
EKOMPENDIUM

KOMPOZYTOWE



AGH EKO-ENERGIA

Spis treści

• Dedykacja	3
• 1.Wstęp	4
• 2.Włókna.....	4
Włókno szklane	4
Włókno węglowe.....	5
Włókno aramidowe (Kevlar™)	7
Tkaniny hybrydowe.....	7
Włókna ekologiczne.....	8
Włókno bazaltowe.....	9
Włókno lniane.....	9
• 3.Rodzaje tkanin i splotów.....	10
Rodzaje splotów	10
Gramatura włókien.....	14
• 4.Materiały rdzeniowe (przekładki).....	14
Honeycomb	15
Soric	15
Pianka pieniona PVC	16
• 5.Żywice.....	16
Dodatki do żywic	17
• 6.Techniki laminacji	18
Wet lay	18
Pre-preg	19
Forged Carbon fiber	19
Infuzja próżniowa	19
• 7. Sprzęt do laminacji.....	20
• 8.Layout	25
Symulacje.....	27
Layout book	28
• 9. Stanowiska robocze i narzędzia	29

Stanowisko cięcia włókien	29
Stanowisko laminowania:	30
• 10.Przebieg procesów krok po kroku	30
Infuzja próżniowa	30
Pre-preg	38
Proces wytwarzania laminatu metodą wet lay	38
Forged Carbon Fiber	38
• 11. Formy	39
Wprowadzenie.....	39
Materiały form i kopyt.....	40
Projektowanie formy	41
Proces tworzenia formy pozytywowej.....	42
Wykonanie kopyta - frezowanie CNC.....	42
Obróbka	43
Laminowanie formy.....	44
Przygotowanie powierzchni.....	44
Nakładanie żelkotu	44
Układanie włókna szklanego i grzałek	45
Ściąganie formy z kopyta	47
Obróbka formy po ściągnięciu z kopyta	47
Grzałki.....	48
Wygrzewanie formy	49
• 12.Laminowanie paneli fotowoltaicznych.....	50

Dedykacja

EKOmpendium to zbiór naszej wiedzy na temat wytwarzania elementów kompozytowych, skierowany głównie do kół naukowych AGH rozpoczynających pracę z nimi. Pracując nad projektami **WINDY**, **HALYNA** oraz obecnym projektem **PERŁA**, zdobyliśmy znaczną wiedzę w zakresie wytwarzania materiałów kompozytowych, którą chcielibyśmy podzielić się ze wszystkimi zainteresowanymi, aby mieli łatwiejsze początki niż my.

W tym dokumencie postaramy się przybliżyć metody laminowania i podstawowe własności materiałów przez nas używanych wraz z przykładami zastosowania w projekcie **PERŁA**. Podzielimy się również wiedzą praktyczną i rozwiązaniami zaimplementowanymi u nas w zakresie używanego sprzętu.



1.Wstęp

Materiały kompozytowe włókniste zdobywają coraz większą popularność w wielu gałęziach przemysłu, od motoryzacji, przez protetykę aż po energetykę odnawialną. Wykorzystywane są w zastosowaniach, gdzie zarówno wytrzymałość jak i mała waga są kluczowe. Swoją bardzo dobrą wytrzymałość względem masy zawdzięczają połączeniu włókien ^[1], których zadaniem jest przenoszenie obciążeń oraz osnowy ^[2], której zadaniem jest spajanie i usztywnianie materiału oraz równomierne przenoszenie obciążeń. Większość stosowanych kompozytów włóknistych ma charakter anizotropowy ^[3], dlatego tak ważne w procesie projektowania elementu jest zaplanowanie układu włókien w taki sposób, aby wykorzystać w pełni ich potencjał. W zależności od rodzaju splotu materiał będzie miał różne właściwości (o czym więcej w punkcie **3.Rodzaje tkanin i splotów**), co daje nam wiele możliwości dostosowania naszego kompozytu idealnie pod nasze zastosowanie.

2.Włókna

Włókno szklane

Dobrze opracowana technologia wytwarzania tych włókien umożliwia niską cenę produkcji wysokiej jakości tkanin. W porównaniu do innych popularnych materiałów włóknistych, włókna szklane są mniej wytrzymałe⁴ i gęstsze. Mimo to, znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle ze względu na stosunek jakości (i wagi) do ceny. Dodatkowymi atutami tego materiału jest brak przewodnictwa elektrycznego, łatwość w laminowaniu i obróbce oraz przepuszczalność światła.

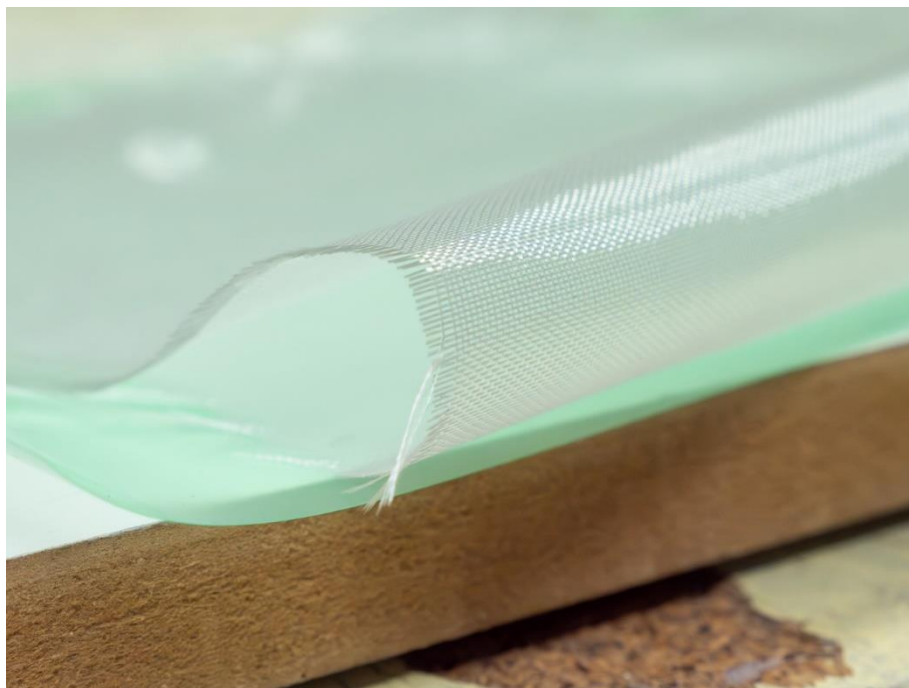
- Brak przewodnictwa - bardzo przydatne w zastosowaniach, gdzie mamy do czynienia z prądem. W samochodzie PERŁA stanowi materiał konstrukcyjny miski na baterię.
- Przepuszczalność świetlna- nieoczywisty atut, który został przez nas wykorzystany przy produkcji paneli fotowoltaicznych.

¹ Włókna- przed przesączeniem żywicą przypominają one normalne tkaniny (nie mają sztywności).

² Osnowa- tu: żywica polimerowa

³ anizotropowy- właściwości wytrzymałościowe takiego materiału są różne w zależności od kierunku oddziaływań

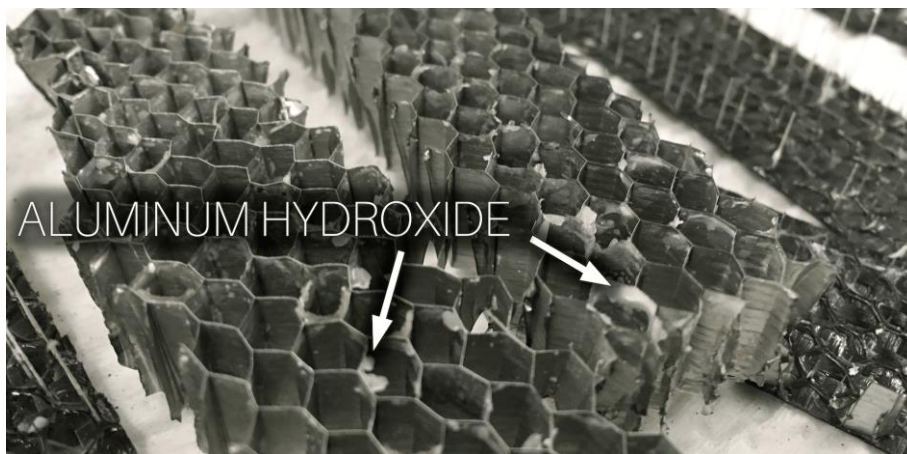
⁴Comparison of Carbon Fiber Kevlar and E Glass- <https://www.christinedemerchant.com/carbon-kevlar-glass-comparison.html>



Włókno szklane Plain

Włókno węglowe

Włókno węglowe cechuje się znacznie wyższą wytrzymałością przy niższej wadze⁵ i wytrzymałością na bardzo wysokie temperatury⁶. Sporą wadą tego materiału jest cena- jest on najdroższy z używanych przez nas włókien. Dodatkowo cechuje go bardzo dobre przewodnictwo prądu.



Aluminiowy honeycomb dotknięty korozją galwaniczną

⁵ Wytrzymałość zależy również od metody laminowania i użytych splotach, o czym więcej w kolejnych rozdziałach. (3.Rodzaje tkanin i splotów oraz 9.Techniki laminacji).

⁶ Sięgające nawet ponad 2000 °C dla laminatów przeznaczonych do zastosowań wysokotemperaturowych

Węgiel jest również problematycznym materiałem do używania z aluminium, ze względu na korozję galwaniczną- mimo, że oba materiały osobno raczej nie korodują, różnica potencjałów (węgiel: 0.207 V; aluminium -2,33 Vⁱ) sprawia, że zastosowane w jednym kompozycie ulegną elektrokorozji. Korozji galwanicznej można zapobiec oddzielając te materiały w laminacie. Często stosowanym rozwiązaniem są przekładki z włókna aramidowego lub szklanego lub równomiernie nałożona warstwa kleju.

Kolejną wadą włókna węglowego jest fakt iż jest najbardziej szkodliwy do wdychania przy obróbce (cięcie bądź szlifowanie gotowego laminatu). Dobrym nawykiem jest noszenie **dobrej** maski⁷ przy obróbce czegokolwiek, przede wszystkim kompozytów.



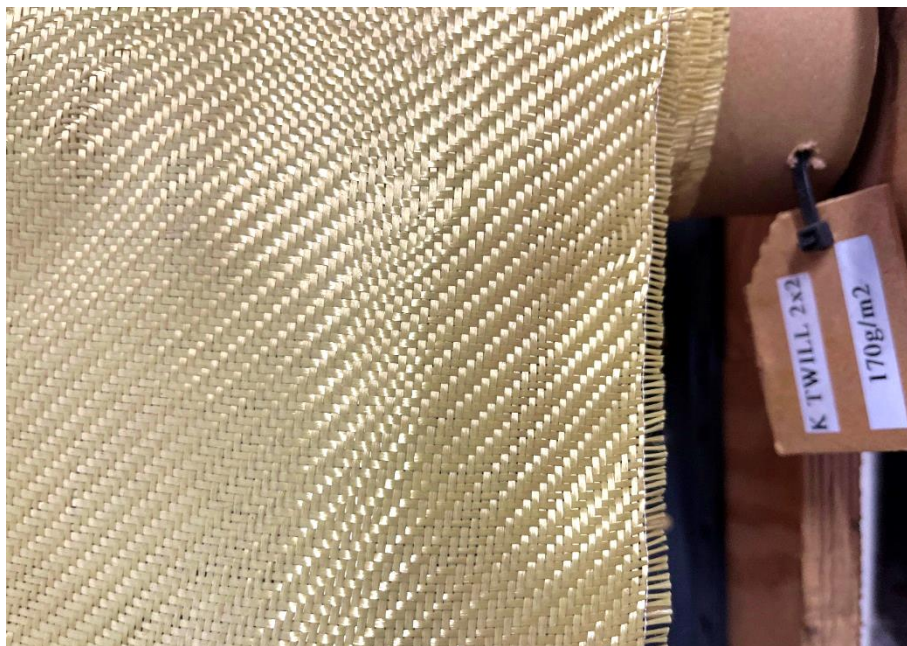
Włókno węglowe biaxalne- suchy materiał

Laminaty węglowe mają również niską rozszerzalność cieplną, co często jest zaletą, jednak czasem może przysporzyć problemów jeśli nie weźmie się tej właściwości pod uwagę. Przykładowo przy wykonywaniu laminatu metodą pre-preg, która wymaga wygrzewania laminatu w wysokich temperaturach, problematyczna może się okazać różnica między rozszerzalnością cieplną laminatu i formy. Problem ten łatwo rozwiązać dobrze dobierając odpowiedni materiał formy (tak aby różnica w rozszerzalnościach cieplnych była mała), jednak należy mieć to na uwadze, szczególnie przy większych formach.

⁷ Dobra maska- filtr P3 lub FFP3, bardzo istotne jest, żeby maseczka nigdzie nie odstawała, dlatego zalecamy maski wielorazowe- zazwyczaj zapewniają one lepsze uszczelnienie i wygodę

Włókno aramidowe (Kevlar™)

Włókno aramidowe, znane głównie pod nazwą Kevlar™ cechuje się bardzo dużą wytrzymałością uderową- używane między innymi w produkcji kamizelek kuloodpornych, ze względu na tą właściwość. Jest również odporne na wysokie temperatury (180-245°C) i ogień oraz jest dobrym izolatorem. Z tego powodu w naszym samochodzie PERŁA jest stosowane w elementach, które mogą potencjalnie być narażone na wysokie temperatury i/ lub uderzenia czy drgania - przykładowo ścianka dzieląca kierowcę od baterii, gdzie dodatkowym atutem są również izolacyjne właściwości aramidu.



Włókno aramidowe Twill

Należy mieć na uwadze iż z włóknem aramidowym pracuje się ciężiej niż z innymi włóknami - trudna tkanina do cięcia⁸ „na sucho” i późniejszej obróbki zalaminowanej już części.

Kolejną wadą tego materiału jest wrażliwość na wilgoć^[iii]; jeśli nie mamy pewności, że włókna były trzymane w suchym otoczeniu, należy pozbyć się wilgoci przed laminacją, wygrzewając włókna przez kilka godzin. Jeśli tego nie zrobimy narażamy się na ryzyko delaminacji.

Tkaniny hybrydowe

Tkaniny hybrydowe składają się z więcej niż jednego rodzaju włókien, przykładowo tkanina węglowo-aramidowa czy szklano-węglowa. Często stosowane w przypadku łączenia różnych materiałów w laminacie, w celu zmniejszenia naprężeń tnących między dwoma różnymi materiałami. Dodatkowo pomaga to zmniejszyć potencjalne naprężenia powstałe przy nagrzewaniu się laminatu, związane z różnicą rozszerzalności cieplnych.

⁸ Do cięcia włókien aramidowych używamy specjalnych nożyczek, co ułatwia pracę z tym materiałem

Rozwiązanie takie zastosowano w drzwiach samochodu PERŁA; między warstwą tkaniny aramidowej i węglowej położono tkaninę hybrydową aramid- węgiel.



Włókno aramidowo-węglowe Twill

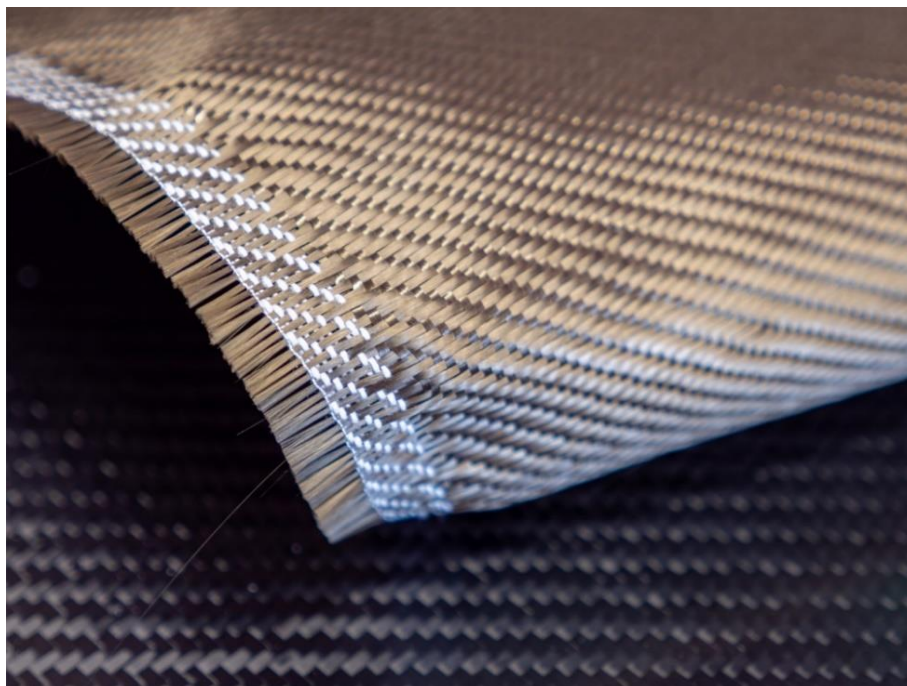
Włókna ekologiczne

Dużą wadą materiałów kompozytowych jest ich negatywny wpływ na środowisko. Proces ich produkcji wymaga użycia dużych ilości energii, co przekłada się na większą emisję CO₂. Dodatkowym problemem jest złożoność procesu ich recyklingu. Mimo, iż jest on możliwy, to znacząca większość włókien ląduje na wysypiskach śmieci i zostaje tam na długie lata. Jednak branża materiałów kompozytowych stale się rozwija i otwiera nowe możliwości recyklingu materiałów kompozytowych i bardziej ekologicznych procesów produkcji.

Jedną z metod zmniejszenia śladu węglowego kompozytu jest użycie biokompozytów. Są to materiały, których wytworzenie wymaga mniej energii oraz są bardziej biodegradowalne, jednak zazwyczaj mają też gorsze parametry wytrzymałościowe niż standardowe włókna. W związku z tym z pewnością nie są potencjalnym zamiennikiem włókna węglowego czy aramidowego we wszystkich zastosowaniach, jednak mogą być używane w elementach przenoszących mniejsze obciążenia.

Włókno bazaltowe

Włókno uznawane za ekologiczne z racji na proces wytwarzania, który wymaga stosunkowo mało energii, oraz łatwość recyklingu tych włókienⁱⁱⁱ. Jego właściwości są podobne do włókna szklanego; nie przewodzi prądu, nie koroduje w kontakcie z metalami, jest nawet nieco bardziej odporne na rozciąganie oraz ma niższy współczynnik rozszerzalności cieplnej niż szkło^{iv}.



Włókno bazaltowe Twill

Włókno lniane

Podobnie jak bazalt jest uznawany za ekologiczne, ze względu na proces wytwarzania i biodegradowalność.

Polecamy materiał na Youtube od EasyComposites na temat włókna lnianego:

<https://youtu.be/AD98L9XICTU?feature=shared>

Inne ekologiczne rodzaje włókien; jako ciekawostkę, ponieważ nie mieliśmy niestety jeszcze okazji pracować na poniższych materiałach^v:

- Ketmia konopiovata (Kenaf)
- Włókna z Juty
- Włókna konopne
- Sizal (włókna z agawy sizalowej)
- Włókna Abaca (odmiana soi)
- Włókna bananowe
- Włókna ananasowe
- Włókna kokosowe

3. Rodzaje tkanin i splotów

Oprócz materiałów i metod laminacji, na właściwości finalnego produktu wpływa rodzaj splotu i gramatura.

Rowing- jest to pojedyncza nitka składająca się z paru tysięcy włókien. Nie wykorzystuje się ich zwykle w infuzji, jednak w Eko-Energii używaliśmy ich jako grzałek do form. (Obecnie używamy rękawów, mniej się rozchodzą). W przemyśle robi się z nich kompozyty metodą nawijania na rdzeń (filament winding). Ponadto rowingi są budulcem wszystkich splotów. Liczba rowing 3K oznacza 3 tysiące włókien węglowych w jednym sznurze.



Rowing węglowy 6k

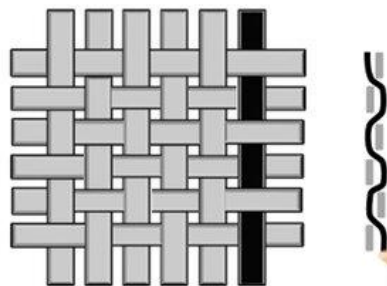
Rodzaje splotów

1.Plain (splot płócienny)- włókna są w nim układane naprzemiennie nad i pod sobą (prostopadle do siebie). Jest on często stosowany do laminowania płyt, płaskich powierzchni, ze względu na trudności w dostosowaniu do zakrzywionych i skomplikowanych geometrii.

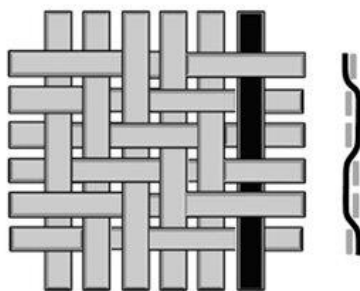


Włókno szklane Plain

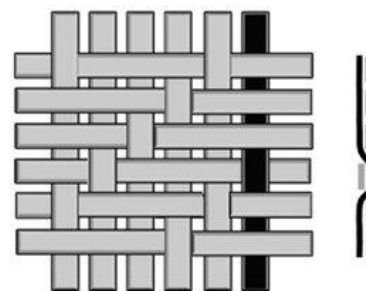
2.Twill (splot skośny)-Włókna również przecinają się pod kątem prostym, jednak nie na przemian. W twillu włókna przeplatają się w różnych konfiguracjach. Przykładowo jedno włókno przechodzi nad trzema włóknami i pod jednym (twill 3x1) lub nad dwoma i pod dwoma włóknami (twill 2x2)^[9].



(a) Plain weave



(b) 2x2 twill weave



(c) 3x1 twill weave

Przedstawienie graficzne różnic między splotami; źródło: "Thermoplastic Composites: Principles and Applications" - ResearchGate

⁹ Obrazek poniżej pomoże lepiej zilustrować co mamy na myśli

Dzięki temu jest bardziej giętki niż plain, tkanina lepiej się układa, co sprawia, że jest to najczęściej używany przez nas splot. Wygląda również estetyczniej niż plain. Minusem jest zwiększone ryzyko powstania pin hole¹⁰ w czasie laminowania, ponieważ takie włókna łatwiej się rozchodzą.



Włókno szklane Twill

3.Biaxialny - są to włókna zszyte w dwóch kierunkach pod kątem 45° do kierunku szpuli i 90° do siebie. Układanie tak zszytych włókien zwiększa przede wszystkim wytrzymałość kompozytów na skręcanie. Efekt jest ten sam co przy położeniu 2 warstw uni pod kątem prostym do siebie. Z tą różnicą, że dużo efektywniej zużywamy rolkę materiału.



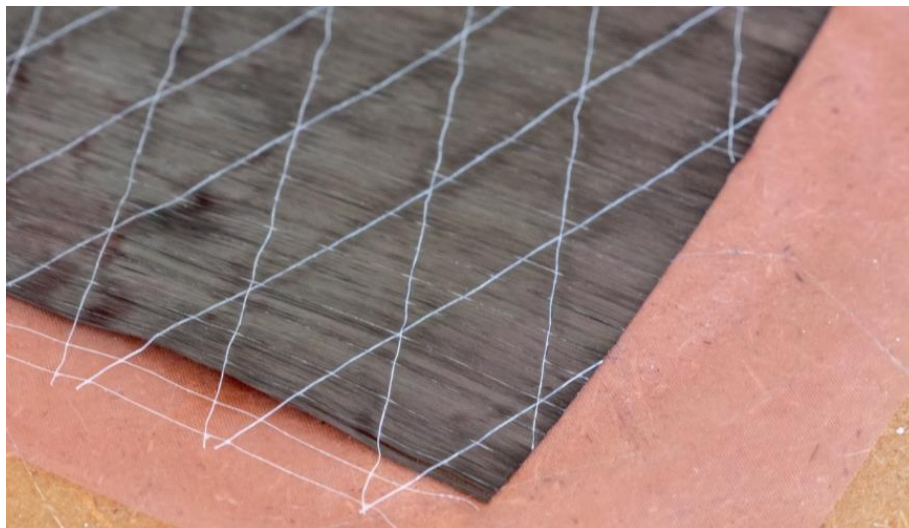
Włókno węglowe biaxalne

4.Uni (jednokierunkowy)- maksymalne możliwe przenoszenie naprężeń, ale tylko w jedną stronę, ponieważ w tym splocie wszystkie pojedyncze włókna są do siebie równoległe.

¹⁰ Pin hole- małe dziurki w kompozycie; raczej nie wpływają na aspekt mechaniczny kompozytu, jednak psują aspekt wizualny.

Zazwyczaj są układane w środku kompozytu (między inne tkaniny) w celu poprawy właściwości mechanicznych laminatu w kierunku zgodnym z kierunkiem włókien. Nie używa się go jako warstwy zewnętrznej, ponieważ z powodu jednokierunkowości włókna nie trzymają się siebie przez co często się przesuwają i rozlaminowują.

5.Flat tow- Włókna w nim są rozłożone „na płasko”, poza tym spleciony jest jak plain. Zapewnia charakterystyczny wygląd- wzór przypomina szachownice. Często używany na elementach, których walor estetyczny jest istotny.



Włókno węglowe jednokierunkowe zszyte siatką poliestrową

6.Mata- Włókna w niej nie są ułożone kierunkowo i nie są ciągłe przez całą długość materiału (włókna mają około 5cm i są losowo ułożone), przez co są najsłabszym splotem. Zaletą maty szklanej jest jej łatwość w przesączaniu się żywicy i stosunkowo proste usuwanie spod niej bąbelków powietrza. Dlatego u nas najczęściej jest ona używana do form, które są laminowane ręcznie (co wprowadza duże ryzyko powstawania bąbli powietrza między warstwami włókien). Maty używamy również do laminowania paneli fotowoltaicznych.

Maty szklane są klejone różnymi lepiszczami, wybór zależy od używanej osnowy. Maty emulsyjne są przeznaczone do żywic poliestrowych, proszkowe do epoksydowych. Żywica

rozpuszcza lepiszcze przy kontakcie z matą, umożliwiając dopasowanie szkła do powierzchni formy, dlatego osnowa musi być zgodna chemicznie z lepiszczem.



Mata szklana proszkowa

Gramatura włókien

Zazwyczaj stosujemy tkaniny o gramaturze około 200 g/m² – to najpopularniejsza gramatura dostępna na rynku, zapewniająca dobry kompromis między sztywnością, lekkością elementu a łatwością wykonania. Odpowiedni dobór gramatury jest bardzo ważny zarówno pod kątem łatwości procesu laminowania jak i właściwości laminowanego elementu. Zbyt lekkie tkaniny mogą wymagać wielu warstw, aby osiągnąć wymaganą wytrzymałość mechaniczną, natomiast zbyt ciężkie komplikują proces infuzji – żywica ma trudności z równomiernym przesiąkaniem przez strukturę materiału, co zwiększa ryzyko powstawania pułapek powietrza i defektów.

Wraz ze wzrostem gramatury rośnie również ilość żywicy potrzebnej do nasycenia materiału na każdy metr kwadratowy oraz trudność przesiąknięcia tkaniny. Dlatego w przypadku stosowania tkanin o wyższej gramaturze (np. ≥ 400 g/m²) zaleca się ich „obudowanie” warstwami o niższej gramaturze. Warstwy z drobniejszych włókien ułatwiają rozprowadzenie żywicy, wspomagają odpowietrzanie i minimalizują ryzyko powstawania defektów.

4. Materiały rdzeniowe (przekładki)

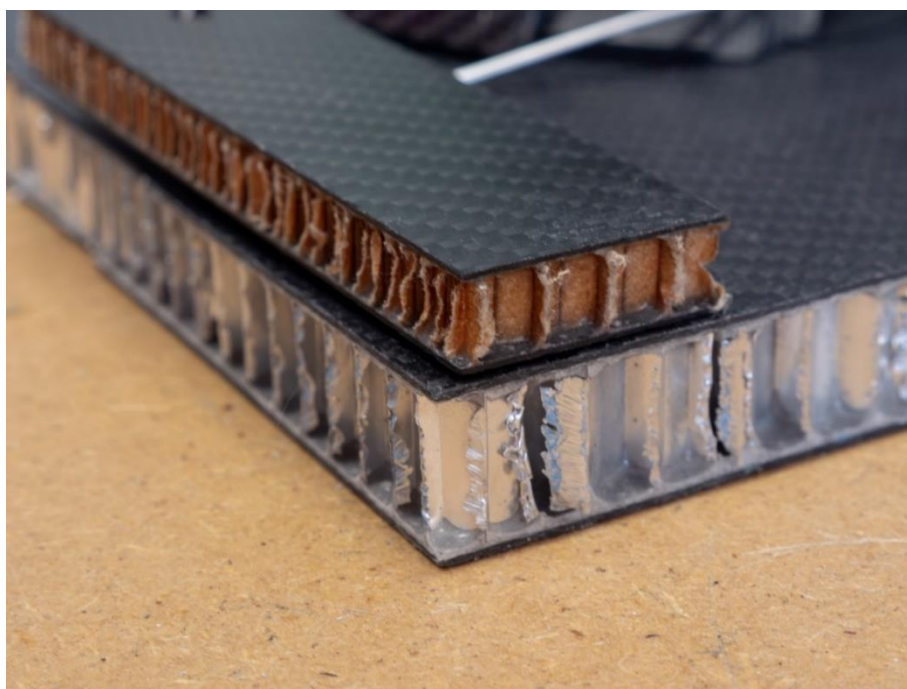
Stosowane są w laminatach kompozytowych żeby usztywnić konstrukcje. W elementach kompozytowych samochodu PERŁA oraz turbiny HALYNA używamy/liśmy:

Honeycomb

Materiał o strukturze plastra miodu, najczęściej wykonany z aluminium lub aramidu.

Stosowanie rdzeni tego typu pozwala na zachowanie bardzo małej wagi części w stosunku do jej wytrzymałości. Płyty węglowe z przekładką wykonujemy obklejając honeycomb z obu stron zalaminowanymi płytami węglowymi.

Honeycomb aluminiowy pozwala nam otrzymać sztywniejszą i bardziej wytrzymałą płytę, jednak aramid jest lżejszy, łatwiejszy w obróbce i nie niesie ze sobą ryzyka elektrokorozji.

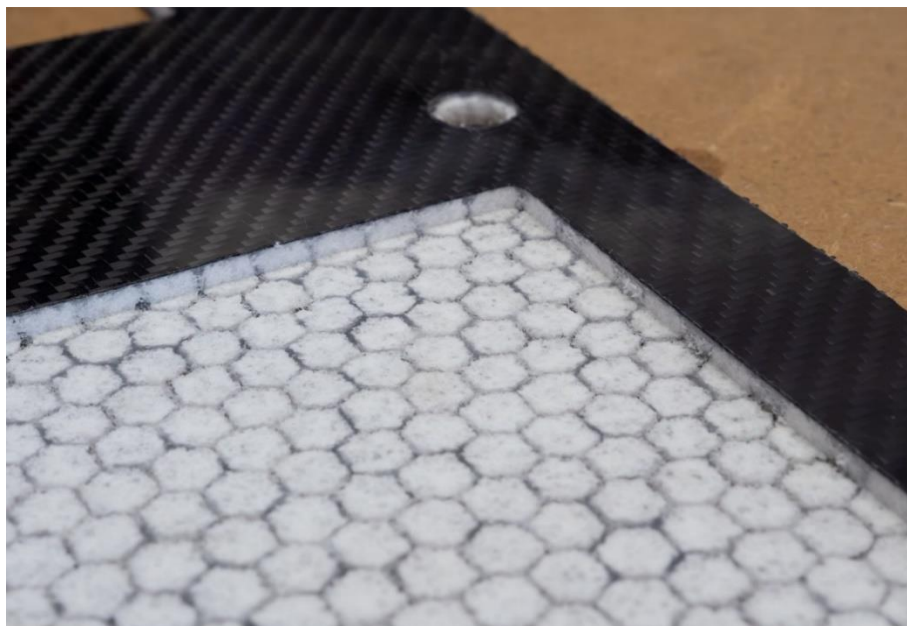


Honeycomb aramidowy i aluminiowy

Soric

Poliestrowy materiał rdzeniowy o podobnej budowie do honeycomb'u z tym wyjątkiem że soric nie jest pusty w środku. W procesie infuzji żywica płynie między heksagonami; soric jest świetnym flow medium (żywica bardzo łatwo przez niego płynie), więc w laminatach z Soriciem nie używamy siatki infuzyjnej. Powstały laminat jest lekki, ponieważ Soric nie chłonie dużo żywicy (heksagony zostają w środku „suche”), jednak cięższy od honeycomba.

W projekcie PERŁA Soric został wykorzystany do konstrukcji elementów baterii, ze względu na swoje właściwości izolacyjne.



Kompozyt z Soriciem (wyfrezowany)- pokrywka na otwór serwisowy drzwi

Pianka pieniona PVC

Pianka z PVC zapewnia jako materiał rdzeniowy minimalne wchłanianie żywicy, dzięki czemu kompozyt jest lekki. Na rynku jest dużo opcji różniących się między innymi gęstością, wytrzymałością na temperaturę czy naprężenia oraz wypornością. Jest mniej odporna na ściskanie w kierunku prostopadłym do okładzin niż wersje z honeycombem.

5.Żywice

Do wytwarzania laminatów kompozytowych używa się głównie żywic poliestrowych, winyloestrowych oraz epoksydowych. W naszym projekcie używamy żywic epoksydowych do wykonywania elementów kompozytowych naszego samochodu. Głównie używamy ich ze względu na mniejszą toksyczność od innych żywic; również właściwości wytrzymałości mechanicznej i odporności na wysokie temperatury żywic epoksydowych są lepsze od poliestrowych. Co prawda epoksydy wypadają gorzej od żywic winyloestrowych, ale bezpieczeństwo osób laminujących jest dla nas priorytetem.

Żywicy poliestrowej używamy tylko jako top coatu na laminatach. Ma on za zadanie chronić powierzchnie zewnętrzną kompozytu przed promieniami UV i drobnymi uszkodzeniami oraz zapewnić estetyczniejsze wykończenie. Ze względu na toksyczność żywicy podczas tego procesu dbamy o to, aby każda osoba narażona na kontakt z żywicą miała na sobie maskę oraz rękawiczki.

Istnieją różne rodzaje żywic epoksydowych. Podstawowe parametry, które są dla nas ważne przy wyborze żywicy to:

- Czas pracy żywicy mówi nam o tym ile maksymalnie może trwać proces laminowania od momentu pomieszania żywicy. Jest on podawany dla temperatury 25 stopni i zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury. Mniej więcej na każde 10 stopni ten czas skraca się o połowę przy czym poniżej 18-20 stopni żywica może nie zsieciwąć, lub zsieciwąć źle.
- Lepkość- mniej lepkie żywice bardziej nadają się do infuzji, ponieważ żywica łatwiej płynie wtedy przez włókno. Gęste są dobrym wyborem do wykonywania form metodą wet lay.
- Odporność na UV- Większość kompozytów żółknie pod wpływem promieniowania UV. Włókna są na nie odporne (oprócz aramid), ale żywice już nie. Żywice poliestrowe są bardziej odporne na UV niż epoksydowe. W celu ochrony kompozytów można je oklejać, albo lakierować.

Uwaga!

Reakcja żywicy z utwardzaczem jest egzotermiczna. Należy o tym pamiętać kiedy przygotowujemy duże ilości żywicy lub używamy szybko sieciujących żywic. Im szybciej zachodzi reakcja tym więcej ciepła wydzieli się w krótkim czasie. Mając duże ilości żywicy warto rozlać je do mniejszych naczyń, co pozwoli na efektywniejsze oddawanie ciepła do otoczenia i zmniejszy ryzyko osiągnięcia niebezpiecznych temperatur¹¹.

Dodatki do żywic

- Mikrobalon
Są to miniaturowe szklane kulki pustą w środku, które dodajemy do żywicy. Pomaga zwiększyć lepkość żywicy, co bardzo się przydaje kiedy laminujemy pionowe powierzchnie bez użycia worka próżniowego. Dzięki mikrobalonowi żywica nie spłynie z ostro nachylonej ścianki elementu. Zwiększa on również objętość, przy niewielkim zwiększaniu masy, dzięki czemu mieszanina ma mniejszą gęstość. Dodatkowo mikrobalon zmniejsza egzotermiczność reakcji, zmniejszając tym ryzyko nagrzania się żywicy do niebezpiecznej temperatury.
- Płatki bawełniane
Również pomagają zwiększyć lepkość żywicy i zmniejszają egzotermie, jednak w przeciwieństwie do mikrobalonu nie zmniejszają jej gęstości, ponieważ nie wypełniają żywicy tylko ją chłoną.

¹¹ Żywica może roztopić plastikowe naczynie w którym się znajduje i potencjalnie wywołać poparzenia lub spowodować pożar jeśli w okolicy znajdują się materiały łatwopalne.

- Aerosil

Właściwie krzemionka koloidalna (Aerosil to nazwa produktu); jest zagęszczającym wypełniaczem. Pomaga kontrolować lepkość żywicy epoksydowej i podobnie jak inne wypełniacze do żywic, zapobiega spływaniu żywicy z płaszczyzn pionowych. Również zmniejsza egzotermie.

6. Techniki laminacji

Większość technik laminacji polega na doprowadzeniu żywicy do włókien ułożonych na formie nadającej kształt części. Poniżej wymieniono najczęściej używane techniki:

Wet lay

Inaczej laminowanie ręczne- polega ona na rozprowadzeniu żywicy do włókna rozłożonego na formie przy pomocy pędzli lub wałków. Jest to najprostsza i najtańsza z metod, ponieważ nie wymaga specjalistycznego sprzętu.

Tą metodą stosunek żywicy do włókna jaki się otrzymuje jest największy co wynika z braku docisku włókna do formy oraz odprowadzania nadmiaru żywicy. Właściwości wytrzymałościowe takich laminatów są znacznie gorsze od laminatów wykonanych infuzją i pre-pregami. Jest najczęściej używana, gdy nie zależy nam na wadze i właściwościach wytrzymałościowych elementu- do elementów dekoracyjnych lub form.

Alternatywnie w metodzie wet lay można zastosować worek próżniowy, co nieco komplikuje proces (krok po kroku został opisany w nagłówku **Wet lay**), ale i poprawia jakość laminatu. W porównaniu z wet-layem bez użycia worka próżniowego uzyskujemy geometrie



Laminacja formy podwozia metodą wet lay

o lepszej tolerancji, mniejszy stosunek żywicy do włókna oraz zmniejszoną ilość bąbelków powietrza w laminacie.

Pre-preg

@AGH Racing

Forged Carbon fiber

Służy głównie do tworzenia części, które mają swoją objętość (bryły, a nie cienkościenne detale jak to w przypadku tradycyjnych laminatów). Powstały materiał charakteryzuje się wysoką wytrzymałością i lekkością^{vi}, a jednocześnie ma charakterystyczny wygląd „skruszonego” carbonu.



Laminowanie końcówki wahacza metodą Forge

Poniżej ciekawe materiały od EasyComposites na temat Forged Carbon Fiber:

https://youtu.be/25PmqM24HEk?si=bdK-vVQB5pC_t4p https://youtu.be/nhqAhYOdGnc?si=6MOWz_MNgp6khhpH

Infuzja próżniowa

Metoda ta polega na przepuszczaniu żywicy przez ułożone w formie włókna.

Włókna znajdują się pod workiem próżniowym, który jest przyklejony butylem do powierzchni laminowania, dookoła ułożonych włókien. Z jednej strony worka próżniowego podłączamy pompę próżniową, a z drugiej dopływ żywicy. Podciśnienie pod workiem umożliwia przesączenie żywicy przez włókno. W przypadku kiedy chcemy przyspieszyć ten proces używamy siatki infuzyjnej.

Dzięki temu że utwardzenie żywicy odbywa się pod naciskiem worka otrzymujemy zadowalającą jakość powierzchni, tolerancje geometrii oraz brak powietrza w finalnej części. Dodatkowo infuzja jest relatywnie tania w porównaniu do innych bardziej zaawansowanych metod (Pre-preg), dlatego jest często wykorzystywana do konstrukcji o dużych gabarytach jak łodzie, motorówki, elementy karoserii jak i całe nadwozie samochodu. Znaczna większość elementów kompozytowych samochodu PERŁA tak właśnie jest i będzie zalaminowanych.

Polecamy obejrzeć poniższy materiał na temat infuzji próżniowej:

[Easy Composites Ltd Beginner's Guide to Carbon Fibre Resin Infusion](#)

7. Sprzęt do laminacji

Używana w infuzji próżniowej, wet layu i laminowaniu Pre-pregów. Służy do tworzenia podciśnienia dzięki któremu żywica płynie przez laminowane materiały. Dzięki próżni włókna są do siebie dociskane, dzięki czemu nie ma miejsca na nadmiar żywicy. W przypadku nieszczelności w worku próżniowym do laminatu dostaje się powietrze, co skutkuje powstawaniem delaminacji i osłabia laminat.

- Pułapka (trap)

Znajduje się między pompą, a laminatem w trakcie laminowania przy użyciu worka próżniowego. Jego zadaniem jest uniemożliwienie żywicy dostania się do pompy. Zazwyczaj



Infuzja podwozia

przy laminacji żywica nawet do niego nie dochodzi, ale warto być przygotowanym na taką możliwość. Wykonanie trapa z pewnością jest tańsze

niż zakup nowej pompy.



Pułapka i pompa próżniowa

- Rurki (do żywicy i trapa)

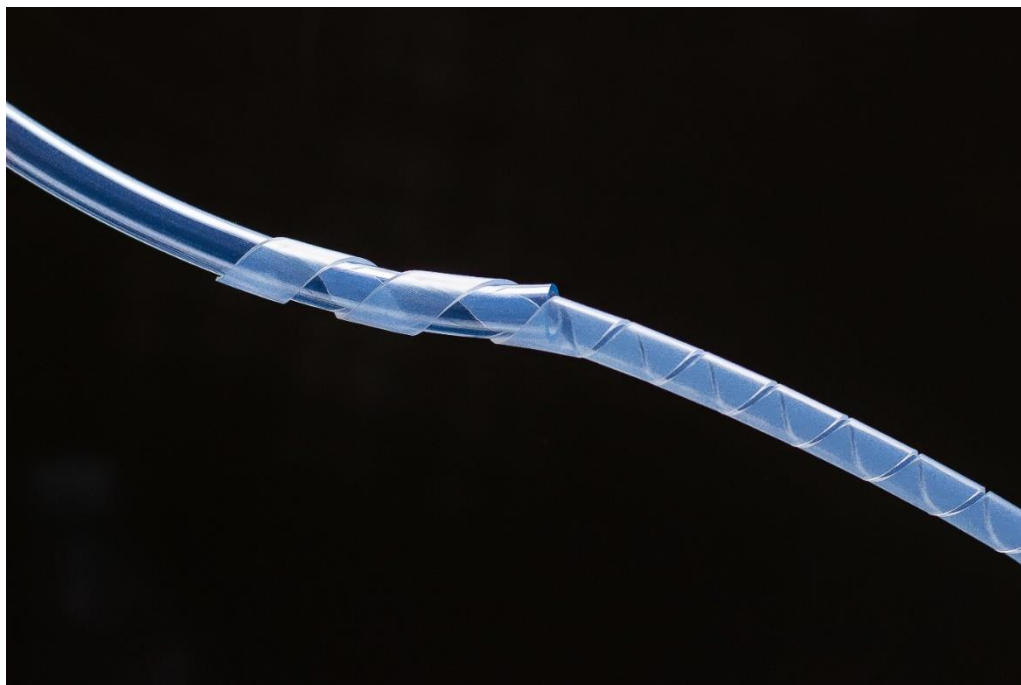
Przy wyborze rurek do infuzji próżniowej należy wziąć pod uwagę takie parametry jak grubość, średnica oraz materiał. Przy wybraniu złych rurek można napotkać takie problemy jak zbyt wolne przesączanie się włókien (mniejsza średnica to i mniejsza przepustowość rurki) czy osłabienie podciśnienia (spowodowane „zapadaniem się” rurek). Dodatkowo przy cieńszych rurkach ryzyko uszkodzenia rurki przy bardzo mocnym dokręceniu ścisku jest większe.

W Eko-Energii obecnie używamy rurek igielitowych o średnicy 8mm i grubości ścianki 1,5mm. Spełniają swoją rolę, jednak rurki o grubości ścianki 2mm byłyby lepsze. Mniejszych niż 1,5mm z pewnością nie zalecamy, ze względu na wyżej opisane problemy.

- Rurki spiralne

Pomagają one równomiernie rozprowadzać żywice. W infuzji chcemy żeby

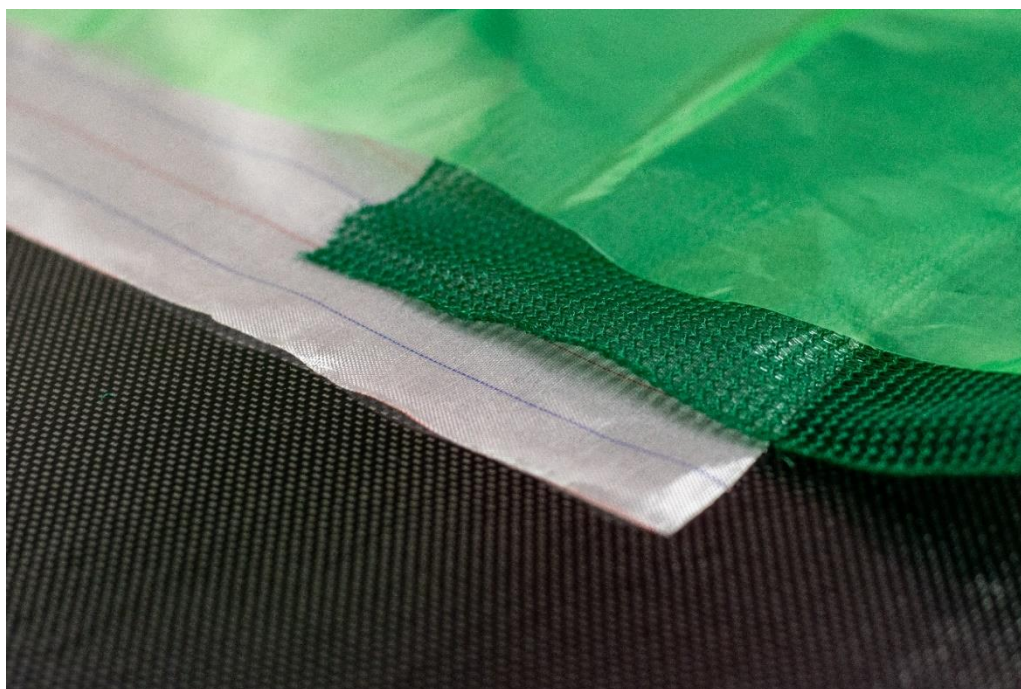
włókna laminowały się z taką samą prędkością. Dzięki temu używamy nie więcej żywicy niż to konieczne (jeśli po jednej stronie będzie płynąć szybciej, to nadmiar żywicy będzie płynąć do trapa) oraz skracamy czas laminacji i zmniejszamy ryzyko, że żywica zacznie sieciować zanim kompozyt będzie w pełni zalaminowany.



Rurka spiralna na rurce do infuzji

- Worek do infuzji

Worek który umożliwia utworzenie podciśnienia. Kluczowym jest aby nie miał dziurek, był czysty i aby był dobrze przyklejony na butylu.



Materiały do infuzji- delaminaż, siatka infuzyjna, worek (kolejno od dołu)

- Butyl

Na nim przyklejamy wór do powierzchni po której będziemy laminować. Aby dobrze się kleił należy go nie dotykać- z rolki przyklejamy go od razu na powierzchnię i papierek zabezpieczający odklejamy dopiero przed samym naklejeniem wora.

- Kocyk

Jak sama nazwa mówi, przypomina kocyk. Służy do pozbycia się nadmiaru żywicy. Używany przy wet layu i przy pre-pregach. U nas dodatkowo służy za izolację cieplną w formach z grzałkami oraz za osłonę formy, która miejscami bywa ostra. (Ze względu na to iż jest wykonana z włókna szklanego laminowanego wet-layem).



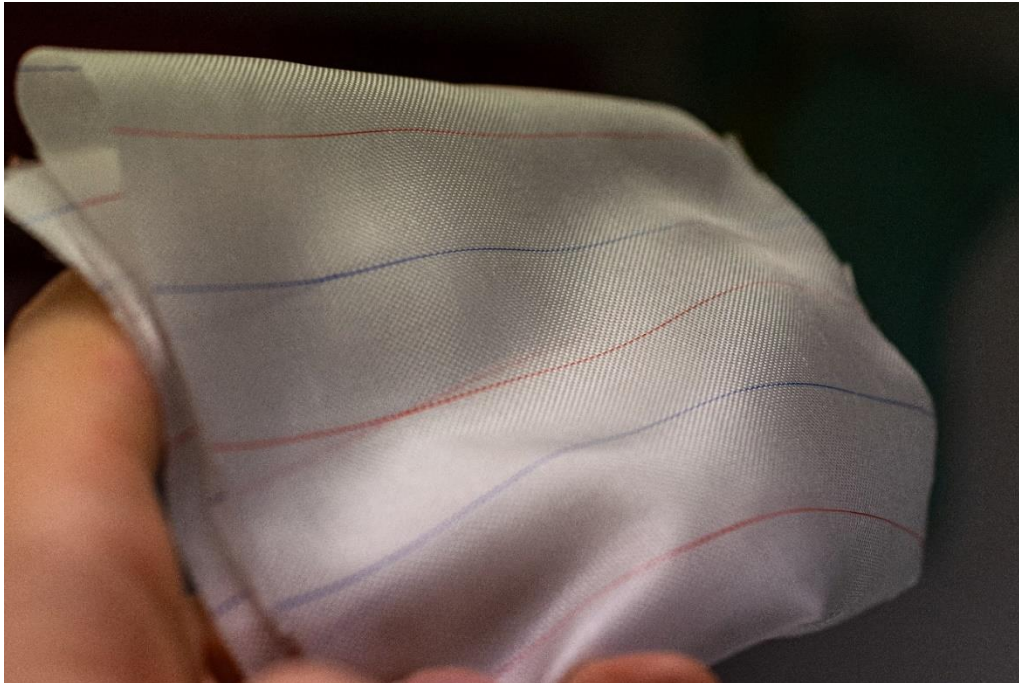
Kocyk

- Izopropanol(IPA) i Aceton

Rozpuszczalniki najczęściej przez nas używane. Izopropanol nadaje się do większości zastosowań- głównie do odtłuszczania i czyszczenia powierzchni. Acetonu używamy kiedy IPA nie wystarcza. Oba te rozpuszczalniki są stosunkowo bezpieczne, jednak warto ich używać w rękawiczkach. Istnieje ryzyko wystąpienia reakcji alergicznej. Należy również uważać na jakich elementach używamy acetonu- żeby przypadkiem nie zepsuć sobie powierzchni czyszczonej rzeczy. Mycie laminatów acetonem może go odbarwić. W przypadku użycia acetonu do mycia laminatu należy go przemyć wodą- w takim wypadku raczej nic mu się nie stanie, jednak IPA nadaje się lepiej do tego zastosowania.

- Delaminaż

Tkanina pomocnicza, umieszczana w podczas laminacji na części żeby uzyskać porowatą matową powierzchnie (zależną od gramatury delaminażu). Jeśli laminat wykonamy bez niego, na wytworzonym laminacie zostaną ślady od worka- w miejscu gdzie były jego zagięcia.



Delaminaż

- Siatka infuzyjna

Służy do równomiernego i szybszego rozprowadzania żywicy po powierzchni kompozytu. Używa się jej najczęściej z materiałami przez które ciężko przesączyć żywice.

- Kleje

Kleje do infuzji:

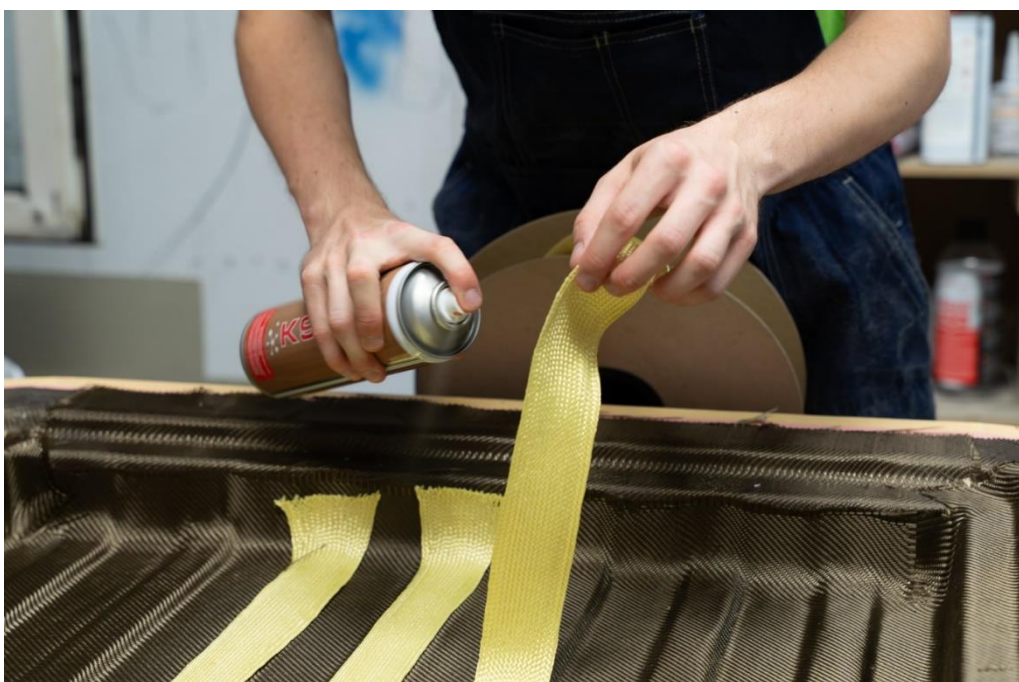
- **klej transparentny** (K979¹²)- używamy go przy kładzeniu na formę pierwszej warstwy tkaniny, dzięki czemu uzyskujemy estetyczniejszą powierzchnie. Nie używamy go na każdej warstwie, bo nie ma takiej potrzeby, a dobrze się układa tkaniny wiedząc gdzie dokładnie klej został nasprayowany.
- **klej do tkanin** (K919)- najczęściej używany, ma niebieski odcień.
- **klej do siatki infuzyjnej** (K999)- jest on mocniejszy niż K919 i K979, dodatkowo ma charakterystyczny natrysk w formie pajęczyny.

Kleje pozostałe

- klej do drewna**- do klejenia desek MDF
- klej cyroakrylowy** (kropelka)- do klejenia do siebie druków 3D.
- klej metaakrylowy**

¹² K979- producent Spraykon.

- INNE DOPISAC



Klej K919 używany przy laminowaniu pokrywki do baterii

8.Layout

Layout, czyli sposób ułożenia włókien w elemencie kompozytowym, jest niezwykle istotnym aspektem projektowania. Już na początkowym etapie należy zastanowić się nad funkcją projektowanej części. Jeśli nie przenosi ona dużych obciążeń – na przykład owiewki lub elementy dekoracyjne – layout może ograniczyć się do kilku warstw twilla. Przykładem takiego rozwiązania jest zewnętrzna warstwa drzwi PERŁY, która pełni funkcję estetyczną. Jest to zwykła płyta z pięciu warstw włókna węglowego w splocie twill, lekko gięta na innym elemencie.

W przypadku elementów nośnych layout jest znacznie bardziej złożony. Należy rozpocząć od analizy sposobu przenoszenia sił przez daną część. Ścieżki naprężeń pomagają wyznaczyć główne kierunki wzmocnień, jednak często korzystne okazuje się również dodanie warstw diagonalnych. Nie istnieje jedna uniwersalna metoda – warto testować różne układy i uczyć się empirycznie. Pomocne mogą być również kanały YouTube, takie jak DarkAero czy EasyComposites, gdzie znajdziemy wiele materiałów dotyczących projektowania i wytwarzania kompozytów.

Mimo, iż istnieje możliwość użycia dużej ilości warstw jednego rodzaju włókna, by uzyskać bardziej wytrzymały element; znacznie rozsądniejsze jest zaplanowanie layoutu w taki sposób, aby każda warstwa miała określoną funkcję lub pełniła rolę miejscowego wzmocnienia. Dzięki temu końcowy element będzie cieńszy, lżejszy i często bardziej wytrzymały – w pełni wykorzystamy więc zalety kompozytów. Jeśli kluczowym parametrem jest dla nas sztywność, zamiast dokładania kolejnych warstw, można rozważyć

przeprojektowanie geometrii części. Dodanie przetłoczeń, mimo że utrudni laminację, pozwoli uzyskać komponent lżejszy i sztywniejszy.

Należy jednak pamiętać, że sztywność nie zawsze jest zaletą. W przypadku dynamicznych naprężeń ważniejsza jest uderzalność. Zastosowanie 2–3 warstw aramidu umożliwi lepsze rozpraszanie energii, dzięki czemu włókno węglowe nie będzie musiało jej pochłaniać „na sztywno”.



Układanie włókien węgiel-aramid – laminacja podwozia

Łączenie różnych materiałów w laminatach może być bardzo korzystne, trzeba jednak uwzględnić ich właściwości. Przykładowo, współczynnik rozszerzalności cieplnej włókna szklanego jest 4–5 razy większy niż włókna węglowego^[viii]. Dlatego nie zaleca się stosowania ich bezpośrednio obok siebie. Jeśli jednak ilość włókna szklanego jest bardzo mała (np. cienka warstwa izolacyjna), można to zrobić bez większych konsekwencji. W przypadku większych ilości, gdy szkło pełni funkcję wzmocnienia, nie należy łączyć go bezpośrednio z węglem. Jeśli jest to konieczne, warto dodać warstwę aramidu między szkło a węgiel, by zminimalizować ryzyko delaminacji wynikającej z różnic w rozszerzalności cieplnej.

Włókno węglowe cechuje się bardzo dużą wytrzymałością na rozciąganie. Każde zagięcie – np. w włóknach twill – powoduje naprężenia tnące, które osłabiają włókno. Dlatego warto stosować włókna nieplecione, które są bardziej wytrzymałe kiedy tylko mamy taką możliwość. Nie powinno się jednak umieszczać ich jako warstwy zewnętrznej, nawet jeśli analiza naprężeń sugeruje, że byłaby to dobra opcja. Włókna nieplecione źle się laminują, łatwo się strzępią i mogą ulegać delaminacji przy obciążeniach zmęczeniowych. Problem ten można łatwo rozwiązać, stosując na zewnątrz dodatkową warstwę twilla.

Innym źródłem naprężeń tnących działających na włókno są ostre przejścia geometryczne. Przy projektowaniu elementów kompozytowych należy ich unikać – dążyć do ciągłości, dużych promieni i łagodnych przejść.

Wbrew powszechnej opinii, włókna węglowe nie są słabe na ściskanie. Choć są słabsze w ścisaniu niż w rozciąganiu, nadal charakteryzują się wysoką wytrzymałością – przykładowo włókno uni-directional ma większą wytrzymałość na ściskanie niż tytan klasy 5^{[viii][ix]}. Jeśli projektowany element będzie poddawany ścisaniu, głównym zagrożeniem jest wyboczenie, które możemy ograniczyć, stosując przekroje o wysokim polarnym momencie bezwładności.

Kolejnym istotnym aspektem jest zachowanie tkaniny na formie. Różne sploty układają się inaczej na formie, o czy, już wspomnieliśmy we wcześniejszych rozdziałach- należy wziąć to pod uwagę przy projektowaniu layoutu. Jeśli na danej geometrii bardzo ciężko będzie się układać dany splot narażamy się na delaminacje i punktowe osłabienia kompozytu, związane z bąblami powietrza powstałymi między warstwami.

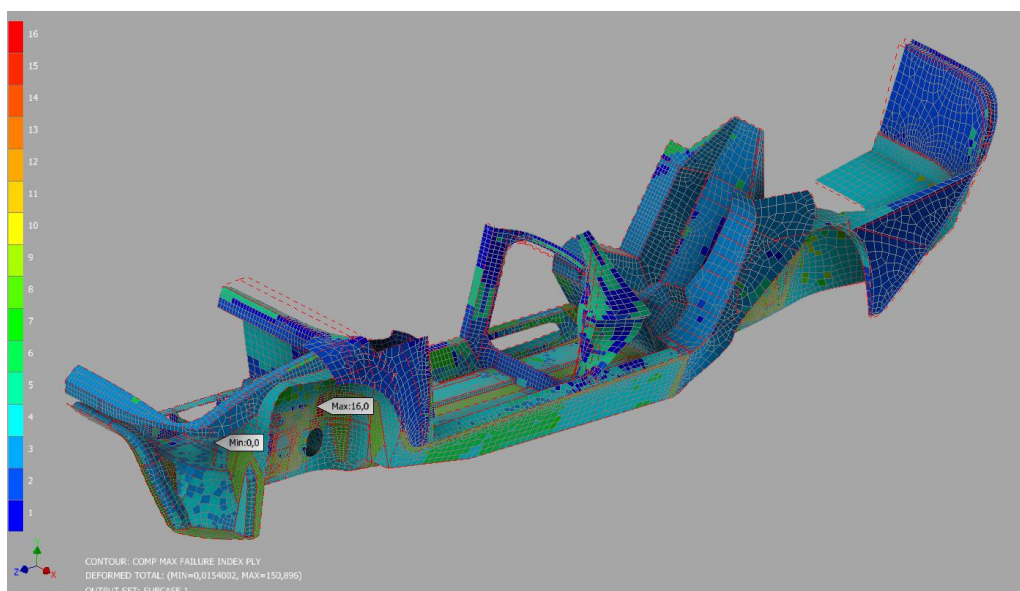
Należy również pamiętać, że każde nacięcie włókna miejscowo osłabia kompozyt – należy je ograniczać, o ile to możliwe. Warto zdobyć doświadczenie w laminowaniu – opisy zachowania materiału są przydatne, ale nie zastąpią praktycznej wiedzy o tym, jak trudno czasem dobrze ułożyć materiał na złożonej geometrii.

Symulacje

Symulacje wytrzymałościowe pomagają zweryfikować czy zaprojektowany layout zapewni nam wymaganą wytrzymałość. Ze względu na czasochłonność procesu definiowania parametrów zawsze zaczynamy od wstępnego projektu layoutu zgodnie z zasadami opisanymi w poprzednim nagłówku; symulacja służy nam do jego zweryfikowania. Na podstawie wyników symulacji dodajemy lub odejmujemy warstwę albo zmieniamy orientację włókna.

Symulacje kompozytów są wymagające ze względu na właściwości anizotropowe włókien- muszą być one symulowane w co najmniej dwuosiowym układzie. Układ trójosiowy wymaga pełnej macierzy sztywności (6x6), co oznacza, że będziemy potrzebować 9 lub więcej niezależnych współczynników (21 przy braku symetrii).

Z naszego doświadczenia wynika, że wyniki symulacji w układzie dwu- i trójosiowym są podobne, jeśli wszystkie parametry zostały poprawnie zdefiniowane. Używamy więc układu dwuosiowego, ponieważ wymaga on maksymalnie 6 współczynników. Dla naszych zastosowań, takich jak symulacja sztywności karoserii w skrajnych warunkach obciążenia elementu (np. przejazd przez progi zwalniające), symulacja 2D jest wystarczająca.



Ważne jest, aby zawsze podchodzić krytycznie do wyników symulacji i oceniać ich wiarygodność w kontekście warunków pracy elementu. Symulacja jest tylko modelem – jej trafność zależy bezpośrednio od jakości przyjętych założeń, dokładności danych materiałowych oraz zrozumienia ograniczeń metody obliczeniowej. Błędy w przypisaniu właściwości anizotropowych, niewłaściwe warunki brzegowe czy niedostateczna siatka mogą prowadzić do wyników niezgodnych z rzeczywistością. Dlatego zawsze warto zestawiać wyniki symulacji z doświadczeniem praktycznym i, jeśli to możliwe, z próbami fizycznymi próbek swoich laminatów.

Layout book

Bardzo przydatną rzeczą w bardziej skomplikowanych laminacjach jest layout book. Opisuje on w jakiej kolejności układamy jakie wykroje na formę; ich kształt, miejsce na formie i rodzaj materiału. Niezbędne są grafiki, pokazujące gdzie konkretnie na formie dany wykrój powinien zostać położony.

Co równie ważne, layout book znacząco usprawnia pracę zespołową. Gdy każdy członek zespołu ma dostęp do tych samych, jasno przedstawionych informacji, łatwiej jest utrzymać spójność działania, uniknąć błędów i sprawnie koordynować kolejne etapy laminowania. W efekcie cały proces przebiega szybciej, czytelniej i z mniejszym ryzykiem pomyłek.

Poniżej przykładowy Layout book- z infuzji podwozia PERŁY.

https://docs.google.com/document/d/1OBNZnYLNl9X9rsjoKqhidDhP3AuSmouj_33Vj0uXM_sM/edit?tab=t.0



Layout book- laminacja podwozia

9. Stanowiska robocze i narzędzia

Stanowisko cięcia włókien

Duży stół i rolki z tkaninami zamontowane na ścianie obok niego znacznie ułatwią wycinanie dużych fragmentów włókna. Dobrze jest mieć na stole matę do cięcia, żeby uniknąć pocięcia stołu używając noża krążkowego oraz ubrudzenia tkanin.

Narzędzia:

- Nożyce, do cięcia włókien i materiałów do laminacji. Powinny kosztować co najmniej 30zł, najtańsze nożyczki nie będą dobrze cięły włókien. Do tkanin aramidowych używamy dedykowanych nożyc o niestandardowej geometrii i większej twardości ostrza. Używane tylko i wyłącznie do cięcia aramid, ponieważ się tępią. Są one znacznie droższe od zwykłych nożyc.
- Nóż krążkowy do tkanin, zdecydowanie wygodniejszy i dokładniejszy od nożyc, używamy go tylko do tkanin.
- Nożyce elektryczne, przyspieszają prace, nie strzępią brzegów oraz są łatwe w obsłudze.
- Przydatne są także kątowniki, metr, biały mazak i linijka.

Stanowisko laminowania:

W skład stanowiska wchodzi:

- Trap (Pułapka) na żywice, przyrząd konieczny do przeprowadzenia infuzji, dokładniej opisany w [sekcji sprzętu do laminacji](#).
- Zaciski do rurek
- Płaskie, gładkie panele (np. zażywicowany MDF lub szyba) przydatne do tworzenia płyt kompozytowych
- Frekota / воск, działają antyadhezyjnie; dzięki nim można po skończonym procesie odseparować formę od wytwarzanej części (frekota jest prostsza w użyciu i zapewnia bardziej estetyczny wygląd gotowego elementu)
- Taśma malarska, której zadaniem jest zapewnienie powierzchni do przyklejenia butylu po aplikacji frekoty. (Butyl nie przyklei się do powierzchni gdzie frekota została zaaplikowana)
- Jednorazowe kubeczki i mieszadła (mogą być to zwykłe drewniane patyczki) do żywicy.
- Butyl- przykleja do płyty lub formy worek oraz zakleja ewentualnie nieszczelności.
- Waga jubilerska do mniejszych ilości żywicy i kuchenna do dużych.
- Pompa próżniowa- służy do wytworzenia podciśnienia potrzebnego do przesączenia żywicy przez włókna.
- Trap- podłączona między pompę, a laminat. Chroni pompę przed żywicą.

10.Przebieg procesów krok po kroku

Infuzja próżniowa

1. Wycięcie materiałów

Jeżeli forma jest duża lepiej jest przygotowanie materiałów dzień wcześniej. Laminacja potrafi trwać 7-8 godzin, licząc od momentu rozpoczęcia nakładania tkanin. Warto rozdzielić sobie zadania na 2 dni.

Tkaniny docina się od szablonów, rozplanowując przed laminacją jak dokładnie chcemy, aby tkaniny były położone w formie. Nacięcia na szablonach wykonujemy dopiero po położeniu tkaniny w formie, ponieważ nigdy nie ułożymy wyciętego kawałka idealnie tak jak zakładaliśmy pierwotnie, a miejsce przecięcia musi być w konkretnym miejscu na formie. Należy zadbać o to, żeby nacięcia na kolejnych warstwach nie były w tym samym miejscu, aby nie osłabić miejscowo kompozytu. Przy mniej skomplikowanych formach włókna można w całości docinać w formie.

Jeśli zależy nam na estetyce elementu warto zabezpieczyć krawędzie żeby włókna kładzonego na pierwszą warstwę, żeby się nie strzępiły w miejscu gdzie będzie to widoczne.

Jednym ze sposobów na osiągnięcie tego jest doklejenie od tyłu na tkaninę cienkiego paska taśmy szklanej, tak aby wystawał nieco poza tkaninę i było go na tkaninie tyle, aby trzymała włókna razem. Najlepiej zrobić to psikając klejem tylko na taśmę, aby nie brudzić tkaniny. Potrzebne jest tutaj dużo kleju. Innym sposobem jest popsikanie całego włókna klejem i odłożenie go na 15minut. Po tym czasie nie będzie on się już kleił, ale będzie sztywniejszy i włókna nie będą się strzępić.

Polecamy, obejrzeć poniższy materiał przedstawiający ten proces:

<https://youtu.be/t8KgtizrdCE?si=r45CudxjsF1bOb2k>

Wycięcie dobrze delaminażu i siatki również jest bardzo ważną częścią dobrej laminacji. Podstawowe informacje na temat delaminażu i siatki:

- Powierzchnia kompozytu od strony gdzie leżał delaminaż jest chropowata, dzięki czemu nadaje się do klejenia bez konieczności matowienia
- Delaminaż można układać na dwa sposoby: w postaci pasków lub wycinać z szablonów z dodatkowym offsetem 5 cm, a następnie ciąć na paski.
- Delaminaż podklejamy tak samo jak inne tkaniny, używając tych samych klejów.
- Delaminaż jest trudniejszy do układania w zagięciach niż inne tkaniny. Dlatego dobrze go naciąć przy każdym zagięciu, a następnie położyć w tym miejscu cienki pasek delaminaża.
- Siatkę infuzyjną układa się na delaminażu, można robić to klejami, jednak my przyklejamy ją zazwyczaj silvertapem.
- Siatkę układamy tak, by leżała pod rurkami doprowadzającymi żywicę i przykrywała całe włókno. W zależności od formy, może też leżeć pod rurkami do zaciągania próżni.
- Siatka nie musi przylegać do brzegów laminowanego włókna. Małe odstępy do 5 cm między siatką a włóknem i tak się zalaminują. Im równiej ułożymy siatkę, tym równomierniej popłynie żywica, co teoretycznie pozwoli jej dotrzeć do rurki próżniowej w tym samym momencie (w praktyce rzadko się to udaje ze względu na trudności w idealnym ułożeniu rurek).
- Przy cięciu siatka powinna leżeć luźno – jeśli jest naciągana, później się skurczy. Trudno ją później rozciągnąć na formie bez uszkodzenia delaminażu pod spodem.
- Siatka ma tendencję do kurczenia się po docięciu. Zawsze można dociąć drugi kawałek. Przy łączeniu równoległym do kierunku przepływu żywicy lepiej, by kawałki nie nachodziły na siebie, by uniknąć miejsc szybszego przepływu. Przy łączeniu prostopadłym do kierunku przepływu lepiej, by na siebie nachodziły, aby nie ograniczać przepływu.

2. Wyczyszczenie pola roboczego

Robimy to za pomocą izopropanolu lub dedykowanego cleanera , czasem skrobaczki, zależnie od stanu powierzchni i rodzaju zabrudzenia.

3. **Nałożenie mould sealer*** (w przypadku kiedy mamy podejrzenia, że forma może być nieszczelna).

4. **Nałożenie mould release** (wosk, frekota, PVA lub PE).

Przed wykonaniem tego kroku przyklejamy taśmę malarską w miejscu gdzie będziemy chcieli mieć butyl. Jeśli tego nie zrobimy butyl nie będzie się dobrze kleił do powierzchni.

Wosku nakłada się przynajmniej 3 cienkie warstwy, zazwyczaj dajemy ich 5-7, a dla słabo wykonanych form nawet więcej. Aby uzyskać ładną powierzchnię ostatnie 3 warstwy wosku polerujemy, między nałożeniem warstwy a polerowaniem (lub kładzeniem kolejnej) należy odczekać 15 minut; jak jest cieplej wystarczy 10min. Wosk nakłada się gąbeczką dołączoną do opakowania.

Lepszą powierzchnię możemy uzyskać używając frekoty. Jest ona łatwiejsza w używaniu od wosku, ale i droższa. Frekote nakładamy co 10 minut¹³, po ostatniej odczekujemy 20 minut przed rozpoczęciem układania włókien. Rozprowadzamy ją po formie za pomocą **czystej** bawełnianej ściereczki; przy każdej warstwie musi być to nowy, czysty skrawek.

Frekota może być używana wielokrotnie o ile nie uszkodzi się warstwy (czasem niemożliwe jest usunięcie pozostałości żywicy z formy bez uszkodzenia frekoty)

Jeśli chcemy nałożyć wosk lub frekotę dzień wcześniej, w dzień laminowania należy nałożyć jedną warstwę „przypominającą” jeśli nie mamy pewności, że pomieszczenie w którym laminujemy jest bardzo czyste.

5. **Top coat***

Kosztem nieco większej wagi daje lepszą powierzchnię- stosowane na elementach, gdzie estetyka jest dla nas bardzo ważna. Dodatkowo chroni przed promieniowaniem UV, które degraduje żywice oraz przed potencjalnymi, małymi uszkodzeniami mechanicznymi. (przykładowo odpryski z drogi, które mogłyby potencjalnie uszkodzić powierzchnię)

Top coat aplikuje się pistoletem, u nas używany jest EC G30, który jest dodatkowo rozcieńczany styrenem, ponieważ jest zbyt gęsty do rozpylania. Ważne jest aby kupić pistolet o dobrej atomizacji.

Używamy top coatu poliestrowego i rozcieńczamy go ze styrenem, aby uzyskać pożądaną gęstość.

W związku z tym, że pracujemy tu ze wspomnianą wcześniej żywicą poliestrową oraz styrenem; w czasie spryskiwania koniecznie trzeba mieć pełne bhp (okulary, maska, strój do malowania) oraz opuścić pomieszczenie od razu po zakończeniu nakładania top coatu. Otwieramy okna i zostawiamy pokój do przewietrzenia na przynajmniej pół godziny.

¹³ Czas odczekiwania między nakładanymi warstwami frekoty i wosku jest zależny od temperatury. Gdy jest ciepło można go skrócić.

Po użyciu koniecznie trzeba umyć pistolet lakierniczy, poprzez przepuszczenie przez niego acetonu. Jeśli tego nie zrobimy żywica zaschnie w środku i pistolet nie nadaje się do ponownego użytku.

6. Układanie włókien

Ten krok jest naprawdę kluczowy; bez dobrego ułożenia włókien nie otrzymamy dobrego kompozytu. Niedokładne ułożenie włókien skutkuje nie dociśnięciem przez worek tkaniny do formy, w wyniku czego powstają „kałuże” żywicy. Osłabiają one kompozyt i zwiększają jego wagę.

Szczególnie ważna jest pierwsza warstwa. Może się wydawać, że małe nie dociśnięcie będzie mieć znaczenia, jednak zazwyczaj niedokładne wykonanie pierwszej warstwy prowadzi to problemów przy kolejnych. Dodatkowo, jeśli zależy nam na estetyce elementu, warto pozbyć się wszelkich luźnych kawałków włókna i upewnić się, że miejsca nacięć wyglądają najlepiej jak to możliwe.

Włókna nakładamy na formę etapowo - przyklejamy wycięty kawałek porcjami. Psikamy klejem mały fragment i nie zabieramy się za kolejny póki pierwszy nie jest dobrze przyklejony. Układając kolejne warstwy upewniamy się, że miejsca przecięć (na różnych warstwach) się nie pokrywają (aby nie spowodować punktowego osłabienia elementu).

Po ułożeniu wszystkich tkanin przycinamy nadmiar materiału wystający za krawędź formierską, aby zrobić miejsce na butyl. Następnie usuwamy luźne części włókna powstałe przy odcinaniu.

7. Delaminaż, siatka i rurki

Delaminaż można układać na dwa sposoby, w postaci pasków lub wykrojów z dodatkowym offsetem (ok. 5 cm), które następnie tnijemy na paski. Jako, że trudno układa się go w zagięciach, w takich miejscach należy go naciąć i położyć dodatkowy pasek. Ciągłość materiału nie jest tu istotna, więc nie staramy się jej zachować.

Delaminaż przyklejamy korzystając z tych samych klejów, których używamy do włókien. Na delaminaż kładziemy siatkę infuzyjną do której są dedykowane kleje, jednak bardzo dobrze sprawdza się również silvertape. Przy układaniu siatki najważniejsze jest, aby znajdowała się pod rurkami doprowadzającymi żywicę i przykrywała całe laminowane włókno. Nie musi ona przylegać dokładnie do brzegów laminatu (równoległych do kierunku przepływu żywicy). Jeśli przerwa w siatce jest nie większa niż 5cm włókno powinno się zalaminować.

Jeśli potrzebujemy w danym miejscu przeciąć siatkę ważne jest, aby:

- **przy połączeniu równoległe do kierunku przepływu żywicy** – kawałki siatki nie nachodziły na siebie, aby uniknąć lokalnych miejsc o szybszym przepływie,
- **przy połączeniu prostopadle do kierunku przepływu** – kawałki nachodziły na siebie, aby nie ograniczać przepływu.

Podczas przycinania siatka powinna leżeć luźno. Jeśli będziemy ją ciąć napiętą może się okazać, że nie pokryje ona formy tak jak się spodziewaliśmy.

Następnym krokiem jest ułożenie rurek spiralnych doprowadzających żywicę oraz rurki odprowadzającej powietrze. Ich umiejscowienie powinno być przemyślane, szczególnie przy skomplikowanych geometriach. Ułożenie rurek będzie decydować o tym jaka będzie trasa żywicy przez nasz kompozyt- jeśli nie zrobimy tego dobrze może się okazać, że niektóre miejsca się nie zalaminują.

8. Worek i butyl

Odklejamy taśmę malarską i przyklejamy butyl dokładnie w miejscu gdzie wcześniej była taśma. Butyl można przykleić przed nałożeniem tkanin o ile nie używamy klejów. Ogranicza to ryzyko dostania się włókien między formę, a butyl, co powoduje nieszczelności. Istnieje również opcja przyklejania butylu bezpośrednio na worek próżniowy, co jest sporym ułatwieniem jeśli nie ma się wprawy w robieniu zakładki.



Proces przyklejania butylu z workiem próżniowym na formę

Worek przycinamy z zapasem – powinien swobodnie wchodzić we wszystkie zakamarki formy. Estymując wielkość bierzemy pod uwagę głębokość formy i obecność zakładek. Jeśli okaże się, że potrzebujemy worka większego niż pozwala na to jedna rolka można skleić ze sobą butylem dwa kawałki worka. Trzeba to robić bardzo uważnie, żeby w tym procesie nie utłuścić butylu, ani worka. Naprawienie takiej nieszczelności jest potem bardzo trudne i czasochłonne albo wręcz niemożliwe

W zależności od tego czy wybraliśmy opcję z butylem na formie czy na worku kolejny etap będzie lekko się różnił, ale najważniejsze aspekty są takie same. Zaczynamy od włożenia worka do formy i ułożenia go. Najważniejszym celem na tym etapie jest, aby w trakcie infuzji w każdym miejscu worek mocno dolegał do formy. Pomogą nam w tym zakładki, które tworzą naddatek worka pozwalający na dopasowanie go do szczelin formy.



Zakładka- laminacja podwozia

Jeżeli wybraliśmy opcję z przyklejaniem butylu bezpośrednio na worek, a potem na formę, zrobienie zakładki będzie proste. Wystarczy skleić ze sobą butyl z jednej i drugiej strony zakładki, upewniając się, że nie powstały nieszczelności w butylu.

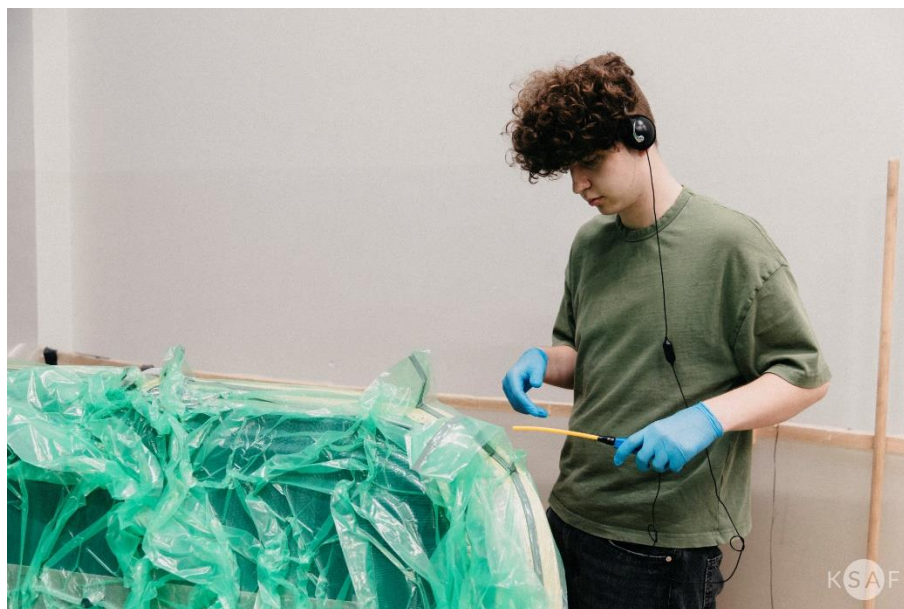
Jeżeli przyklejamy worek do butylu na formie musimy nakleić butyl na worek- tak długi kawałek jak dużą chcemy zakładkę. Następnie przyklejamy worek do tego butylu. Należy upewnić się, że zakładka jest szczelna, szczególnie na zagięciu worka i przy podstawie zakładki. Są to najczęstsze miejsca gdzie pojawiają się nieszczelności.

Najważniejsze jest miejsce zakładki. Zanim przejdziemy do przyklejania worka dobrze jest się zastanowić gdzie potrzebne jest go więcej i jak dużych zakładek potrzebujemy.

9. Próżnia i drop test

Po przyklejeniu worka próżniowego do formy zakręcamy wejście na żywicę za pomocą ścisku i włączamy pompę próżniową. Podczas zaciągania próżni należy uważnie kontrolować ułożenie worka – szczególnie w przypadku form o złożonej geometrii. Ważne jest, aby worek dobrze przylegał do wszystkich powierzchni, dociskał narożniki i nie zostawiał przestrzeni, w których może zgromadzić się powietrze. Aby precyzyjnie ułożyć worek często pomocne jest kontrolowane rozszczelnienie worka- zmniejszamy podciśnienie, aby umożliwić łatwe manewrowanie workiem. Jeśli worek ułożył się bardzo źle, można też całkowicie spuścić próżnię i zacząć od nowa.

Kiedy ułożymy już worek zaczynamy szukać nieszczelności. Część z nich będzie stosunkowo prosta do znalezienia dzięki syczeniu. W większości słuch wystarczy aby je zlokalizować, jednak czasem pomocne może być urządzenie nazywane potocznie walkmenem.



Szukanie nieszczelności z pomocą walkmena

Kiedy worek wydaje się być szczelny, wykonujemy tzw. drop test – czyli sprawdzamy, czy próżnia utrzymuje się przez określony czas. W zależności od wielkości formy test ten trwa zwykle od 20 do 60 minut. Na czas testu należy zakręcić zawór po stronie pompy próżniowej, aby wynik nie był zaburzony przez ewentualne nieszczelności Ferba lub bezwładność układu.

Jeżeli próżnia się nie utrzymuje ponawiamy próbę uszczelnienia i powtarzamy test. Jeśli po kilku próbach nadal nie mamy pełnej szczelności często mimo wszystko wykonujemy infuzję, mając nadzieję, że w trakcie procesu uda się znaleźć i naprawić nieszczelność. Warto pamiętać, że nieudany drop test nie zawsze świadczy o poważnej nieszczelności; czasem problemem jest jedynie mikro-przeciek, którego nie da się łatwo namierzyć. Z drugiej strony,

pozytywny wynik testu również nie daje stuprocentowej gwarancji szczelności całego układu – dlatego tak ważna jest dokładność na tym etapie przygotowania.

W przypadku nieudanego drop testu należy obserwować formę podczas infuzji i szukać miejsc, w których do laminatu przedostają się drobne pęcherzyki powietrza – często przez mikroskopijne nieszczelności. Nawet jeśli forma przeszła test szczelności, pęcherzyki mogą pojawić się później – najczęściej w wyniku poruszenia rurkami lub ich obluźniania, dlatego należy się z nimi obchodzić bardzo ostrożnie. Nieszczelności naprawiamy butylem.

10. Przesączanie żywicy

Infuzję żywicy należy przeprowadzić tego samego dnia, w którym został nałożony worek próżniowy – szczególnie gdy istnieje podejrzenie nieszczelności. Pozostawienie worka na dłuższy czas grozi osadzeniem się pod nim wilgoci z powietrza, co negatywnie wpływa na jakość kompozytu. Problem ten jest mniej istotny w warunkach niskiej wilgotności (np. zimą) lub przy bardzo szczelnym układzie.

Proces rozpoczynamy od włączenia pompy próżniowej i otwarcia zaworów od strony pompy. Dopiero po ustabilizowaniu się próżni otwieramy zawory po stronie żywicy. Żywicę wprowadzamy przez wcześniej przygotowane rurki, dbając o to, by do układu nie dostało się powietrze. W przypadku, gdy do infuzji używamy więcej niż jednego kubka żywicy, należy dolewać kolejne porcje do głównego zbiornika po ściankach, aby uniknąć wprowadzania bąbelków powietrza.

W początkowej fazie procesu włókna pochłaniają znacznie więcej żywicy na m² co warto mieć na uwadze przy przygotowywaniu kolejnych porcji żywicy. Nie należy się niepokoić, jeśli połowa żywicy już została zaciągnięta, a objętościowo pokryte zostało dopiero 1/3 formy. Proces należy kontynuować, aż niemal cała porcja żywicy znajdzie się w układzie – niewielką ilość można pozostawić w kubku na wszelki wypadek.

Po zakończeniu infuzji, czyli w momencie, gdy do układu przestaje wpływać powietrze lub kończy się czas pracy żywicy należy wyłączyć pompę (w przypadku szczelnego układu) lub pozostawić pompę próżniową włączoną jeszcze przez 5–6 godzin, aby zminimalizować obecność powietrza w strukturze kompozytu (kiedy podejrzewamy nieszczelność).

11. Wygrzewanie elementu

Po wstępnym utwardzeniu (zwykle po ok. 12 godzinach) kompozyty należy wygrzać, zanim usunie się je z formy. Proces wygrzewania przeprowadza się, gdy laminat wciąż znajduje się w worku próżniowym i jest dociskany do formy. W tym celu wykorzystuje się specjalne worki odporne na wyższe temperatury.

12. Wyjmowanie elementu

Nie należy wyciągać laminatu spod worka póki żywica w pełni nie zsieciowała. Można to prosto sprawdzić wyginając rurkę przez którą była doprowadzana żywica. Jeśli żywica w środku rurki się gnie zamiast się „łamać” to należy jeszcze poczekać.

Czasy sieciowania zależą od temperatury i tego jakiej żywicy używamy, jednak jeżeli żywica nie chce w pełni zsieciować przez 3 dni najprawdopodobniej zostały zastosowane złe proporcje (za mało utwardzacza).

Pre-preg

Wet lay

Przy wet-layu z workiem próżniowym przygotowanie powierzchni i zakładanie worka próżniowego przebiega w taki sam sposób jak przy infuzji. Z tą różnicą, że potrzebujemy tutaj tylko jednej rurki- do pompy próżniowej. Żywica zostaje zaaplikowana pędzlem lub wałkiem, przed nałożeniem worka. Dodatkowo, aby pozbyć się nadmiaru żywicy używamy w tej metodzie kocyka. Na delaminaz kładziemy folię perforowaną, a następnie kocyk, aby ułatwić oderwanie kocyka od delaminaża.

U nas Wet Layem (bez worka) wykonuje się właściwie wyłącznie formy- proces tworzenia formy krok po kroku opisano w nagłówku o formach.

Forged Carbon Fiber

Pierwszym etapem jest przygotowanie materiałów, które w tej metodzie są inne niż przy pozostałych trzech. Aby wykonać taki laminat potrzebujemy duże ilości krótkich, pojedynczych włókien węgla. Są one dostępne do kupienia, jednak można zwyczajnie pociąć tkaninę, dzięki czemu zaoszczędzimy na materiałach. Można skorzystać z odpadów z wycinania włókien do innych metod laminowania.

W razie potrzeby możemy również użyć tkanin, w miejscach, gdzie element jest narażony na największe naprężenia.

W związku z brakiem próżni, która pomoże nam odprowadzić nadmiar żywicy, bardzo istotne jest, aby użyć odpowiednich proporcji żywicy i włókien. Celujemy w proporcje 60:40 włókno:żywica. Aby obliczyć ilości materiału potrzebne do wykonania naszej części wystarczy obliczyć masę całego elementu i z proporcji wyznaczyć masę włókna i żywicy.



Laminowanie końcówek wahaczy metodą forged carbon fiber

Objętość elementu można sprawdzić w programie CAD w którym model wykonywaliśmy, a gęstość laminatu węglowego jest równa około $1,4 \frac{g}{cm^3}$; tych wartości używamy, aby policzyć docelową masę kompozytu. Przy samym laminowaniu kluczowe jest użycie odpowiedniej ilości włókien. W przypadku żywicy nie jest to równie istotne, ponieważ jeśli będziemy mieli odpowiednią ilość włókna, to nadmiar żywicy powinien wypłynąć przy zamykaniu formy. Należy jednak uważać, aby włókno było równo rozłożone. W przeciwnym wypadku fragmenty kompozytu będą miały więcej żywicy w stosunku do węgla, co zmniejszy ich wytrzymałość.

Proces projektowania formy oraz samego laminowania jest świetnie przedstawiony na poniższych filmikach:

<https://youtu.be/25PmqM24HEk?si=QMPiVKfJdgQzxGEo>

<https://youtu.be/nhqAhYOdGNc?si=WJqCaN-XIQHlFEue>

11. Formy

Wprowadzenie

Na wstępie ogólnikowo opiszemy typowy proces wytwarzania form naszymi metodami. Instrukcja krok po kroku znajduje się w dalszych punktach.

Proces tworzenia formy do laminatów kompozytowych:

- Zaprojektowanie formy
- Przygotowanie materiału (w przypadku frezowania CNC)
- Wstępne wykonanie kopyta¹⁴(frezowanie CNC lub druk 3D)
- Obróbka formy pozytywowej (szlifowanie, naprawianie ewentualnych ubytków)
- Laminowanie formy na kopycie

Materiały form i kopyt

- MDF (ang. Medium Density Fibreboard)- płyta wykonana ze średniej gęstości włókien drzewnych. Bardzo dobry materiał do frezowania (pod warunkiem zakupienia płyty o odpowiedniej gęstości) co jest jednym z powodów czemu jest najczęściej używanym przez nas materiałem do wytwarzania kopyt. Można również wykonywać z niego formy bezpośrednio do laminowania. Mają one jednak mniejszą szczelność niż żelkot, przez co wymaga uszczelnienia- przykładowo żywicą lub lakierem. Dodatkowo powierzchnia laminatu z takiej formy wychodzi gorsza niż z formy żelkotowej.
- Druk 3d- Używane zazwyczaj jako opcja dla mniejszych elementów, form dwuczęściowych (gdzie laminat całościowo wkładamy do worka) jak i form do Forged Carbon Fiber. W porównaniu do MDF gorzej się go szlifuje, co wydłuża czas przygotowywania takiej formy i często skutkuje gorszą finalną powierzchnią. Dodatkowo często nie jest szczelny (zależy to w dużym stopniu od tego jak element się wydrukuje) co wymusza włożenie formy w całości w worek.

W praktyce metody tworzenia form/ kopyt można ze sobą łączyć i często się to robi. Druk 3D świetnie się sprawdza w miejscach, które byłyby bardzo trudne lub niemożliwe do wyfrezowania, przykładowo ze względu na złożoność geometrii lub kąt. Elementy wydrukowane przyklejamy do MDF i przygotowujemy do laminowania jak resztę formy.

- Żelkot- Wykonujemy z niego formy negatywowe, laminując je na wyfrezowanym wcześniej MDF. Pomaga on uzyskać lepszą powierzchnię niż MDF i jest szczelniejszy. Dodatkowo przy laminowaniu formy żelkotowej mamy możliwość umieszczenia w żelkocie grzałek, które później posłużą do wygrzewania już docelowego elementu w odpowiednich cyklach.

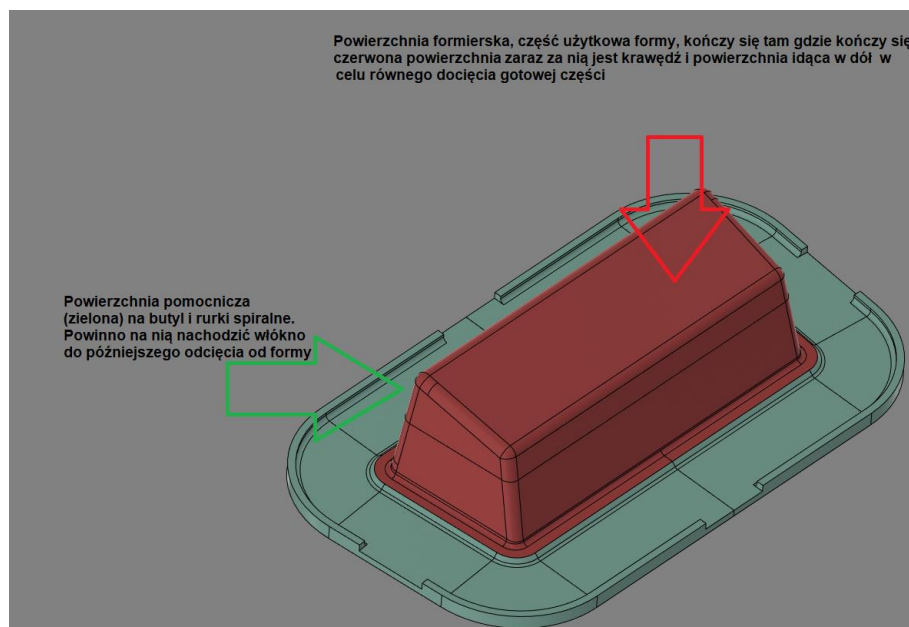
¹⁴ Forma pozytywowa- potocznie kopyto; wypukła forma. W naszym procesie służy do wykonania formy negatywowej (wklęsłej).

- Mata szklana- Używana w formach żelkotowych, na zewnętrznej warstwie. Pełni ona rolę wzmocnienia. Przy laminowaniu formy żelkotowej warto, przynajmniej na pierwszą warstwę położyć matę o mniejszej gradacji- będzie łatwiej ją układać.
- Tafla szkła- Do laminowania elementów płaskich, takich jak płyty i panele fotowoltaiczne.
- Formy metalowe- Służą do RTM, gdzie ze względu na stosunkowo wysokie ciśnienie żywicy potrzebujemy, aby materiał formy był sztywniejszy.
- Płyty żywiczne-

Projektowanie formy

Pierwszym krokiem po zamodelowaniu części, którą będziemy wykonywać jest dodanie powierzchni pomocniczych na brzegach kopyta, aby było miejsce na przyklejanie worka próżniowego i układanie rurek spiralnych. Dodatkowo ta powierzchnia będzie nam w późniejszym etapie służyć do równego wycięcia kompozytu, dlatego nie powinna być bezpośrednim przedłużeniem powierzchni elementu.

Powierzchnia pomocnicza powinna mieć około 100mm szerokości.



Kolejnym ważnym aspektem projektu formy są kąty- element zalaminowany musimy finalnie wyciągnąć z formy, co będzie bardzo ciężkie jeśli będziemy mieć w formie kąty proste. Dodatkowo stanowi to utrudnienie w samym laminowaniu- im mniej zaokrąglenia tym trudniej będzie docisnąć włókno do formy.

Proces tworzenia formy pozytywowej

Forma z druku 3D-porady

- Jeśli kopyto jest za duże, żeby je wydrukować, można to zrobić w częściach. Należy w takim wypadku uwzględnić w projekcie pozycjonery, które umożliwią nam dobre pozycjonowanie części formy wobec siebie. Kołki do pozycjonerów wbijamy w trakcie klejenia ze sobą fragmentów.
- Niska warstwa wydruku ułatwi późniejsze szlifowanie formy.
- Nieco grubsze ścianki wydruku (3-4 minimum) zapobiegną przeszlifowaniu się przed warstwę zewnętrzną oraz ochronią druk przed uszkodzeniem (przykładowo od nacisku w trakcie szlifowania lub od worka próżniowego)

Wykonanie kopyta - frezowanie CNC

Formy z MDF frezujemy na ploterze CNC¹⁵. Jest to metoda umożliwiająca nam uzyskanie dokładności do dziesiątych części mm. Przy frezowaniu najpierw robi się obróbkę zgrubną, która ma za zadanie usunąć większość materiału i zostawić cienką warstwę, którą usuwa obróbka wykańczająca pozostawiając po sobie dobrej jakości powierzchnię.

Pierwszym krokiem jest przygotowanie G-Code'u¹⁶ w programie CAD/CAM i wycięcie płyt z których frezowana będzie forma. Płyty wycinamy zgodnie z wymiarami z projektu, ograniczając się do prostokątów i trapezów prostokątnych. Następnie płyty kleimy ze sobą i odstawiamy do wyschnięcia ściśnięte ściskami. Nie należy ich ścisnąć najmocniej jak jesteśmy w stanie. Przy zbyt mocnym ściśnięciu płyta może się odkształcić, dodatkowo istnieje ryzyko zepsucia ścisku.

Na wkrętach mocujemy płyty przed frezowaniem do stołu. Robimy to na ogół tak że najpierw frezujemy sobie otwory w przez które będziemy się wkręcać do stołu, potem wkręcamy się w tym miejscu. Najlepiej usiąść sobie całym ciężarem ciała blisko miejsca w którym się wkręcamy żeby nie podniosło deski w czasie tego zabiegu. Przed frezowaniem żeby deska na pewno nie uciekła przy frezowaniu otworów łapiemy ją po bokach na dwa wkręty które później usuwamy. Nie używamy taśmy do przyklejania desek, bo zdarzało się, że się odklejały.

Sklejając wyfrezowane już elementy formy należy uważać, aby nie nałożyć zbyt dużo kleju. Jeśli wypłynie on z boków to utwardzi MDF i utrudni szlifowanie oraz wchłanianie się żywicy w tych miejscach.

¹⁵ Ploter CNC – urządzenie oparte na komputerowym sterowaniu urządzeniami numerycznymi; obróbka skrawaniem

¹⁶ G-Code- język zapisu komend przekazywanych urządzeniu, pozwalających kontrolowanie ich działania

Często na sam spód kładziemy jeszcze jedną płytę, żeby usztywnić konstrukcję i nie złamać kopyta przy noszeniu czy to w miejscu klejenia kawałków, czy to gdzieś na krawędzi formy, gdzie często zostawiamy nawet tylko 5 mm żeby zaoszczędzić na materiale. Do tej płyty mocujemy się na wkrętach zamiast na kleju żeby potem odzyskać tą płytę



Proces nakładania żelkotu na kopyta z MDF - laminacja formy na podwozie

Obróbka

Po wyfrezowaniu i sklejeniu elementów formy równamy ślady po frezowaniu i niwelujemy nierówności na łączeniach ze sobą frezowanych elementów. Zazwyczaj robimy to papierkiem 60 lub 80, ewentualnie szlifierką z papierkiem o większej gradacji. Następnie nakładamy na całość kopyta warstwę żywicy epoksydowej (po wyczyszczeniu kopyta z pyłu). Robimy to aby uniknąć ciągnięcia wody oraz żywicy (przy laminowaniu) przez MDF. U nas używamy 360 gram żywicy LG 700 na m² MDF. Żywica powinna być rozprowadzona równo, nigdzie nie powinien zostać suchy fragment MDF. Następnie po odczekaniu 5 minut wycieramy formę z nadmiaru żywicy papierem, aby uniknąć kałuż. Po zsiękowaniu żywicy przechodzimy do szlifowania, należy się upewnić, że żywica jest twarda i nie „kulkuje się” w trakcie szlifowania. Następnie przechodzimy do szpachlowania potencjalnych niedoskonałości po frezowaniu oraz dziur od wkrętów. Po wyschnięciu szpachli ponownie szlifujemy całą formę (do papierka 120, zaczynając od 60 lub 80), w razie potrzeby nakładając szpachle jeśli gdzieś jej brakuje. Gdy skończymy to przemywamy formę IPA i dodajemy drugą warstwę żywicy (tym razem 60g/m²). Po jej wyschnięciu szlifujemy formę zaczynając od papierka 150 lub 220, kończąc na 3000.

Jak szlifować?

Przy szlifowaniu zawsze zaczynamy od niższej gradacji, przechodząc wyżej o maksymalnie półtora obecnie używanego papierka. Oczywiście papierek od jakiego zaczynamy zależy od tego jaka jest nasza powierzchnia startowa- jeśli jest dobra to zaczynamy od wyższej gradacji. Należy pamiętać o noszeniu maseczki jeśli szlifujemy na sucho (co robimy w przedziale papierków 60-400), przy szlifowaniu na mokro pył zostaje w wodzie na formie, więc nie musimy się nim martwić. Wodę na formę наносimy na papierku, nie wlewamy jej bezpośrednio na nią. Nasz kubek z wodą należy wymieniać przy każdej zmianie papierka, aby nie nanosić drobinek poprzedniej gradacji na formę. Należy również czyścić formę przed każdą zmianą papierka z pyłu, zarówno przy szlifowaniu na mokro jak i przy szlifowaniu na sucho.

Laminowanie formy

Przygotowanie powierzchni

Przed rozpoczęciem laminowania należy odpowiednio przygotować powierzchnię kopyta. Powierzchnia musi być gładka, czysta i odtłuszczona — do tego celu zaleca się użycie alkoholu izopropylowego (IPA). Na tak przygotowaną formę aplikuje się minimum trzy warstwy wosku separacyjnego, jednak w praktyce, dla zapewnienia lepszego poślizgu i ułatwienia późniejszego odklejania delaminaża, standardowo stosuje się 5 do 7 warstw. W przypadku kopyt o niskiej jakości powierzchni (np. porowatych, niedoszlifowanych) wskazane jest nałożenie nawet kilkunastu warstw wosku.

Wosk należy nakładać kulistymi (okrężnymi) ruchami, co pozwala na równomierne rozprowadzenie i wypełnienie mikrorys, a także ogranicza powstawanie smug. Do aplikacji można użyć gąbki dołączonej do opakowania, zwykłej gąbki kuchennej lub specjalistycznej gąbki do wosku dostępnej w sprzedaży (choć ta ostatnia nie była przez nas testowana). Po każdej aplikacji należy odczekać co najmniej 15 minut, aby warstwa miała czas się utwardzić; w wyższych temperaturach czas ten można skrócić do około 8–10 minut.

Nakładanie żelkotu

Laminowanie form wykonujemy metodą wetlay, czyli nakładamy żywice ręcznie-pędzlami. Po przygotowaniu powierzchni nakładamy na kopyto pierwszą warstwę żelkotu- my używamy RENGEL® SW56 z utwardzaczem HY 5159 (proporcja 100:10). Żelkot, będący w istocie zagęszczoną żywicą, cechuje się lepszym odgazowywaniem niż standardowe żywice epoksydowe, a po utwardzeniu daje się łatwo szlifować. Używany przez nas żelkot, charakteryzuje się wysoką lepkością, co ogranicza jego spływanie po pionowych powierzchniach. Dla poprawy komfortu pracy oraz uzyskania bardziej estetycznego efektu, do żelkotu dodajemy barwniki. Należy bezwzględnie stosować specjalistyczne barwniki do żywic epoksydowych – inne, np. do silikonów, są niekompatybilne i mogą zakłócić proces sieciowania. Aby uzyskać jednolitą kolorystykę całej formy, należy dokładnie odmierzać i powtarzalnie dozować barwnik do każdej porcji żelkotu.

Mieszanie przeprowadzamy zazwyczaj w litrowych pojemnikach, przy użyciu mieszadła zamocowanego do wiertarki lub mieszadła do betonu. Bardzo ważne jest aby zrobić to dokładnie – niedostatecznie wymieszany żelkot może pozostawić niesieciowane obszary na powierzchni formy, które później wymagają mechanicznego usunięcia i naprawy. To samo może się stać w przypadku „zdrapywania” żelkotu ze ścianek naczynia (na ściankach często pozostają niezmieszane komponenty). Czas pracy z wymieszanym żelkotem wynosi maksymalnie około 20 minut, więc szybko trzeba go rozlać na formę- trzymanie go w wiaderku za długo może doprowadzić do szybszego zżelowania.

W celu uniknięcia kontaminacji włóknami, przed aplikacją warto ręcznie usunąć luźne włosy z pędzla. Żelkot aplikujemy wylewając go bezpośrednio na formę lub nakładamy go pędzlem (jeśli pracujemy nad dużą formą i/lub nie mamy wielu osób lepiej jest go wylać na formę, aby nie zaczął żelować w wiadrze). Następnie równomiernie rozprowadzamy szybkim, lekkim pociągnięciem pędzla, nie dociskając go zbyt mocno, aby nie naruszyć warstwy wosku.

Pierwszą warstwę aplikujemy w ilości około 1 kg/m^2 - jest to warstwa właściwa. Drugą warstwę наносimy w ilości około 600 g/m^2 , uzupełniając nią obszary, gdzie pierwsza warstwa mogła spłynąć, szczególnie na stromych ściankach oraz w miejscach widocznych ubytków, np. mikropęcherzy powietrza. (W przypadku bardzo płaskich form dopuszczalne jest zastosowanie jednej, grubszej warstwy żelkotu.) Po aplikacji warto wizualnie skontrolować formę i usunąć ewentualne luźne włosie z pędzla zanim żelkot całkowicie stwardnieje. Drugą warstwę żelkotu należy nakładać po osiągnięciu przez pierwszą warstwę tzw. stanu B – oznacza to, że żelkot nie klei się już do palca, ale daje się delikatnie odkształcić. Zwykle stan ten następuje po około 1,5 godziny od aplikacji (czas zależy od rodzaju żelkotu i warunków otoczenia – wyższe temperatury przyspieszają, a niższe opóźniają sieciowanie).

Układanie włókna szklanego i grzałek

Proces laminowania włókna szklanego rozpoczyna się w momencie, gdy ostatnia warstwa żelkotu osiągnie tzw. stan B. Na tym etapie można przystąpić do układania pierwszej warstwy maty szklanej. W przypadku dużych, płaskich powierzchni, zaleca się wstępne ułożenie suchej maty przed wymieszaniem żywicy w celu przyspieszenia procesu.

Żywicę przygotowujemy zazwyczaj w litrowych pojemnikach, odmierzając około 900 gramów, mieszając w taki sam sposób jak żelkot. W przypadku dużych form warto usprawnić proces mieszania- wyznaczyć jedną osobę, która miesza żywicę wiadro za wiadrem, w trakcie kiedy reszta zespołu ją rozprowadza. Żywicę aplikujemy metalowymi wałeczkami, pędzelkami i palcami.

Przy układaniu maty szklanej należy unikać powstawania pęcherzyków powietrza w strukturze kompozytu. Powietrze nagrzewa się szybciej niż szkło, co prowadzi do lokalnych

deformacji powierzchni formy, a w przypadku pierwszej warstwy może skutkować pękaniem kruchej warstwy żelkotu, niepodpartej od spodu. Pęcherze powietrza należy gładzić wałkiem wspomagając się dociśnięciem krawędzią wałka, patyczkiem, a w razie potrzeby – dodaniem niewielkiej ilości żywicy. Należy jednak unikać tworzenia kałuż, które mogą prowadzić do przelaminowania. Jeśli fragment maty wyjątkowo opornie układa się na formie, warto rozciąć lub rozerwać go na mniejsze części, co umożliwi lepsze dopasowanie do powierzchni. W miejscach takich jak kąty proste i ostre załamania – szczególnie w formach dwuczęściowych – zaleca się stosowanie krótkich włókien, z których budujemy tzw. fazki. Kawałki maty należy kłaść tak żeby na jednym kawałku maty nie było dwóch zagięć w formie, bo inaczej poprawiając jedno miejsce ciągniemy za drugie



Grzałki z rowingu węglowego

Zazwyczaj na formy używamy 5 warstw maty szklanej, jednak nie zawsze jest to konieczne. W zależności od wielkości i skomplikowania geometrii może wystarczyć 4, 3 albo nawet 2. Montaż grzałek powinien odbywać się bezpośrednio po nałożeniu trzeciej warstwy z pięciu planowanych warstw tkaniny szklanej. Dzięki temu grzałki są głębiej w formie i bardziej równomiernie ją nagrzewają.

Do wykonania grzałek stosujemy rękawy węglowe Sleeve węglowy fi1-5 (kiedyś rowing węglowy 6k, jednak układanie go było utrudnione ze względu na rozwarstwianie się włókien). Grzałki działają na zasadzie oporu właściwego włókna węglowego – po podłączeniu napięcia elektrycznego generują ciepło w wyniku przepływu prądu. Z tego względu niezwykle istotne jest zachowanie odpowiedniego rozplanowania i izolacji – nawet pojedyncza nitka, która zetknie się z inną może doprowadzić do zwarcia.

Układanie grzałek powinno być realizowane z zachowaniem równych odstępów i z możliwie równą długością poszczególnych obwodów. Robimy tak, aby uzyskać na formie możliwie jednolitą temperaturę. Warto zaplanować jak grzałki mają leżeć na formie, szczególnie, że wyprowadzenia obwodów muszą zostać przygotowane przed laminacją.

Po zamontowaniu grzałek rozpoczynamy nakładanie dwóch górnych warstw maty szklanej, przy zachowaniu wszystkich zasad obowiązujących podczas aplikacji trzech dolnych

warstw. Szczególną uwagę należy zwrócić na obszary w pobliżu wyprowadzeń przewodów – nie zawsze da się ułożyć włókno idealnie płasko; zazwyczaj powstaną tam bąble powietrza, które należy naprawić po zdjęciu z kopyta.

Ściąganie formy z kopyta

Epidan 53 utwardza się w ok. 80-90% dopiero po trzech dniach i dopiero po takim czasie można ściągnąć formę z kopyta. Proces zdejmowania formy rozpoczynamy od podważania krawędzi formy przy pomocy plastikowych rakli, które nie rysują żelkotu ani nie wprowadzają naprężeń punktowych. Po wstępnym zluzowaniu brzegów przystępujemy do ostukiwania formy gumowym młotkiem, koncentrując się na obszarach przylegających do kopyta. Następnie podejmujemy próbę uniesienia formy – zwiększając ilość punktów podważania raklami i kontynuując ostukiwanie. Narzędzia takie jak dłuta czy kliny wchodzą w grę kiedy ta metoda zawiedzie, jednak trzeba uważać szczególnie na powierzchniach, które nie są pomocnicze, żeby nie uszkodzić żelkotu.

Kiedy inne metody zawiodą pozostaje zawsze opcja zniszczenia kopyta w celu uwolnienia formy. Pozbywamy się po kolei fragmentów kopyta powtarzając co jakiś czas poprzednie kroki. W skrajnych przypadkach całe kopyto zamieniane jest na drobne kawałeczki.

Obróbka formy po ściągnięciu z kopyta

Po wyjęciu formy z kopyta pierwszym krokiem jest odcięcie wystających resztek włókna szklanego. Używamy w tym celu multitoola lub dremela, odcinając materiał do linii żelkotu. Po obcięciu krawędzi formy, jej obrzeża zabezpieczamy taśmą silver tape, aby uniknąć skałeczeń przy dalszej pracy.

Kolejnym krokiem jest usunięcie pęcherzy powietrza znajdujących się pod powierzchnią formy, które powodują nierówne rozgrzewanie się formy. W tym celu przewiercamy bąble. Robimy to ostrożnie – najlepiej kończyć je w momencie wyczuwalnego "przeskoku", co sugeruje przebicie pęcherza, ale bez naruszenia żelkotu. W przypadku głębokich bąbli wskazane jest wypełnienie ich żywicą epoksydową – szczególnie tam, gdzie zbliżają się do warstwy żelkotu.

Po przetestowaniu grzałek (proces opisany poniżej) tylną stronę formy izolujemy termicznie. Obecnie stosujemy koc termoizolacyjny PES 150 przeznaczony do laminowania na mokro, mocowany przy użyciu kleju kontaktowego w sprayu (KON B707). Przed dalszą obróbką formy w przypadku grzanych form dobrze jest przejść cykle wygrzewania formy z racji na to że często w ich trakcie jakieś bąble powietrza potrafią się rozszerzyć i wygiąć żelkot, albo w formie pojawiają się miejscowe hotspoty (np. na spięciach) i w tych miejscach forma grzeje się dużo bardziej przez co żelkot może się odkształcić i potem trzeba go równać w takich miejscach. Dobrze też przed szlifowaniem obstukać wszystkie rogi formy, np. trzonkiem od młotka gumowego i poszukać w ten sposób niedolaminowanych rogów, żeby pękły jeszcze

przed szlifowaniem, a nie w trakcie, albo co gorsza przy laminacji. Można to też zrobić zaraz po zalaminowaniu żeby szybko ocenić formę

W przypadku wykrycia lokalnych wgłębień w żelkocie, należy je zaszpachlować szpachlą do tworzyw sztucznych, uprzednio zmatowując i odtłuszczając powierzchnię. Pominięcie tego etapu może skutkować słabą adhezją.

Dla większych ubytków, przebić żelkotu, lub pęknięć nad bąblami powietrza, zaleca się użycie żywicy epoksydowej zagęszczonej mikrobalonem. Taka mieszanka lepiej uszczelnia niż szpachla.

Mikropory i mikrodziurki (o średnicy do wielkości szpilki) zazwyczaj nie wymagają szpachlowania. Zaleca się je uszczelnić mold sealerem przed samym laminowaniem. Ich obecność często świadczy o nadmiernym zeszlifowaniu formy. Jeśli naprawa jest konieczna, można rozwiercić takie miejsce dremelem i dopiero wtedy wypełnić mieszanką żywicy z mikrobalonem. W przypadku niewielkich dziurek czasami wystarczy sam mikrobalon, bez wiercenia. Jeśli takich miejsc jest niewiele (kilka na całej formie), warto poświęcić czas na ich staranne załatanie. Alternatywnie mikrodziurki można uszczelnić „kropelką” (klejem cyjanoakrylowym), ale należy to robić ostrożnie – klej ten jest trudny do szlifowania, może pozostawić trwałe ślady na powierzchni formy i w efekcie powodować widoczne wady na laminacie.

Grzałki

Do obsługi grzałek stosujemy sterownik, umożliwiający podłączenie czujnika temperatury oraz regulację prądu dostarczanego do grzałek. Nasz sterownik nie działa w sposób liniowy – wzrost mocy o jedną jednostkę nie przekłada się bezpośrednio na konkretny przyrost temperatury. Przykładowo: przeskok z temperatury 50°C do 65°C może wymagać zwiększenia ustawienia zaledwie o 1–2 punkty na skali. Dlatego po każdej zmianie temperatury docelowej warto odczekać chwilę i sprawdzić, czy rzeczywista temperatura zaczęła rosnąć. Jeśli tak – nie ingerujemy dalej. Dopiero gdy wzrost się zatrzyma, zwiększamy moc minimalnie. Należy pamiętać, że zbyt duży prąd może powodować lokalne przegrzanie formy, co grozi stopieniem żelkotu i uszkodzeniem powierzchni formy. Z tego względu rekomenduje się stosowanie niskiej mocy kosztem dłuższego czasu grzania – zyskujemy dzięki temu lepszą kontrolę nad procesem.

Przed przystąpieniem do właściwego wygrzewania formy należy koniecznie wykonać test grzałek. Test ten polega na znalezieniu i usunięciu przepięć, czyli miejsc, w których na powierzchni formy tworzą się niekontrolowane połączenia między grzałkami, prowadzące do punktowego przegrzewania. Najłatwiej je znaleźć z pomocą kamery termowizyjnej- patrząc jak wygląda rozkład temperatury po podłączeniu formy do prądu. Forma powinna być w tym czasie ułożona na kopycie, co nie tylko zabezpiecza powierzchnię przed zarysowaniem, ale też umożliwia łatwiejszy dostęp do tyłu formy.

Przepięcia usuwa się za pomocą dremelka, przecinając połączenia – należy jednak zachować ostrożność, aby nie naruszyć warstwy żelkotu.

Wygrzewanie formy

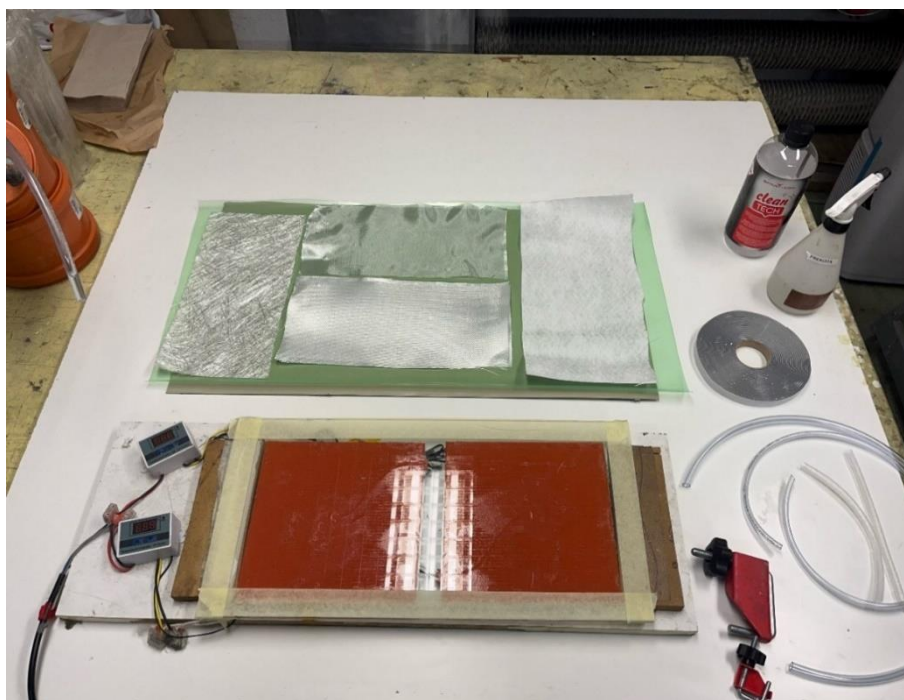
Samo wygrzewanie formy odbywa się zgodnie z cyklem podanym przez producenta żywicy. W przypadku żywicy Epidan 53, której obecnie używamy do laminowania form, proces przebiega w kilku etapach temperaturowych. Najpierw należy stopniowo podnosić temperaturę – np. do 35°C, potem 45°C, a następnie 50°C, przy której utrzymujemy formę przez ok. 3 godziny. Po upływie 1,5 godziny od osiągnięcia tej temperatury zdejmujemy formę z kopyta. W dalszym etapie grzejemy formę kolejno do 65°C na 2,5 godziny oraz do 75°C na kolejne 2 godziny. Pomiedzy kolejnymi progami należy zachować przynajmniej pół godziny płynnego przejścia, co pozwala wyrównać temperaturę i uniknąć szoków termicznych.

Powolne zwiększanie temperatury pozwala również wychwycić przepięcia, które nie zostały wcześniej zauważone. Jeżeli w czasie wygrzewania pojawią się lokalne przegrzania, podejmujemy próbę przecięcia danego miejsca. Jeśli to niemożliwe lub nieskuteczne, daną grzałkę należy odłączyć od sterownika. Wygrzewanie formy najlepiej rozpocząć jeszcze w kopycie, szczególnie w zakresie do 50°C – wówczas forma ma mniejszą tendencję do odkształceń, ponieważ kopyto działa jako stabilizator. Przy wyższych temperaturach nie zdjęcie formy z kopyta grozi popękaniem żelkotu w wyniku różnych rozszerzalności cieplnych kopyta i formy, aby tego uniknąć należy wyjąć formę z kopyta, podłożyć pod nią kocyk i kontynuować grzanie.

12.Laminowanie paneli fotowoltaicznych

1. Przygotowanie stanowiska grzewczego

Pierwszym etapem jest przygotowanie powierzchni roboczej umożliwiającej wygrzewanie elementów. Jak określono we wcześniejszych rozdziałach, odgrzewanie żywicy podczas procesu laminacji istotnie zwiększa jej płynność, co ułatwia pełne nasączenie struktury kompozytu.



Rysunek 1 Stanowisko przygotowane do laminowania próbki panelu PV

Jako powierzchnię roboczą stosujemy szkło. Do tylnej strony tafli szkła należy zamocować dwie płyty grzewcze o wymiarach odpowiadających pojedynczemu ogniwu fotowoltaicznemu. Nasz system grzewczy jest podłączony do dwóch niezależnych sterowników temperatury, co umożliwia precyzyjną kontrolę temperatury każdej z płyt grzewczych oddzielnie.

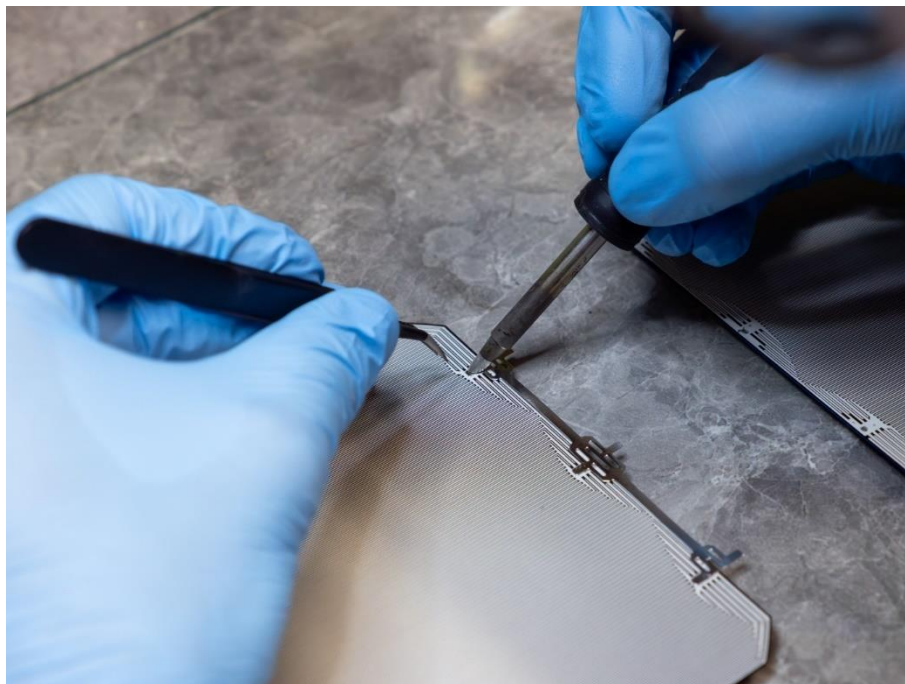
2. System próżniowy

Do uzyskania próżni stosujemy olejową pompę łopatkową EM20, umożliwiającą osiągnięcie podciśnienia rzędu -0,94 Ba.

Aby wyeliminować pęcherzyki powietrza, które negatywnie wpływają na przejrzystość modułu wykorzystujemy również komorę próżniową, w której odgazowujemy żywice przed infuzją.

3. Łączenie ogniw

Dwa ogniwa łączymy za pomocą specjalistycznych konektorów wykonanych z pocynowanej miedzi. Na obu końcach modułu lutujemy metalowe paski umożliwiające wyprowadzenie prądu poza moduł; końcówki przewodów zabezpieczamy taśmą izolacyjną.



Łączenie paneli konektorami

4. Dobór warstw kompozytowych

Nasze badania transmisyjności^{*} wykazały, że najbardziej efektywnym optycznie ułożeniem warstwy przedniej była kombinacja włókna szklanego o gramaturze 50 g/m² oraz maty szklanej 150 g/m², jednak ze względu na wysoką kruchość oraz utrudnienia procesu laminowania ostatecznie zdecydowaliśmy się na zastosowanie maty szklanej o gramaturze 450 g/m².

Warstwę tylną stanowią dwie warstwy włókna szklanego 210 g/m² o splocie typu twill- taka konfiguracja została wybrana, aby sumaryczna gramatura strony przedniej i tylnej była jak najbardziej zbliżona. Jest to ważne, aby uzyskać równomierne tempo przepływu żywicy nad i pod panelami, a co za tym idzie lepsze zalaminowanie modułu.

Jako żywicę stosujemy żywice epoksydową LG 700 z utwardzaczem HG 700 w stosunku wagowym 100:30.

5. Przygotowanie materiałów

Przed rozpoczęciem procesu laminacji potrzebujemy:

- Wyciąć odpowiednie kształty z używanych włókien oraz warstwy delaminażu (Compoflex® SB 150),
- Przygotować rurki próżniowe, rurki spiralne oraz worek próżniowy,
- Przygotować paski butylowe służące do przyklejenia worka próżniowego.

Warto również wygrzać włókno szklane w piecu w celu jego wysuszenia. Wilgoć w włóknie wpływa na jakość laminatu.

6. Układanie warstw

Warstwy układamy w następującej kolejności:

1. Włókno szklane 50 g/m²
2. Mata szklana 450 g/m²
3. Przygotowany wcześniej moduł PV
4. Dwie warstwy włókna szklanego 210 g/m²
5. Warstwa delaminażu

Rurki próżniowe obklejamy butylem i przyklejamy do warstwy uszczelniającej z dwóch stron modułu. Jedną z nich podłączamy do pompy próżniowej, natomiast drugą pozostawiamy otwartą – do późniejszego doprowadzenia żywicy. Obie rurki zostały tymczasowo zatkane.

Za pomocą przygotowanych wcześniej pasków butylu przyklejamy worek próżniowy na ułożone włókna. Po wypompowaniu powietrza za pomocą pompy próżniowej czekamy 20 minut, aby sprawdzić jego szczelność. Jeżeli przez ten czas worek utrzymał podciśnienie uznajemy go za szczelny i przechodzimy do przygotowania żywicy.

7. Przygotowanie żywicy

Żywicę LG 700 mieszamy z utwardzaczem HG 700 w proporcji wagowej 100:30. Następnie mieszaninę odgazowujemy w komorze próżniowej aż do całkowitego usunięcia pęcherzyków powietrza.

8. Proces infuzji

1. Włączamy płyty grzewcze, ustawiając temperaturę na 30°C.
2. Otwieramy rurkę ssącą oraz uruchomiono pompę próżniową.
3. Drugą rurkę wkładamy do kubka z odgazowaną żywicą.

4. Proces infuzji trwa do momentu pełnego przesączenia żywicy przez włókna.
5. Po zakończeniu przepływu zamykamy rurkę doprowadzającą oraz ssącą, a następnie wyłączamy pompę i grzałki.

Laminat pozostawiamy na 20 godzin w celu pełnego utwardzenia żywicy.

9. Otwieranie

Po 20 godzinach delikatnie usuwamy worek próżniowy oraz delaminaż. Celki są bardzo delikatne; istnieje ryzyko uszkodzenia ich przy otwieraniu, jeśli nie będziemy tego robić ostrożnie.

ⁱ Wikipedia [https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_electrode_potential_\(data_page\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_electrode_potential_(data_page))

ⁱⁱ 85NT Processing Guidelines- Arlon Electronic materials

ⁱⁱⁱ "Basalt fibers: An environmentally acceptable and sustainable green material for polymer composites"- [Construction and Building Materials](#) Volume 43, 19 July 2024

^{iv} International Journal for Research in Engineering Application & Management (IJREAM) ISSN : 2454-9150 Vol-05, Issue-01, April 2019 "Thermal Expansion Coefficient Of Basalt Fiber Reinforced Polymer Bars"- V. Pavalan, R. Sivagamasundari

^v Informacje zaczerpnięte od producenta materiałów do laminatów kompozytowych – The Native Lab <https://www.thenativelab.com/>

^{vi} Easy Composites Ltd- How Strong is Forged Carbon Fiber? Forged Carbon vs Aluminum vs Markforged vs Onyx (https://youtu.be/eewlYa6IQPg?si=-kRFfvz12gfgB_mq)

^{vii} Department of Mechanical Engineering Wichita State University -"Study of Thermal Expansion in Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites"- Ashraf Ahmed, Behrouz Tavakol, Rony Das, Ronald Joven, Pooneh Roozbehjavan, Bob Minaie

^{viii} ASM Aerospace Specification Metals Inc.- Titanium Ti-6Al-4V (Grade 5), Annealed

^{ix} Advanced General Aviation Transport Experiments (AGATE)- https://www.wichita.edu/industry_and_defense/NIAR/Research/agate.php/#materials

× Elsevier- "Development of low-cost, light weight c-Si photovoltaic modules with potential for applications in VIPV"-Bartłomiej Fligier, Srinath Nalluri, Bernard Moćko, Kazimierz Drabczyk, Grażyna Kulesza-Matlak, Katarzyna Jajczak, Pradeep Padhamnath



Autorzy

Milena Materny
Tomasz Gawlas

Zdjęcia

Maciek Lubiński