

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY

KIERUNEK: Mechanika i Budowa Maszyn

SPECJALNOŚĆ: Inżynieria Materiałów Konstrukcyjnych

PRACA DYPLOMOWA

MAGISTERSKA

Badania wytrzymałościowe połączenia stopu
aluminium z kompozytem na osnowie PE

Testing the strength of the connection of the
aluminium with PE matrix composite

AUTOR:

Kateryna Dlugunovych

PROMOTOR:

dr Oliwia Trzaska

KONSULTANT:

dr Wojciech Błazejewski

OCENA PRACY:

SPIS TREŚCI

1. Wstęp teoretyczny	2
1.1. Streszczenie	2
1.2. Cel i zakres pracy	2
1.3. Klasyfikacja materiałów kompozytowych	2
1.4. Polimerowe kompozyty wzmacniane włóknami	3
1.4.1. Osnowy polimerowe materiałów kompozytowych, osnowy termoplastyczne	4
1.4.2. Wzmocnienia materiałów kompozytowych	7
1.4.3. Technologie wytwórcze	9
1.5. Zastosowanie materiałów kompozytowych	10
1.6. Połączenie metal kompozyt	10
1.6.1. Wytwarzanie FML	11
1.6.2. Fizyka połączenia	11
2. Opracowanie konstrukcji stanowiska badawczego	12
2.1. Założenia konstrukcyjne	12
2.2. Przyjęte rozwiązania	12
3. Wykonanie konstrukcji stanowiska badawczego	13
3.1. Proces powstawania stanowiska	13
3.2. Próby ruchowe - podsumowanie	13
4. Metodyka badań	14
4.1. Wykonanie próbek	14
4.2. Parametry zmienne	14
4.3. Badania wytrzymałościowe	14
4.3.1. Badania wytrzymałości na zginanie	14
4.3.2. Badania wytrzymałości na skręcanie, rozciąganie	14
4.3.3. Badania zgładów mikroskopowych	14
5. Opracowanie wyników badań	17
6. Podsumowanie i wnioski	18
Bibliografia	19

1. WSTĘP TEORETYCZNY

1.1. STRESZCZENIE

1.2. CEL I ZAKRES PRACY

Celem pracy jest zbadanie możliwości połączenia stopu aluminium z materiałem na osnowie PE.

Zakres pracy obejmuje zbudowanie stanowiska, przygotowanie próbek, przeprowadzenie badań wytrzymałościowych oraz analizę wyników.

1.3. KLASYFIKACJA MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH

Kompozyt zgodnie z definicją to materiał, składający się z dwóch lub więcej składników o różniących się właściwościach fizycznych lub chemicznych, które po połączeniu stwarzają materiał o właściwościach odmiennych od podstawowych składników.

Materiały kompozytowe mogą być używane ze względu na niekonwencjonalne kombinacje wytrzymałości, sztywności, ciężaru właściwego, własności w podwyższonych temperaturach, odporności na korozję, twardości lub przewodności.

Uogólniając powyższe, materiały kompozytowe składają się z dwóch faz: ciągłej, nadającej kształt i wygląd, oraz rozproszonej, wnoszącej określone właściwości kompozytu.

Ze względu na typ matrycy(fazy ciągłej), można podzielić kompozyty na trzy rodzaje:

- metalowe
- ceramiczne
- polimerowe

Najczęściej kompozyty o osnowie metalowej (MMC) występują z wzmocnieniem ceramicznym (cermetale), ale mogą również być wmacniane metalami lub stopami odmiennymi od osnowy, jak i zwykłymi włóknami (szklane, węglowe, aramidowe, i t.p.). MMC są często stosowane w branży motoryzacyjnej oraz lotniczej ze względu na ulepszone właściwości mechaniczne podczas pracy w wysokich temperaturach[7]. Przykładem może być wykorzystanie aluminium częściowo wzmocnionego włóknami Al_2O_3 . Porównywalne właściwości danego węzła konstrukcyjnego można uzyskać używając tłoków zrobionych z żelaza(podwyższona masa) lub sproszkowanego aluminium powder metallurgical aluminium alloys (droga technologia).

Kompozyty o osnowie ceramicznej znacząco się różnią od konwencjonalnych materiałów kompozytowych. Materiały ceramiczne charakteryzują się wysoką twardością, od-

pornością na wysoką temperaturę, korozję oraz oddziaływania chemiczne. Zazwyczaj w kompozytach większe obciążenie powinno przenosić włókno wzmacniające. W przypadku kompozytów o osnowie ceramicznej wzmocnienie powinno pomóc zachować odporność na wysokie temperatury i wpływ otoczenia, oraz zapewnić wytrzymałość materiału (skompensować wysoką kruchość ceramiki).



Rys. 1.1. Tłok z wykorzystaniem MMC//Partial short fiber reinforced light metal diesel pistons

Kompozyty o osnowie polimerowej zostaną dokładnie opisane w następnym podrozdziale.

Ze względu na strukturę wzmocnienia (fazy rozproszonej), rozróżnia się dwa podstawowe rodzaje kompozytów:

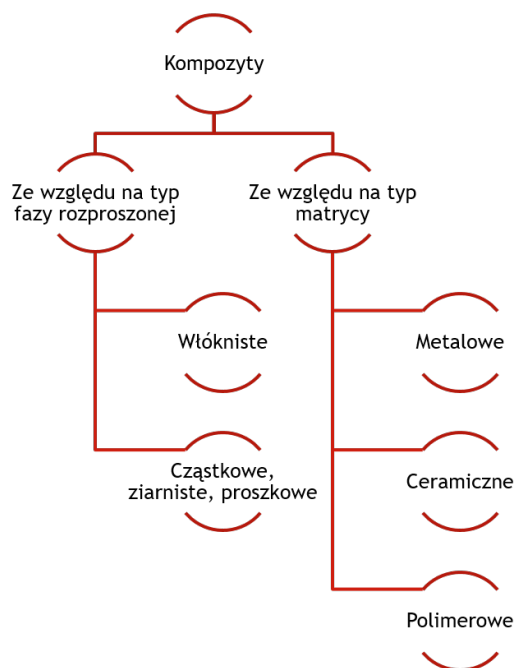
- kompozyty włókniste
- kompozyty cząstkowe, ziarniste, proszkowe

Wzmocnienie jest uważane za włókniste, gdy wymiary wzdłużne cząstek są znacznie większe od wymiarów poprzecznych. W przypadku wzmocnienia cząstkowego wszystkie trzy wymiary cząstki są zbliżonej wielkości.

Istotnym czynnikiem wpływającym na właściwości wytrzymałościowe kompozytów jest kształt cząstek fazy rozproszonej, a w przypadku cząstek włóknistych ich współczynnik kształtu (stosunek długości do średnicy). Im on jest większy tym lepsze są właściwości mechaniczne kompozytu (lepsze przenoszenie naprężeń z fazy wiążącej na włókna). [9]

1.4. POLIMEROWE KOMPOZYTY WZMACNIANE WŁÓKNAMI

Z punktu widzenia właściwości oraz obszaru zastosowań można podzielić kompozyty polimerowe na dwie grupy:



Rys. 1.2. Klasyfikacja materiałów kompozytowych

- kompozyty funkcjonalne
- kompozyty konstrukcyjne

Kompozyty funkcjonalne posiadają specyficzne właściwości, które powodują że takie materiały mają wąski, ściśle określony obszar zastosowań. Przykładem mogą być kompozyty elektryczne, magnetyczne, optyczne, ślizgowe, przeciwoogniowe, barierowe, itp [9].

Kompozyty konstrukcyjne są materiałami o dobrych właściwościach mechanicznych oraz małym ciężarze właściwym. Dzięki opisanym wyżej właściwościom są szeroko stosowane w elementach konstrukcyjnych maszyn, konstrukcjach budowlanych oraz przedmiotach codziennego użytku.

Składnikami polimerowych kompozytów konstrukcyjnych są:

- polimery stanowiące fazę ciągłą
- faza rozproszona (cząsteczki, włókna)
- dodatki uzupełniające
- materiały dodatkowe do konstrukcji przekładkowych

1.4.1. Osnowy polimerowe materiałów kompozytowych, osnowy termoplastyczne

Szerokie zastosowanie jako osnowy konstrukcyjnych materiałów kompozytowych mają polimery termoutwardzalne, takie jak nienasycone żywice poliestrowe i winyloestrowe, a także fenolowo-formaldehydowe żywice rezolowe, poliimidy, silikon y oraz sieciowane poliuretany[9].

Żywica poliestrowa stosowana jako osnowa w kompozytach jest roztworem oligoestru nienasyconego w styrenie (ok. 30-40 %). Utwardzanie żywic poliestrowych odbywa się po-

przez kopolimeryzację oligoestru z styrenem przy udziale podwójnych wiązań obu składników. Cząsteczki styrenu wbudowują się pomiędzy łańcuchy oligoestru, wskutek tego powstaje sieć przestrzenna. Od gęstości sieci zależą właściwości mechaniczne uzyskanego materiału (moduł E, twardość, wydłużenie przy zerwaniu, ugięcie cieplne). Kopolimeryzacja odbywa się pod wpływem inicjatorów wolnorodnikowych (utwardzaczy). Dane związki, pod wpływem wysokiej temperatury lub przyspieszaczy, rozpadając tworzą wolne rodniki, umożliwiające kopolimeryzację.

W procesie wytwarzania kompozytów z żywic poliestrowych używane są dwa sposoby utwardzenia: na gorąco (ok. $160C^{\circ}$) i na zimno (w temperaturze pokojowej, powyżej $15C^{\circ}$). Przy utwardzaniu na gorąco stosuje się odpowiednie prasy z ogrzewanymi formami z dedykowanym inicjatorem nadtlenkowym (np. nadbenzoesan III-rzędowego butylu). W formowaniu wyrobów kompozytowych na zimno stosuje się zespół utwardzaczy - inicjator wodoronadtlenkowy z przyspieszaczem (sole kobaltu lub inne aminy), umożliwiającym utwardzanie wyrobu w temperaturze pokojowej. Dużą zaletą żywic poliestrowych jest łatwość w stosowaniu, niska cena, łatwa przesycalność włókien oraz uniwersalność. Wadami są właściwości mechaniczne, duża emisja styrenu, palność, skurcz przy utwardzaniu oraz mała odporność korozyjna.

Żywice winyloestrowe charakteryzują się strukturą chemiczną, u której w oligomerycznym łańcuchu znajduje się fragment żywicy epoksydowej, a na końcach są umieszczone grupy estrowe i grupy winylowe zawierające wiązania podwójne. Dane żywice mają lepsze właściwości mechaniczne, cieplne i większą odporność chemiczną niż żywice poliestrowe. Z drugiej strony, cechują się dużą zawartością styrenu, bardzo dużym skurczem przy utwardzaniu oraz wyższą ceną.

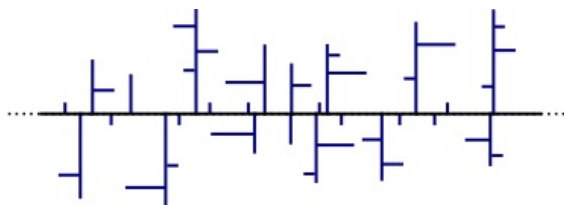
Żywice epoksydowe mają zróżnicowaną budowę chemiczną, ale do zastosowań kompozytowych używane są żywice bisfenolowe o różnym ciężarze cząsteczkowym. Liczba hydroksylowa opisuje zawartość grup hydroksylowych, wraz z jej wzrostem rośnie ciężar cząsteczkowy, lepkość i temperatura mięknienia, liczba epoksydowa wówczas maleje. Utwardzanie kompozytów na podstawie żywic epoksydowych w temperaturze pokojowej odbywa się za pomocą utwardzaczy w postaci amin pierwszorzędowych różnego rodzaju. W temperaturach powyżej $100C^{\circ}$ stosowane są związki typu kwasów Lewisa lub amin typu aromatycznego. Zaletami danych żywic są bardzo dobre właściwości mechaniczne, termiczne i antykorozyjne, mały skurcz przy utwardzaniu i dobra adhezja do włókien wzmacniających. Wady to wysoka cena, duża lepkość, toksyczne utwardzacze oraz dodatkowe koszty stosowania modyfikatorów.

Tabela 1.1. Właściwości utwardzonych żywic

Właściwości	Żywice		
	poliestrowe	winyloestrowe	epoksydowe
Gęstość, [$\frac{g}{cm^3}$]	1,23	1,04	1,14
Wytrzymałość na rozciąganie, [MPa]	70	85	75
Moduł sprężystości E, [GPa]	3,8	3,3	3
Wydłużenie przy zerwaniu ε_m , [%]	2,3	5	5
Współczynnik rozszerzalności cieplnej, [$\frac{10^{-6}}{C^\circ}$]	160-80	60	120-80

Polimery termoplastyczne stosowane w materiałach kompozytowych to poliolefiny, poliamidy, polichlorek winylu, poliwęglany, termopolimery ABS oraz poliestry nasycone (PET, PBT)[9].

Najważniejsze poliolefiny w przemyśle kompozytowym to polietylen i polipropylen. Polietylen jest pochodną etylenu otrzymywaną za pomocą polimeryzacji metodą wysoko- lub niskociśnieniową. Metodą wysokociśnieniową otrzymuje się polietylen o niskiej gęstości - LDPE (Low Density Polyethylene), posiadający silnie rozgałęziony łańcuch (8-40 rozgałęzionych łańcuchów na 1000 członów łańcucha podstawowego). Za pomocą metody niskociśnieniowej wytwarza się polietylen o wysokiej gęstości - HDPE (High Density Polyethylene), z mało rozgałęzionym łańcuchem (ok. 5 łańcuchów bocznych na 1000 członów).

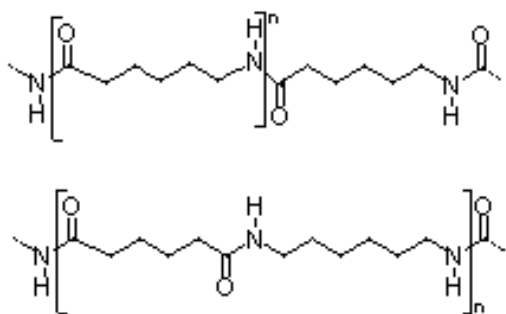


Rys. 1.3. Schemat struktury LDPE[2]



Rys. 1.4. Schemat struktury HDPE[2]

Nazwą poliamidy określa się częściowo krystaliczne łańcuchowe termoplasty. Metoda wytwarzania to polikondensacja kwasów dikarboksylowych oraz amin, lub polimeryzacja laktamów kwasów aminokarboksylowych. Poliamidy PA6 i PA66 stosowane są w postaci kompozytowych granulatów wzmocnionych włóknem szklanym. Temperatury wtrysku wynoszą od 230 do 320 C° , skurcz formowniczy wynosi ok. 2 % objętości.



Rys. 1.5. Schemat struktury PA6(powyżej) i PA66(poniżej)[1]

Poliestry termoplastyczne - PET(politereftalan etylenu) i PBT(politereftalan butylenu) - w odróżnieniu od poliestrów nienasyconych, będących oligomerami, są nasyconymi łańcuchowymi wielkocząsteczkowymi polimerami termoplastycznymi. Stopień krystaliczności wyrobów z PET i PBT jest regulowany za pomocą parametrów termicznych przetworstwa. Z danych materiałów wytwarzane są granulaty wzmocnione szklanym włóknem ciętym oraz płyty z tkaninami, matami lub włókninami szklanymi.

Tabela 1.2. Orientacyjne właściwości polimerów termoplastycznych

Właściwości	Polietyleny		Poliamidy		Poliestry termoplastyczne	
	LDPE	HDPE	PA6	PA66	PET	PBT
Gęstość [g/cm ³]	0,915-0,920	0,94-0,96	1,12	1,13-1,16	1,33-1,40	1,30-1,32
Moduł E przy rozciąganiu [MPa]	200-400	600-1400	1200	1500	-	-
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	-	-	64	63	-	-
Napężenie na granicy plastyczności [MPa]	8-10	18-30	-	-	55-80	50-60
Temperatura topnienia [C°]	105-118	126-135	220-225	225-260	250-260	220-225
Współczynnik rozszerzalności liniowej [$\frac{10^{-3}}{C^{\circ}}$]	160-80	60	-	-	-	-
Temperatura ugięcia HDT/A cieplnego 1,8 MPa, C°	30-37	38-50	80	66-85	60-75	50-65

1.4.2. Wzmocnienia materiałów kompozytowych

Wzmocnienia materiałów kompozytowych zmieniają właściwości fizyczne osnowy, hamują propagację pęknięć, nadają specyficzne właściwości(ślizgowe, przewodzące, antyelektrostatyczne, zmniejszające palność, itp.), oraz wpływają na wygląd wyrobu. Ze względu na kształt fazy rozproszonej wyróżnia się napełniacze ziarniste, whiskery, krótkie włókna, długie włókna oraz tkaniny.

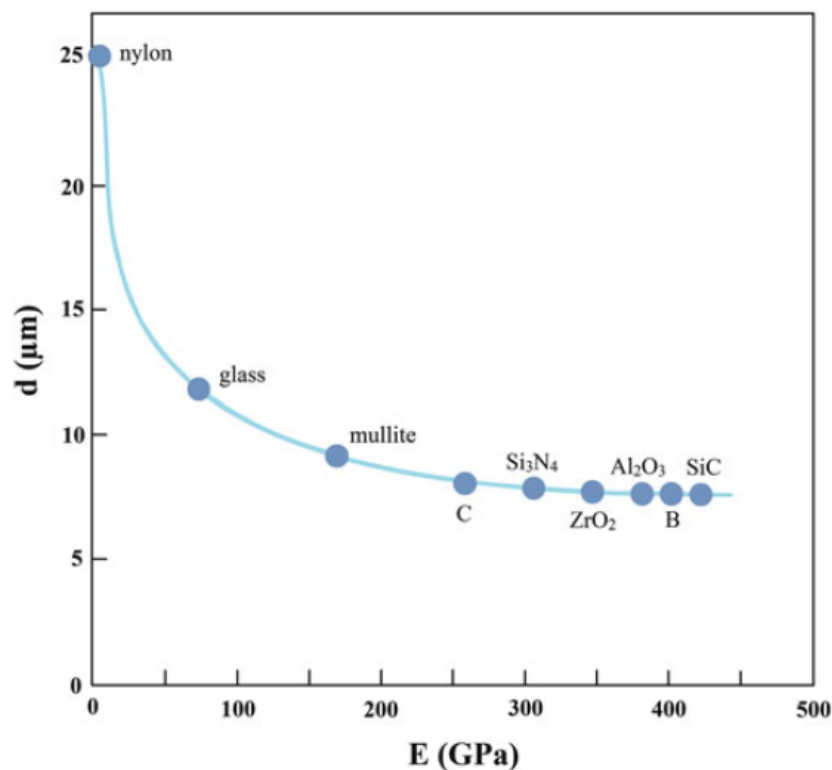
Napełniacze ziarniste mogą być mieć różne pochodzenie: naturalne, syntetyczne, mineralne lub organiczne. Często stosowane napełniacze to różne rodzaje sadz, grafit, proszki i płatki metali. Właściwości układów kompozytów polimerowych z napełniaczami zależą od ich ilości, właściwości, stopnia rozdrobnienia, wzajemnej adhezji oraz zwilżalności.

Najczęściej używane w kompozytach są wzmocnienia w formie włóknistej ze względu na następujące czynniki[11]:

- Mała średnica w stosunku do jednostki mikrostrukturalnej. Ze względu na efekt rozmiaru (z ang. size effect), prawdopodobieństwo wystąpienia niedoskonałości jest mniej-

sze w materiale o mniejszych wymiarach, więc zakłada się że ma wyższą wytrzymałość.

- Wysoki współczynnik kształtu (stosunek długości włókna do jego średnicy - $\frac{l}{d}$), który umożliwia transfer dużej części obciążenia przez osnowę do wytrzymałego włókna.
- Duża podatność (elastyczność). Dla włókna (długa cienka belka), podatność jest odwrotnie proporcjonalna do sztywności oraz średnicy[5]. Dzięki temu, dla odpowiednio małych średnic można uzyskać elastyczne włókna z kruchych materiałów, takich jak szkło, węgiel, kwarc, itp.



Rys. 1.6. Średnicy włókien różnych materiałów o podatności włókna PA66 o średnicy 25 μm) [5]

Ze względu na materiał używane są następujące rodzaje włókien:

- szklane
- aramidowe
- bazaltowe
- kwarcowe
- węglowe i grafitowe
- polimerowe
- inne

Włókna szklane to nazwa ogólna włókien na bazie tlenku krzemu (50-60%) i zawierające

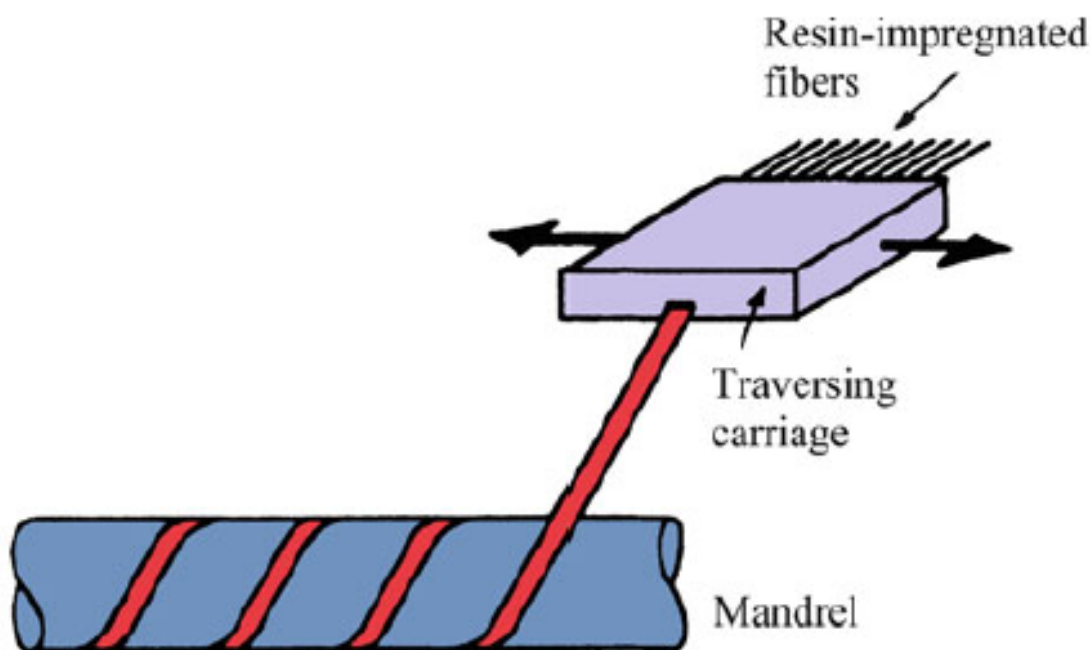
1.4.3. Technologie wytwórcze

Metody wytwarzania wyrobów kompozytowych z użyciem polimerów termoplastycznych są następujące:

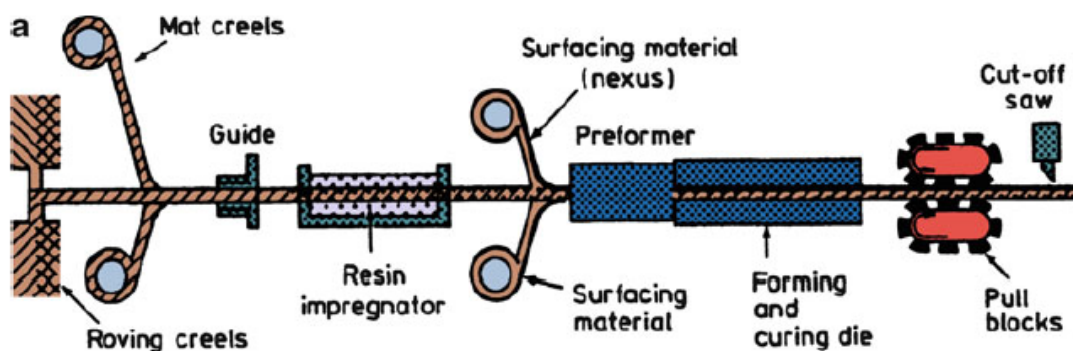
- formowania metodą wtrysku granulatów wzmocnionych
- wytwarzanie płyt z termoplastów wzmocnionych matą, włókniną lub tkaniną
- formowanie prefabrykatów płaskich metodą próżniową lub ciśnieniową z workiem
- formowanie ciśnieniowe w prasach
- formowanie profili metodą ciągłą pultruzji
- formowanie metodami nawijania i AFP
- metody R-RIM i S-RIM
- formowanie wyrobów sposobem ciśnieniowym "na zimno"

Do metody formowania wtryskowego niezbędne jest odpowiednie przygotowanie granulatu - mieszanki polimeru z włóknem (najczęściej szklanym). Dla produkcji granulatu z włóknem ciętym służy dwuślimakowa wylączarka z segment mieszającym. Tak przygotowany granulatu jest wtryskiwany do formy w wtryskarce ślimakowej. Dla uzyskania wtryskowych termoplastów z długimi włóknami, roving jest impregnowany w głowicy krzyżowej wylączarki lub wprowadzany bezpośrednio w strefę ślimaków wylączarki.

Termoplasty wzmocnione matami szklanymi są produkowane



Rys. 1.7. Metoda nawijania[5]



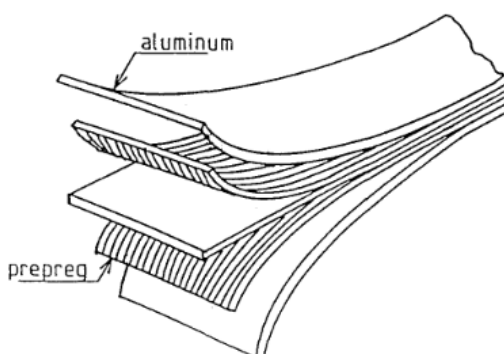
Rys. 1.8. Metoda pultruzji[5]

1.5. ZASTOSOWANIE MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH

1.6. POŁĄCZENIE METAL KOMPOZYT

Laminaty metalowo-włókniste (Fiber Metal Laminates) składają się z kilku cienkich warstw metalu połączonych poprzez warstwy kompozytu. Taki materiał zachowuje się jak zwykła struktura metaliczna, ale łączy w sobie właściwości zarówno metalu, jak i materiału kompozytowego wzmocnianego włóknami. FML charakteryzują się wysoką tolerancją uszkodzeń, wysoką wytrzymałością zmęczeniową, odpornością na uderzenia, odpornością na korozję oraz ognioodpornością[4].

Kompozyty FML zostały opracowane na uniwersytecie technicznym w Delft na początku lat 80., najpierw pod nazwą ARALL (Aramid Reinforced Aluminium Laminates) and then GLARE (GLAss REinforced aluminium). W trakcie rozwoju materiałów o lepszej odporności na pękanie wywnioskowano, że rozrost pęknięć może być ograniczany w warstwowym, połączonym adhezyjnie materiale. Jeśli pęknięcie powstaje w jednej z warstw materiału, pozostałe ograniczają jego rozrost. Dzięki temu, pęknięcia mogą się rozwijać we wszystkich warstwach bez wzajemnej interferencji.



Rys. 1.9. Schemat FML[3]

1.6.1. Wytwarzanie FML

Najbardziej powszechną metodą wytwarzania FML jest technika autoklawowa (wysokie ciśnienie, podciśnienie, podwyższona temperatura).

1.6.2. Fizyka połączenia

2. OPRACOWANIE KONSTRUKCJI STANOWISKA BADAWCZEGO

2.1. ZAŁOŻENIA KONSTRUKCYJNE

2.2. PRZYJĘTE ROZWIĄZANIA

3. WYKONANIE KONSTRUKCJI STANOWISKA BADAWCZEGO

3.1. PROCES POWSTAWANIA STANOWISKA

3.2. PRÓBY RUCHOWE - PODSUMOWANIE

4. METODYKA BADAŃ

4.1. WYKONANIE PRÓBEK

Pierwsze udane próbki zostały wykonane za pomocą wycięcia w środku pręta, do którego została wsypana mieszanka proszku PE oraz ziaren korundu(ok. 15 %). Czas docisku był uwarunkowany stanem materiału - pojawieniem się charakterystycznego ubytku(plastyczna mieszanka pyłu aluminium oraz spoiwa) świadczącego o przejściu PE do stanu płynnego.

4.2. PARAMETRY ZMIENNE

Tabela 4.1. Parametry zmienne w badaniach

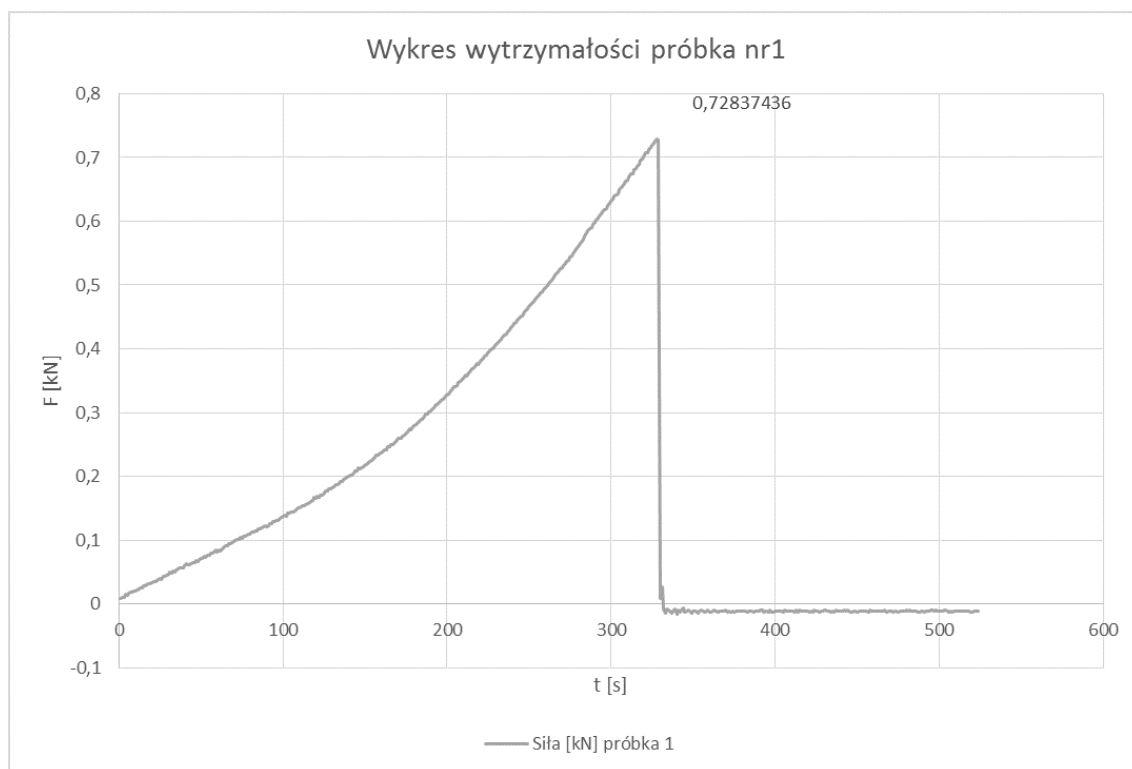
#	Czas docisku [min]	Ilość korundu [%]	Ilość włókna szklanego [%]	Głębokość wycięcia [mm]	Średnica wewnętrzna [mm]	Prędkość obrotowa [obr/min]
1.	1.5	15	0	1	16	710
2.	2	15	0	2	18	710
3.	2	20	0	2	16	710
4.	3	20	0	2	18	710

4.3. BADANIA WYTRZYMAŁOŚCIOWE

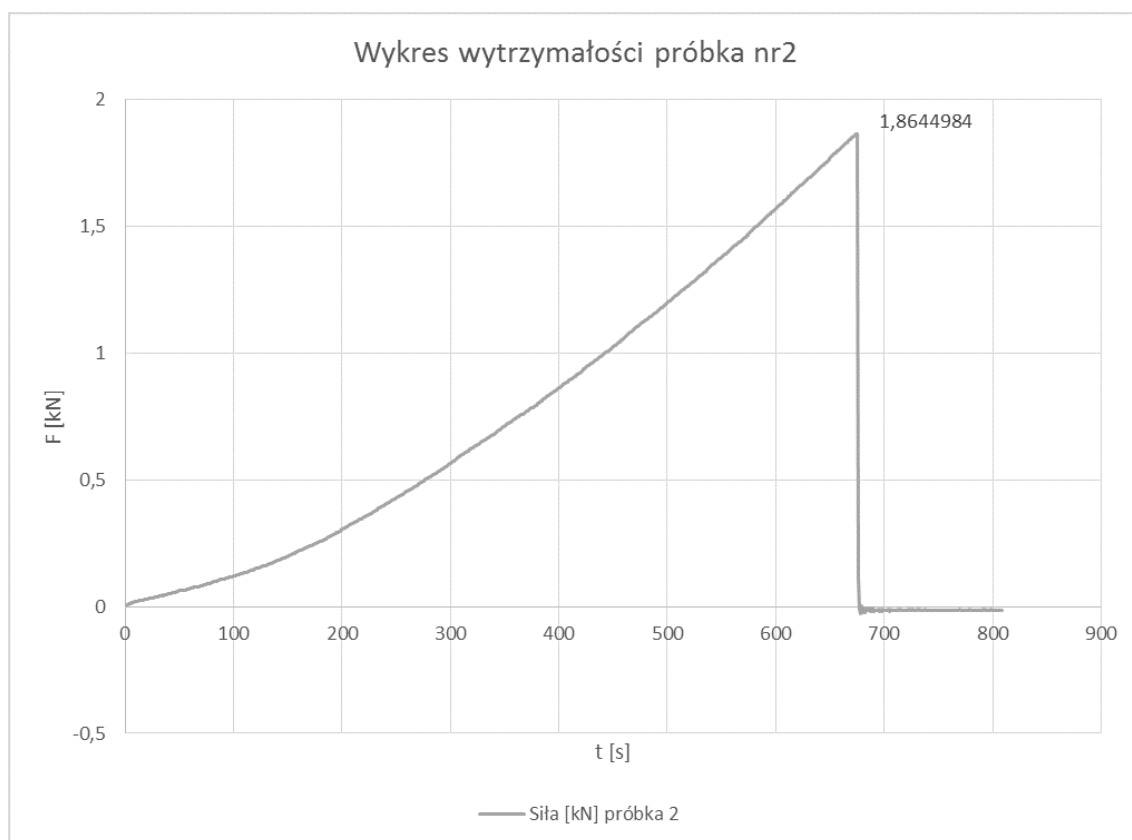
4.3.1. Badania wytrzymałości na zginanie

4.3.2. Badania wytrzymałości na skręcanie, rozciąganie

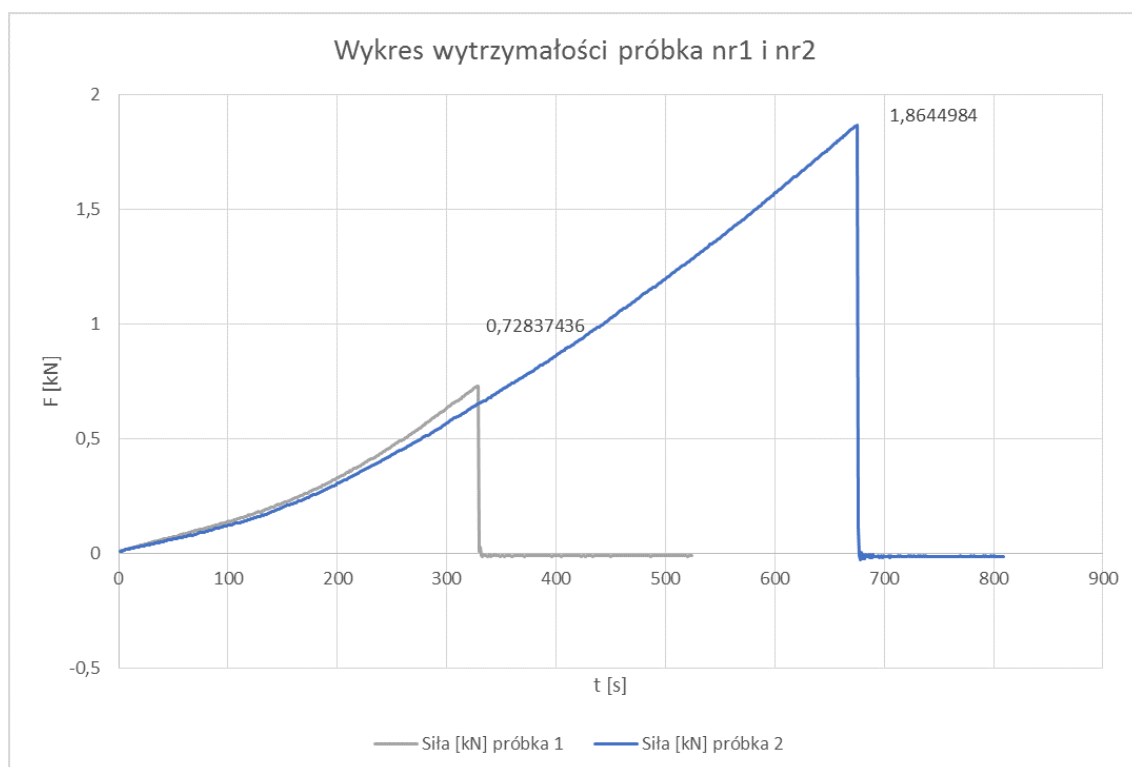
4.3.3. Badania zglądów mikroskopowych



Rys. 4.1. Wykres przebiegu sił w trakcie próby na rozciąganie(próbka 1)



Rys. 4.2. Wykres przebiegu sił w trakcie próby na rozciąganie(próbka 2)



Rys. 4.3. Wykres przebiegu sił w trakcie próby na rozciąganie

5. OPRACOWANIE WYNIKÓW BADAŃ

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

BIBLIOGRAFIA

- [1] https://en.wikipedia.org/wiki/nylon_6. (dostęp 03.05.2017).
- [2] <https://en.wikipedia.org/wiki/polyethylene>. (dostęp 03.05.2017).
- [3] Alta Y.N. Choi A. Asundi. Fiber metal laminates: An advanced material for future aircraft. *Journal of Materials Processing Technology*, 1997.
- [4] Jarosław Bieniaś. Fibre metal laminates - some aspects of manufacturing process, structure and selected properties. *Kompozyty(Composites)*, 2011.
- [5] Krishan K. Chawla. *Composite materials*. Springer New York, 1998.
- [6] Stefan Wojciechowski Jerzy Sobczak. Współczesne tendencje praktycznego zastosowania kompozytów metalowych. *Kompozyty(Composites)*, 2002.
- [7] Karl Ulrich Kainer. *Metal Matrix Composites. Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2006.
- [8] Wacław Królikowski. Nowoczesne konstrukcyjne polimerowe materiały kompozytowe. *Kompozyty(Composites)*, 2002.
- [9] Wacław Królikowski. *Polimerowe kompozyty konstrukcyjne*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2012.
- [10] Roman Pampuch. Kompozyty ceramiczne. *Kompozyty(Composites)*, 2002.
- [11] Dresher W.H. The age of fibers. *Journal of Metals*, April 1969.