szarek A.: *Biomechaniczne i biomateriałowe determinanty aseptycznego obluźniania endoprotez stawu biodrowego*. Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2015.
- [16] Woźniak D., Kukielka L., *Kompozyty w technice w aspektach materiałów nowej generacji*. „*Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe*”, nr 6(15), 2014, s. 292-296.

MODELING OF STRESS AND DEFORMATION STATE IN UHMWPE – CARBON FIBRE COMPOSITE

Abstract: The article is devoted to modeling the state of stresses and strains for composite UHMWPE – carbon fiber. The introductory part covers issues related to biomaterials, composites and properties of matrix and fibers of analyzed material. In turn, the research part presents issues regarding the preparation of the model of the tested composite and the results of computer simulations, carried out in the ADINA program, illustrating the distribution of stresses and strains of the material resulting from compression.