

Lekkie roboty medyczne – przegląd materiałów i technologii do ich wytwarzania

RAPORTY MrR

Andrzej Czulak^{1,2}, Karol Kozak^{3,4}

¹ New Era Materials Sp. z o.o. ul. Komandosów 1/7, 32-085 Modlniczka

² Właściciel portalu kompozyty.net, kontakt@kompozyty.net

³ Fraunhofer IWS, Winterbergstraße 28, D-01277 Dresden, Germany

⁴ Medical Faculty, Dresden University of Technology, Fetscherstraße 74, D-01307 Dresden, Germany

Robot medyczny obecnie jest narzędziem, a w przyszłości rodzajem partnera lekarza w procesie rehabilitacji, terapii czy diagnostyki. Jego część mechaniczna składa się w większości przypadków z podstawy (często mocowania do istniejących elementów infrastruktury medycznej), ramienia lub ramion oraz narzędzia roboczego (efektora). Powinien być sprawny i lekki, nieograniczać przestrzeni pracy lekarza, być bezpieczny dla pacjenta i zespołu medycznego.

Materiały. Obecnie elementy robotów wytwarzane są z materiałów należących do podstawowych grup materiałów inżynierskich, do których możemy zaliczyć:

- metale i ich stopy,
- polimery,
- materiały ceramiczne.

Podstawą podanej klasyfikacji jest istota wiązania między atomami tworzącymi dany materiał, utrzymujących je w skoordynowanych przestrzennie układach i determinujących podstawowe własności materiału. Ponadto można wymienić materiały kompozytowe, tworzone przez połączenie dowolnych dwóch z wymienionych materiałów inżynierskich w monolityczną całość, co zapewnia uzyskanie innych własności od właściwych dla każdego z materiałów składowych.

Próby rozwiązania wielu problemów robotów medycznych sprowadzają się do poszukiwania możliwości zastosowania nowych materiałów konstrukcyjnych: tworzyw sztucznych i kompozytów. Dużą niedogodnością przy stosowaniu materiałów izotropowych jest brak możliwości dopasowania właściwości materiałowych do występujących obciążeń, co stanowi ogromny problem w projektowaniu

elementów, które z jednej strony powinny zapewnić ogromną sztywność oraz wytrzymałość, a z drugiej strony powinny być możliwie lekkie. Taką możliwość dają kompozyty, gdzie łączy się zazwyczaj dwa lub więcej materiałów, o uzupełniających się właściwościach.

Kompozyty. Materiał kompozytowy jest połączeniem dwóch lub większej materiałów, które zachowują swoją tożsamość. Spośród różnych kombinacji najlepsze własności mechaniczne uzyskuje się, łącząc bardzo wytrzymałe, włókna ciągłe, z jednorodną, chemicznie utwardzalną żywicą polimerową. Dwu- lub wieloskładnikowość materiału umożliwia wykorzystanie pożądaných własności poszczególnych składników. Materiały polimerowe cechują się zazwyczaj stosunkowo małą sztywnością i dość dużą wytrzymałością, której zazwyczaj nie można wykorzystać, gdyż wymagałoby to odkształceń przekraczających znacznie wielkości uznane za dopuszczalne w technice.

W wyniku wzmocnienia polimerów włóknami o dużej wytrzymałości uzyskuje się jednocześnie zwiększenie sztywności i wytrzymałości, zmniejszając zarazem, przez wprowadzenie koncentracji naprężenia, niepotrzebną w tym przypadku małą wytrzymałość osnowy.

Własności wytrzymałościowe kompozytów włóknistych zależą głównie od dwóch czynników. Pierwszym z nich, jest odpowiednie zaprojektowanie struktury kompozytu, doboru rodzaju oraz kąta ułożenia włókien wzmocnienia, jak również materiału osnowy. Drugim, wpływającym na jakość materiału kompozytowego, jest opracowanie lub wykorzystanie odpowiednich technik wytwórczych zapewniających zachowanie postawionych założeń.

Dotychczas znanymi i stosowanymi metodami wytwarzania profili kompozytowych wzmocnionych włóknem ciągłym, wykorzystywanymi do wytwarzania elementów nośnych robotów medycznych były techniki wykorzystujące proces nawijania rowingu na rdzeń lub liner. Ta metoda spełnia swoje zadanie dla profili prostych, o ograniczonej długości. W przypadku złożonych struktur i skomplikowanych elementów jak trójniki albo zmiennokształtne profile zamknięte ramion manipulatorów, metoda nawijania wymaga dodatkowych nakładów związanych z pracą ręczną. Wiąże się to bezpośrednio z wydłużeniem czasu produkcji oraz wzrostem ceny produktu finalnego. Wadą tej metody jest również problem z zapewnieniem zadowalającej powtarzalności, ponieważ należy ona do półautomatycznych metod wytwarzania.

Zarówno lżejszą, jak również tańszą alternatywą w stosunku do tradycyjnych metali, tworzyw sztucznych oraz kompozytów wzmocnionych nawijanym włóknem szklanym staje się nowa grupa materiałów kompozytowych wzmocnionych wyplotem z włókien ciągłych. Ta jeszcze młoda grupa materiałowa oferuje oprócz ogromnego potencjału ekonomicznego bardzo dużą swobodę konstruowania charakteryzującą się możliwością dopasowania ułożenia włókien do rodzaju i kierunku występującego obciążenia.

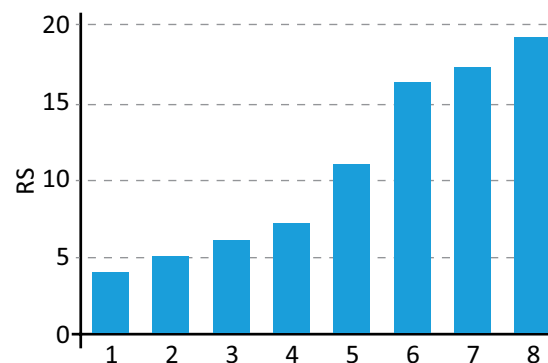
Do nowej grupy tekstylnych metod wytwarzania należą również techniki wyplotu. Różnica w stosunku do metod nawijania polega na pełnej automatyzacji procesu produkcji charakteryzującego się możliwością zmiany kąta ułożenia oraz rodzaju zbrojenia. W ostatnich latach techniki wyplotu są nadal intensywnie rozwijane, aczkolwiek osiągnęły już wysoki poziom technologicznej dojrzałości. Pełna automatyzacja procesu wytwórczego pozwala zredukować koszty w stosunku do nawijania włókien ciągłych nawet o połowę. W przypadku metody wyplatania, dzięki zastosowaniu ram wyplatających zintegrowanych z wieloosiowymi robotami, możliwe jest wykonanie szerokiej gamy profili i kształtek bez udziału pracy ręcznej.

W pracach opisujących materiały kompozytowe wielokrotnie zaznaczano, iż kompozyty są doskonałym materiałem do konstruowania elementów cienkościennych, a więc takich, których grubość ścianki jest znacznie mniejsza od pozostałych wymiarów charakterystycznych. Typowym przykładem takich elementów mogą być ramiona robota wykonane w postaci profili zamkniętych. Głównymi zaletami materiałów kompozytowych predestynującymi je do ich wytwarzania są: łatwa możliwość dostosowania funkcji, wymiarów, kolorystyki, a przede wszystkim własności wytrzymałościowych i odpornościowych (np. na działanie mediów chemicznie agresywnych). Ta cenna zaleta kompozytów wiąże się z tym, że

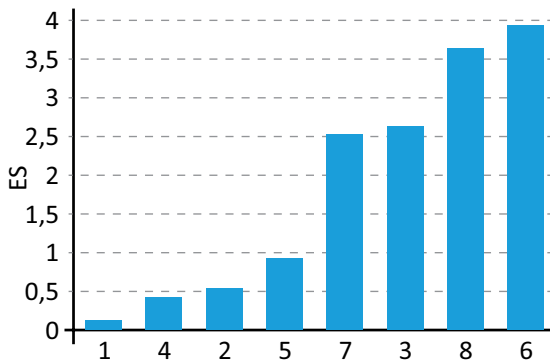
w nowoczesnych procesach ich wytwarzania można stosunkowo prosto sterować wieloma parametrami produkcyjnymi w szerokim zakresie zmienności każdego z nich. Dzięki temu możliwa jest optymalizacja np. pod względem nakładów finansowych realizacji wielu inwestycji. Jest to szczególnie opłacalne w obiektach o dużej kapitałochłonności, z dużą ilością instalacji technologicznych, wykorzystując zalety tej rodziny materiałów, do których należą: bardzo niski ciężar konstrukcji kompozytowych, duża trwałość i niezawodność elementów kompozytowych. Przejawia się ona odpornością na korozję, wywołaną przez kontakt z różnorodnymi mediami, szczególnie chemicznie agresywnymi, a także dużą odpornością na tzw. starzenie, wywołane przez promienie UV. Badania trwałości czasowej laminatów dowiodły, że ich żywotność wynosi nie mniej niż 50 lat, przy czym po takim okresie użytkowania degradacja własności wytrzymałościowych jest na poziomie ok. 20 %, tzn. wytrzymałość po 50 latach stanowi co najmniej 80 % wytrzymałości początkowej.

Porównanie materiałów. Oceniając właściwości materiału można używać czasem pojęcia: sztywności właściwej i wytrzymałości właściwej, odnosząc wartości bezwzględne modułu Younga i wytrzymałości na rozciąganie do ciężaru właściwego (gęstości) materiału. Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono wykresy porównawcze własności kilku typowych materiałów konstrukcyjnych, w tym również kompozytów.

Uwzględniając zestawienie z wykresów 1 i 2 można ocenić, iż metale nie są idealnym materiałem konstrukcyjnym pod względem wytrzymałości i sztywności, szczególnie dla elementów ruchomych, dlatego też niezbędne jest wdrażanie nowych rozwiązań uwzględniających przydatność materiałów



Rysunek 1. Wytrzymałość właściwa różnych materiałów konstrukcyjnych; 1 – poliamid 6, 2 – winidur, 3 – stal konstrukcyjna zwykłej jakości, 4 – polistyren, 5 – poliamid 6 + 35 % włókna szklanego, 6 – stop aluminium PA-6, 7 – drewno sosnowe, 8 – poliester + 30 % tkaniny szklane [Andrzej P. Wilczyński; Polimerowe kompozyty włókniste. Właściwości, struktura projektowanie; Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1996]



Rysunek 2. Sztywność właściwa różnych materiałów konstrukcyjnych; 1 – poliamid 6, 2 – winidur, 3 – stal konstrukcyjna zwykłej jakości, 4 – polistyren, 5 – poliamid 6 + 35 % włókna szklanego, 6 – stop aluminium PA-6, 7 – drewno sosnowe, 8 – poliester + 30 % tkaniny szklanej [Andrzej P. Wilczyński; Polimerowe kompozyty włókniste. Właściwości, struktura projektowanie; Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1996]

kompozytowych. Należy tutaj dodać, że materiał kompozytowy, w którym fazą zbrojącą będą ciągłe włókna węglowe będzie miał jeszcze lepsze wartości sztywności i wytrzymałości właściwej.

Materiały kompozytowe pozwalają na uzyskanie pożądanego rezultatu poprzez łączenie materiałów o uzupełniających się własnościach. Spośród różnych kombinacji najlepsze efekty uzyskuje się, łącząc bardzo wytrzymałe, długie włókna węglowe, z jednorodną, chemicznie utwardzalną żywicą poliestrową. Materiały te należą do grupy kompozytów wzmacnianych włóknem ciągłym dalej nazywanymi kompozytami włóknistymi.

Mechaniczne właściwości kompozytów włóknistych zależą od trzech podstawowych czynników:

- sztywności i wytrzymałości włókien,
- sztywności osnowy kompozytu,
- wytrzymałości połączenia między włóknami a osnową.

Stosunki tych parametrów wpływają na właściwości mechaniczne samego kompozytu i mechanizm jego niszczenia.

Teoretyczna wytrzymałość mechaniczna ciał zwiększa się przeważnie wraz ze wzrostem modułów sprężystości i maleje wraz ze wzrostem odległości między sąsiednimi atomami. Tak więc wytrzymałe ciała stałe powinny charakteryzować się wysokimi modułami sprężystości i możliwie dużą liczbą atomów w objętości jednostkowej. Tym wymaganiom odpowiada szczególnie węgiel. Zasadniczo struktura wzmacnienia w kompozytach może mieć różną postać, a mianowicie:

- włókna ciągłego,
- tkaniny wzmacniającej w dwu kierunkach (w płaszczyźnie), a także tkanin dystansowych i wielowarstwowych,

- dzianiny wzmacniającej,
- maty z włókien ciętych lub ciągłych w postaci pętli,
- włókna ciętego,
- proszków.

Rodzaj wzmacnienia wpływa głównie na wytrzymałość i sztywność kompozytu, natomiast postać wzmacnienia na stopień właściwości anizotropowych (silne, słabe, quasiizotropowe). W przypadku projektowania wyjątkowo sztywnego i lekkiego elementu ramienia manipulatora można jedynie wziąć pod uwagę kompozyty zbrojone włóknem węglowym czyli CFRP (ang. *Carbon Fibres Reinforced Plastics*).

Kompozyty dzięki swojej budowie dają ogromne możliwości konstruktorom. Nie tylko ze względu na łatwość kształtowania, ale głównie ze względu na możliwość projektowania ich właściwości, co jest zasadniczą różnicą w stosunku do klasycznej metody projektowania elementów konstrukcyjnych. Projektowanie własności mechanicznych kompozytów włóknistych polega na doborze materiału osnowy i wzmacnienia, w ten sposób by powstały materiał kompozytowy spełniał założone warunki konstrukcyjne. Najczęściej ten proces prowadzony jest kilku-etapowo z wykorzystaniem metod numerycznych.

Podstawowym zadaniem jest określenie warunków pracy projektowanego elementu, na które składają się: wielkość i rodzaje obciążeń, środowisko pracy, oraz gabaryty elementu, które mają bezpośredni wpływ na dobór struktury laminatu. Przez dobór struktury laminatu rozumie się zazwyczaj wybór jednej z wielu różnych możliwości w zakresie:

- rodzaju materiału osnowy,
- rodzaju materiału wzmacnienia,
- określenia, czy laminat ma być hybrydowy, czy o jednym rodzaju wzmacnienia,
- określenia liczby warstw laminatu,
- decyzji, czy laminat ma być symetryczny,
- określenia kątów ułożenia włókien i warstw kompozytu,
- określenia priorytetów wymagań projektowych.

Najważniejszymi zagadnieniami w procesie projektowania jest określenie kątów ułożenia włókien warstw kompozytu oraz dobór rodzaju materiału wzmacnienia i osnowy. Symulacje pozwalają wyznaczyć liczbę warstw, określoną założonymi stosunkami udziałów poszczególnych rodzajów warstw w całej grubości laminatu. Otrzymane wyniki nie zawsze zapewniają uzyskanie struktury optymalnej, jednak przeprowadzając kolejne próby, z różnymi kątami ułożenia warstw i różnymi ich udziałami, możliwe jest zoptymalizowanie struktury, jednak jest to proces pracochłonny, który powinien być dokonany przez odpowiedni program narzędziowy teorii laminowania czego przykładem może być program Ansys lub NX.

Podsumowując – warto zwrócić uwagę na niezwykle możliwości jakie dają materiały kompozytowe dla robotów medycznych. Podstawowym założeniem inżynierii materiałowej jest dążenie do uzyskania materiału o określonych, pożądanych właściwościach, natomiast w następnej kolejności decydujące są: koszt i łatwość technologii, dostępność lokalna surowców i podobne czynniki. Dzięki wybranej technologii możemy osiągnąć cel w postaci robota o wymaganych cechach użytkowych oraz zaletach ekonomicznych.

KOMENTARZ REDAKCYJNY

Zbigniew Nawrat

Lekki Robin Heart

Robot składa się z mechanicznego manipulatora, systemu sterowania i programowania. O jego cechach użytkowych, precyzji, trwałości w znacznej mierze decyduje wybór rozwiązań konstrukcyjnych i materiałów. Szczególnym obszarem badań w tym zakresie, przez wymagania bezpieczeństwa, bezpośredni udział w obsłudze lub obecność/aktywność wewnątrz ciała pacjentów, jest robotyka medyczna. Potrzeba odpowiedniej jakości zarówno sposobu działania jak i powierzchni materiału, utrzymanie czystości a często potrzeba sterylizacji, potencjalnie długi czas współdziałania z/lub w organizmie (sztuczne narządy też są robotami medycznymi) powoduje, że ogromną rolę w sukcesie inżyniera konstruktora i jego pacjenta odgrywa właściwy dobór materiału robota medycznego.

Projekt Robin Heart, prowadzony od 2000 r. w FRK jest dobrym przykładem roli jaką należy przykładać do technologii wykorzystywanych do produkcji robotów. Typowym przykładem niech będzie rozwój robota toru wizyjnego Robin Heart Vision od modelu wykonanego głównie z aluminium i stali, przez robota Robin Heart PortVisionAble 0 wykonanego w znacznej mierze w technologii druku 3D oraz z kompozytów węglowych do studyjnego ultralekkiego robota Robin Heart Pelikan. Tu walka o obniżenie wagi przy zachowaniu wszystkich cech użytkowych robota asystującego podczas operacji endoskopowej jest szczególnie istotna ponieważ robot mocowany jest do stołu operacyjnego. Chirurg podczas operacji małoinwazyjnej często przestawia pozycję stołu dla wygody operowania narzędziami wprowadzonymi przez niewielkie otwory w powłokach ciała pacjenta, więc umocowanie robota bezpośrednio do stołu

operacyjnego eliminują potrzebę dodatkowych manipulacji ustawieniem robota (często są to roboty sferyczne, ze stałym punktem w miejscu przejścia przez ciało pacjenta).



Dzięki wprowadzeniu technologii kompozytowych jesteśmy bliscy osiągnięcia celu: lekkiego, sprawnego, niezawodnego robota – partnera lekarza podczas operacji mini-inwazyjnych.

- [1] Patent PL – 409735 – Ramię robota medycznego, Twórcy: Z. Nawrat, K. Lis, K. Lehrich, Ł. Mucha. 2016
 [2] Wzór przemysłowy W – 123846 – Manipulator medyczny (model Pelikan) Twórcy: Z. Nawrat, K. Lis, K. Lehrich, Ł. Mucha. 2015