

Materiały kompozytowe składają się z mocnych włókien zatopionych w spoiwie. Większość kompozytów ma w swojej nazwie słowo "szkło", a oznacza to po prostu żywicę poliestrową wzmocnioną włóknem szklanym. Zaawansowane kompozyty są mieszaniną takich włókien jak: polimerowe, węglowe, ceramiczne i metalowe. Zazwyczaj włókna te są termicznie impregnowane w żywicy. Są też spoiwa zawierające materiały termoplastyczne, metale, a nawet ceramikę. Te zaawansowane technologicznie materiały potrafią mieć wytrzymałość i sztywność równą metalom, przy dużo mniejszym ciężarze. Co więcej, ponieważ spoiwo jest utwardzane albo w wyniku procesów chemicznych, albo w efekcie oddziaływania podwyższonej temperatury, to ten złożony produkt może przybierać dowolne niemal kształty. W przeciwieństwie do metali, materiały kompozytowe są anizotropowe, co oznacza, że ich sztywność i wytrzymałość zależy wyłącznie od kąta pod którym układane są włókna zatopione w spoiwie. Ma to taką pozytywną cechę, że w dowolnym miejscu można wpływać na sztywność i wytrzymałość kompozytu zmieniając kąt zaplotu nitek, oraz ilość warstw. Technika ta w poważnym stopniu ma wpływ na redukcję ciężaru.

Ramy kompozytowe mogą być wykonywane w duchu tradycyjnym (rury łączone za pomocą łączników), lub też jako skorupowe (*Monocoque*), gdzie "szkieletem" dla kompozytu jest albo to pianka, albo pęcherz wypełniony gazem. Możliwa też jest metoda łączenia rur w procesie laminacji wysokociśnieniowej, co w efekcie daje konstrukcję będącą czymś pośrednim pomiędzy skorupową, a tradycyjną.

W przypadku rur wykonanych z metalu niemożliwa jest taka kompozycja materiału, aby jego skład w zależności od potrzeb, zmieniał się wzdłuż długości rury. To co jest niemożliwe w przypadku metalu, możliwe jest w przypadku tworzyw kompozytowych - w dowolnym miejscu kompozytowej rury można dowolnie niemal zaprojektować i wykonać odcinek o zamierzonej gęstości, sztywności, wytrzymałości itd. Udaje się tego dokonać zmieniając kąt zatopionych w spoiwie włókien węglowych, grubość warstw i stosując różne kombinacje materiałów. W ten sposób finalne właściwości tworzywa można dokładnie dopasować do specyficznych zastosowań. Wreszcie to, co jest być może najbardziej godne podkreślenia - park maszynowy producenta rur kompozytowych jest dużo tańszy od odpowiadającego mu parku producenta zaawansowanych technologicznie rur metalowych.

Kompozytowe rury **typowo** wykonywane są z wykorzystaniem stalowego rdzenia (następnie usuwanego) poprzez nawijanie na nim nitek z włókna węglowego w różnoraki sposób.

Włókna węglowe mogą być w prosty sposób uformowane w struktury monolityczne poprzez ich krzyżowanie i wykorzystanie spoiwa. Uzyskuje się w ten sposób materiał o wysmienitych parametrach mechanicznych. Dość powiedzieć, że materiał kompozytowy używany do budowy ram rowerowych posiadając zaledwie ćwierć ciężaru odpowiadającemu mu pod względem sztywności stopowi żelaza, ma aż cztery razy większą wytrzymałość. Dodatkowo materiały kompozytowe są wyjątkowo odporne na zjawisko "zmęczenia materiałowego" oraz zapewniają najlepsze z wszystkich znanych materiałów tłumienie drgań.

Podatność na wibracje i tłumienie drgań to dwa najistotniejsze parametry cechujące ramę rowerową, a jednocześnie dwa najrzadziej analizowane w opracowaniach naukowych. Powodem tego faktu jest zbyt duża ilość czynników mających nań wpływ, łącznie z takimi w jaki sposób pojedyncze atomy materiału absorbują, a następnie wytracają energię wibracji, jaką strukturę ma analizowany materiał, a nawet jaki został zastosowany rodzaj zewnętrznego pokrycia. W konsekwencji niezmiernie trudno jest przewidzieć jak dany materiał będzie reagował na czynniki wywołujące wibracje. Generalnie tłumienie drgań w materiałach kompozytowych jest zdecydowanie lepsze aniżeli w jakichkolwiek metalach, co dobrze tłumaczy dlaczego są one preferowanym tworzywem w samochodach wyścigowych oraz w specjalnych konstrukcjach lotniczych.

Z punktu widzenia fizyki główna różnica pomiędzy metalami a kompozytami polega na tym, że te ostatnie najlepiej znoszą siły ściskające, podczas gdy metale jednakowo dobrze akceptują siły pochodzące z wszystkich kierunków. Kompozyt pod względem budowy można przyrównać do wiązki strun z włókna węglowego nasyconej spoiwem. Wytrzymałość materiału kompozytowego tkwi w strunach, a nie w spoiwie. Jeśli struny są dodatkowo rozciągane, to odkształcenie po przyłożeniu siły prostopadłej do kompozytowej belki będzie mniejsze. W przeciwnym wypadku może się ona zachowywać niczym deska w trampolinie wykazująca drgania gasnące. Podstawowe zadania spoiwa to utrzymywanie włókien węglowych w określonym położeniu względem siebie, przenoszenie sił wzdłuż włókien, zabezpieczanie włókien przed wpływem czynników zewnętrznych i nadanie strukturze wytrzymałości na prostopadłe uderzenia. Kierunkowa struktura włókien w materiale kompozytowym powoduje, że dotychczasowe prawa fizyki co do zachowania się jednorodnej struktury monolitycznej ulegają całkowitemu przeobrażeniu.

Porównanie materiałów z których wykonuje się ramy rowerowe

Stal		Tytan	
Zalety <ul style="list-style-type: none"> niska cena spora wytrzymałość dobra sztywność dość dobre tłumienie drgań łatwość w obróbce i naprawie 	Wady <ul style="list-style-type: none"> duży ciężar właściwy duża podatność na korozję ograniczenia konstrukcyjne związane z małym asortymentem rur katalogowych spawanie i lutowanie zmniejsza wytrzymałość w obrębie oddziaływania wysokiej temperatury 	Zalety <ul style="list-style-type: none"> mały ciężar właściwy duża wytrzymałość zdolność do tłumienia drgań mała podatność na korozję 	Wady <ul style="list-style-type: none"> wysoka cena ograniczenia konstrukcyjne związane z małym asortymentem rur katalogowych trudność w obróbce i naprawie trudność w lokalizowaniu źle wykonanych spawów mniejsza sztywność
Aluminium		Włókno węglowe	
Zalety <ul style="list-style-type: none"> niska cena mały ciężar właściwy stosunkowo duża wytrzymałość duża sztywność w stosunku do ciężaru niezła odporność na korozję w środowisku pozbawionym soli 	Wady <ul style="list-style-type: none"> podatność na "zmęczenie materiałowe" słabe tłumienie drgań trudność w naprawie skłonność do pęknięcia w obrębie spawów często konieczny proces ulepszania termicznego 	Zalety <ul style="list-style-type: none"> mały ciężar właściwy bardzo duża wytrzymałość najlepsza ze wszystkich znanych materiałów zdolność do tłumienia drgań nieograniczona w żaden sposób podatność na inwencję twórczą konstruktora ramy absolutna odporność na korozję olbrzymia odporność na "zmęczenie materiałowe" niektóre konstrukcje są łatwo naprawialne 	Wady <ul style="list-style-type: none"> stosunkowo wysoka cena wciąż nie do końca opanowana technologia wytrzymałość i sztywność uzależniona jest od konstrukcji ramy

Najważniejsza dobra konstrukcja

Jeśli tylko konstruktorzy ramy karbonowej posiadali odpowiednią wiedzę na ten temat i nie popełnili istotnych błędów, to rama taka ma wszelkie szanse być mocniejsza, sztywniejsza, lżejsza i bardziej długowieczna od jakiegokolwiek ramy metalowej.

1. Jak istotne jest doświadczenie konstruktora i oraz próby prototypu

Konstruktor ramy rowerowej analizując na wstępie wszystkie zakładane parametry mechaniczne, częstokroć zderza się z wymaganiami przeciwstawnymi. Korzystając z zaawansowanej nauki o materiałach oraz ze specjalizowanego oprogramowania komputerowego daje się przeprowadzić złożoną analizę zjawisk w całej ramie poprzez analizę zjawisk w skończonym, pojedynczym elemencie. Jednak nie zmienia to faktu, że i tak na samym końcu tego złożonego procesu znajdują się testy drogowe, których w żaden sposób nie da się wyeliminować.

Pełne wykorzystanie wszystkich cech materiałów kompozytowych wymaga złożonej wiedzy o ich technologii wraz z wiedzą wywodzącą się z doświadczeń czysto praktycznych. Niestety producenci mają często tendencję do przeważania szali na jedną stronę - albo kładą nacisk na technologię zaniedbując testy, albo na odwrót.

2. Komfort jazdy

Konstruktorzy zauważyli w materiałach kompozytowych idealny materiał umożliwiający tanie zmniejszenie ciężaru ramy nie pogarszając jednocześnie jej sztywności. Wszakże niektóre wczesne modele ram karbonowych zyskały opinię zbyt elastycznych, podczas gdy inne miały tak dużą sztywność, że jazda na nich była męką. Częściowo przyczyną powstawania tych fatalnych konstrukcji były wcześniejsze wieloletnie doświadczenia producentów wywodzące się z wyłącznej produkcji ram metalowych i mylne przeświadczenie, że można bez żadnych złych konsekwencji po prostu zastąpić jeden materiał drugim. Pomimo tego, że wyśmienite tłumienie drgań jest cechą włókna karbonowego "samą w sobie", to jednak właściwość ta musi być uwzględniona już na etapie ustalania kształtu ramy. Sztuką jest takie zaprojektowanie kształtu, aby rama charakteryzowała się dużą sztywnością wzdłużną, oraz stosowną elastycznością pionową, która gwarantuje odpowiedni dla rodzaju jazdy komfort.

Innym źródłem pogorszenia tłumienia drgań we wczesnych konstrukcjach były miejsca łączenia się rur (mufy). Tam, gdzie łączy się dwa materiały o zupełnie odmiennych cechach (włókno węglowe i aluminium) powstaje strefa nieciągłości. Ponieważ drgania przenoszące się wzdłuż rury natrafiają gwałtownie na taką strefę, to miejsce takie może być źródłem kumulowania się naprężeń. Oprócz tego, że miejsce takie jest narażone na uszkodzenie, to dodatkowo jest ono powodem gorszego wytłumiania drgań.

3. Rozmiar ramy

Tak jak drogi garnitur szyty jest na miarę, tak i zaawansowana technologicznie rama rowerowa powinna mieć rozmiar stosowny do jej użytkownika. Jednakże w przypadku ramy rowerowej warunkowi temu towarzyszy wymóg, aby geometria ramy była dostosowana do biomechaniki kolarza oraz wymaganego komfortu jazdy. W przypadku proporcjonalnie zbudowanego ciała ludzkiego najczęściej daje się dopasować prawidłowo ramę pochodzącą od producenta seryjnego. Jeśli ma się jednak do czynienia z pewnymi odstępstwami od normy, konieczne jest dopasowywanie ramy do indywidualnego kolarza.

Spora część współczesnych ram karbonowych wykonana jest w ten sposób, że łączniki rur (mufy) wykonane są również z kompozytu i stanowią nierozdzielny element całej konstrukcji. Są to tzw. konstrukcje *aero*. W takich przypadkach dopasowywanie ramy do indywidualnych potrzeb kolarza jest w zasadzie niemożliwe, co należy uznać za największą wadę konstrukcji skorupowych. W rezultacie (koszty!) producenci takich ram oferują bardzo ograniczony asortyment rozmiarów. Z drugiej jednak strony niewielkie opory aerodynamiczne ramy skorupowej, w porównaniu z konstrukcją klasyczną zawierającą rury łączone mufami, mają bardzo mały udział procentowy.

4. Łączenie włókna węglowego z metalami

Najsłabszym ogniwem ramy metalowej są połączenia pomiędzy rurami. Zasadniczo wszystkie uszkodzenia takich ram zachodzą właśnie w tych miejscach - albo to z powodu przegrzania przy spawaniu, albo też sama konstrukcja sprzyja gromadzeniu się naprężeń w tych newralgicznych punktach. Stare kolarskie powiedzonko mówi, że łańcuch pęka zawsze tam, gdzie jest najsłabsze ogniwo.

Konwencjonalne łączenie rur karbonowych za pomocą aluminiowych łączników jest metodą kontrowersyjną. Czy spoiwo pomiędzy włóknom węglowym a metalem charakteryzuje się wystarczającą adhezją? Czy pomiędzy obydwojema materiałami nie pojawi się ogniwo elektrochemiczne? Czy różnica rozszerzalności termicznej kompozytu i metalu jest wystarczająco mała? Pytania te można by mnożyć. Dość, że skumulowanie w jednym miejscu tych wszystkich czynników jest zabiegiem dość ryzykownym.

A rower nie zawsze znajduje sprzyjające mu warunki. Czasem wożony jest w upalną pogodę na dachu samochodu, albo wręcz przeciwnie, w luku bagażowym samolotu. Takie zmiany temperatury, w szczególności jeśli gwałtowne, albo szybko po sobie następujące, mogą doprowadzić do wyraźnego osłabienia w obrębie łączników. Szczególnie narażony

jest obszar rury suportowej oraz główki ramy. W związku z tym łączniki powinny być wykonane z metalu o najbardziej zbliżonym współczynniku rozszerzalności termicznej, co włókno węglowe - najlepiej z tytanu. Dodatkowo tytan charakteryzuje się bardzo dobrą w porównaniu aluminium i stopami żelaza odpornością na korozję.

Najgorszym metalem do połączeń z włóknem węglowym wydaje się być aluminium, które nie dość, że ma największy współczynnik rozszerzalności termicznej, to w dodatku tworzy z materiałami kompozytowymi ogniwo, łatwo koroduje i ma fatalną charakterystykę zmęczenia.

Łączenie części metalowych z włóknem węglowym zawsze było problemem dla konstruktorów ram kompozytowych. Związane jest to z faktem, że na jakość połączenia wpływ ma zbyt wiele czynników, takich jak: czas i sposób przechowywania kleju, dokładność doboru jego składników, wpływ czynnika ludzkiego. Jeśli zakłada się zastosowanie łączników aluminiowych to muszą one być pokryte warstwą pasywującą, aby uniemożliwić powstanie ogniwa elektrochemicznego. Niektóre firmy pokrywają w tym celu części aluminiowe warstwą tlenku aluminium (proces eloksalacji), podczas gdy inne preferują użycie specjalnego kleju mającego własności pasywujące.

Jeszcze inna metoda polega na nitowaniu rur kompozytowych z łącznikami. W tym celu w materiale kompozytowym muszą być wiercone otwory, co znacznie osłabia materiał w tych miejscach i dlatego jest to najgorszym sposobem rozwiązania tego problemu.

Najlepszym rozwiązaniem problemu jest zastosowanie części metalowych wykonanych z materiału o identycznych właściwościach fizykochemicznych jak materiał kompozytowy. Materiałem takim ze wszechmiar godnym polecenia jest tytan.

5. Powtarzalność procesu produkcyjnego

Kompozytowe rury po umieszczeniu ich w kompozytowych łącznikach muszą być od wewnątrz rozprężone w celu ich jednoznacznego zablokowania. W tym celu wbija się do wnętrza rury gumowy rdzeń, albo umieszcza w jej wnętrzu zwiększającą swoją objętość pod wpływem temperatury piankę, ew. nawet pęcherz wypełniony gazem pod wysokim ciśnieniem. Po zablokowaniu rury wewnątrz łącznika, pianka lub pęcherz nie są usuwane i pozostają wewnątrz struktury.

Operacja tak jak opisana powyżej często powoduje powstanie wybruszenia w miejscu zakładki. Taka "nadlewka" kompozytu musi być usunięta z powodów estetycznych poprzez bardzo delikatne zeszlifowanie, ale niestety miejsce to ulega osłabieniu.

Powstała w efekcie takiego procesu technologicznego rama jest stosunkowo droga, a w dodatku niemożliwe jest w trakcie procesu produkcyjnego wpływanie na jej geometrię i rozmiar. Znacznie mniejsze problemy występują przy produkcji skorupowych wsporników siodła oraz widelców, które to produkty w sposób dużo bardziej elastyczny dopasować można do różnych użytkowników. Dużo bardziej skomplikowany kształt ramy rowerowej stwarza więcej potencjalnych sprzeczności, a z im mniejszej ilości części rama się składa, tym łatwiej cały proces kontrolować. Generalnie powtarzalność parametrów jest bardzo dobra w takich procesach technologicznych, gdzie rury kompozytowe formowane są z wykorzystaniem metalowego rdzenia. Rury takie mogą być formowane w efekcie jednego tylko, lub kilku procesów odbywających się naraz: układania ręcznego warstw, nawijania nici karbonowych ze szpuli, lub całych warstw karbonowego "materiału" z rolki, nawijania nici karbonowych wstępnie ze sobą splecionych lub sklejonych w procesie wysokotemperaturowym. Uzwojenie nici karbonowych wstępnie splecionych lub sklejonych ma pewną istotną przewagę nad innymi metodami. Istotą tego systemu jest uzwojenie karbonowych nici, które wstępnie już są napięte - jest to niejako pewna analogia do produkcji sprężonego żelazobetonu. Zastosowanie włókien karbonowych wstępnie naprężonych skutkuje nadaniem tak powstałej strukturze niezwykle korzystnej cechy - przyłożona do struktury kompozytowej siła natychmiast niemal oddziałuje na mocne karbonowe włókna z pominięciem ryzykownego oddziaływania na stosunkowo słabe spoiwo, którego zadanie jest zupełnie inne. Mianowicie zasadniczo nie ma ono na celu przenoszenia jakichś istotnych sił, a wyłącznie utrzymywanie wszystkich karbonowych włókien w stosownym względem siebie położeniu. Zauważyć należy, że zawsze kiedy następuje uszkodzenie z jakiegoś powodu kompozytowej struktury, to najpierw pęka sztywne spoiwo, a ew. na samym końcu uszkodzeniu ulegają karbonowe nici. Również za efekt "starzenia materiałowego", chociaż znikomo występujący w porównaniu z metalami, w gruncie rzeczy odpowiedzialne jest spoiwo, a nie karbonowa nić!

6. Odporność na uszkodzenia

Rama rowerowa narażona jest na różnorakie uszkodzenia związane bezpośrednio z typową eksploatacją (np. zakleszczenie łańcucha, który wypadł z napędu), lub zupełnie nietypowe (np. pochodzące od systematycznego uderzania tym samym miejscem ramy w słupki parkingowy). Niektórzy producenci w celu wzmocnienia nierzalicznych miejsc w ramie karbonowej stosują nawijanie włókien karbonowych na aluminiowym rdzeniu stanowiącym stały element ramy. Ramy takie są oczywiście odpowiednio cięższe. Również na odwrót - w celu "odchudzenia" ramy kosztem wytrzymałości częstokroć stosuje się mniejszą ilość warstw, lub mniejsze średnice włókien karbonowych.

Najbardziej odporne na uszkodzenia są prefabrykowane rury wytwarzane poprzez nawijanie karbonowych nici na stalowym rdzeniu. Najmniej zaś odporne na boczne uderzenia są ramy skorupowe wytwarzane poprzez układanie

karbonowych włókien na elastycznej formie wypełnionej sprężonym gazem. Dzieje się tak z powodu zbyt małego ciśnienia do którego można formę taką napęlić, a co również za tym idzie z powodu niewielkiego naprężenia wstępnego włókien.

7. Wykończenie

To jak starannie rama jest wykonana mówi wiele o powtarzalności procesu produkcyjnego. Rama z dużą ilością otworów technologicznych oraz nierównościami na powierzchni musi być pokryta szpachlówką, a następnie lakierowana najpierw warstwą podkładu, a dopiero na końcu warstwą ozdobną. Stwarza to dodatkowe problemy produkcyjne, a jednocześnie zwiększa ciężar ramy. W wypadku pęknięć na powierzchni lakieru, niesposób na pierwszy rzut oka powiedzieć, czy problem jest tylko natury estetycznej, czy też dotyka struktury materiału kompozytowego. Jedyna pozytywna rzecz, którą o lakierowaniu materiału kompozytowego można powiedzieć, to taka, że zabezpiecza ono powierzchnię przed działaniem promieni ultrafioletowych. Ponieważ jednak dostępne są lakiery bezbarwne z filtrem UV, więc należy zawsze obawiać się, że lakierowanie ramy karbonowej na określony kolor może służyć ukryciu niedoróbek produkcyjnych. Uzyskanie idealnej powierzchni w ramie kompozytowej jest trudne i bywa tak, że jest to jedyny powód dla którego wielu producentów ram boi się tego materiału.

Podsumowanie

Ramy wykonane z włókna węglowego posiadają najlepsze pożądane w kolarstwie wyczynowym własności spośród wszystkich materiałów, które do tej pory były używane. Posiadają bardzo dobrą sztywność boczną przy niezbędnej dla zachowania komfortu jazdy pewnej elastyczności pionowej, a jednocześnie mogą mieć ekstremalnie mały ciężar. Łączą w sobie zdolność do wyśmienitego tłumienia drgań wraz ze sztywnością niezbędną dla optymalnego przekazywania siły z pedałów do układu napędowego. Jednocześnie charakteryzują się najlepszą ze wszystkich znanych materiałów odpornością na "zmęczenie materiałowe" pomimo występowania uderzeń i sił skręcających. W końcu jako jedyne pozwalają na uzyskiwanie dowolnych kształtów i form, a dzięki akceptowaniu dostępnych szpachlówek i lakierów możliwe jest uzyskanie dowolnego wykończenia końcowego powierzchni zewnętrznej. Wciąż pytaniem bez odpowiedzi jest jednak, która technologia uwypukla wszystkie zalety i minimalizuje wady? Pewne technologie bowiem umożliwiają uzyskanie konstrukcji o bardzo dobrych wybranych parametrach, podczas gdy pozostałe parametry są tylko kompromisem.