

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Katedra Projektowania i Eksploatacji Maszyn

Instrukcja do ćwiczeń laboratoryjnych z przedmiotu:

Podstawy nauki o materiałach

Ćwiczenie **B2-015**

Temat ćwiczenia:

Oznaczanie cech wytrzymałościowych struktur z tworzyw sztucznych wzmocnionych włóknami

Miejsce ćwiczenia: pawilon B2 niski parter sala 015

Prowadzący ćwiczenia: dr hab. inż. Sławomir Zimowski, prof. AGH
mgr inż. Grzegorz Wiązania

Kraków 2021/22

1. Cel, zakres ćwiczenia i wymagania

- Cel:** oznaczenie udarności kształtki wykonanej z kompozytu poliestrowo-szklanego poprzez pomiar energii zużytej na złamanie tej kształtki.
- Zakres:** wykonanie próby udarności, identyfikacja rodzaju uszkodzenia, obliczanie udarności, obliczenie modułu Younga kompozytu równoległe i prostopadle do włókien, raport z ćwiczenia w formie karty pracy.
- Wymagania:** obecność obowiązkowa, zapoznanie się z instrukcją do ćwiczenia, udzielenie odpowiedzi na zadawane pytania w trakcie zajęć, wypełnienie i oddanie karty pracy (str. 9), kalkulator inżynierski.

2. Wprowadzenie

2.1. Zastosowanie i rodzaje prób udarowych

W elementach konstrukcyjnych bardzo często pojawiają się zmienne obciążenia dynamiczne, które charakteryzują się bardzo gwałtownymi zmianami. Mówimy wtedy, że mamy do czynienia z udarnością. Zjawisko to wymaga określenia oddzielnych właściwości materiału. Do określania tych właściwości służy próba udarowa mająca na celu określenie jakości materiału pod wpływem zwiększonej szybkości obciążenia. Stosuje się następujące próby udarowe:

- próba rozciągania
- próba ściskania
- próba skręcania
- próba zginania.

Najczęściej stosowaną w praktyce jest próba zginania wykonywana na próbach z karbem lub bez karbu. Wyniki badań w znacznym stopniu zależą od procesów technologicznych jakim był poddawany półwyrob, ewentualnych defektów strukturalnych (zwłaszcza na granicy osnowa/wzmocnienie), kierunkowości wzmocnienia, a także temperatury badań. Duże znaczenie ma też udział wzmocnienia w całkowitej objętości kompozytu. Wartości udarności uzyskane na próbkach różnego rodzaju kształtu nie są ze sobą porównywalne.

2.2. Definicja udarności

Udarność jest miarą kruchości materiałów określoną przez energię potrzebną do dynamicznego złamania próbki i odnoszoną do wielkości poprzecznego przekroju próbki (kształtki). Udarność a_c wyrażona jest ilorazem energii uderzenia pochłoniętej podczas złamania kształtki i początkowej powierzchni przekroju poprzecznego kształtki. Udarność w zależności od rodzaju kształtki oblicza się wg wzorów:

- udarność kształtek bez karbu
$$a_{cU} = \frac{E_c}{h \cdot b};$$
- udarność kształtek z karbem
$$a_{cN} = \frac{E_c}{h \cdot b_N}$$

gdzie: $E_C [J]$ – skorygowana energia pochłonięta przy złamaniu kształtki, $h [mm]$ – grubość kształtki do badań, $b [mm]$ – szerokość kształtki do badań, $b_N [mm]$ – pozostała szerokość kształtki z karbem do badań.

Udarność wyraża się w $\mathbf{kJ/m^2}$, co liczbowo opowiada w przybliżeniu dawniej używanej jednostce $\mathbf{kGcm/cm^2}$. Ta ostatnia wartość daje lepsze wyobrażenie o udarności jako pracy łamania beleczki odważnikiem o masie 1kg spadającym na beleczkę o przekroju 1 cm^2 z wysokości 1cm. Powszechnie stosowana jest również jednostka $\mathbf{J/cm^2}$.

2.3. Urządzenia do próby udarności

Próby udarności tworzyw sztucznych przeprowadzane są wg metody Charpy'ego [1], Dynstat [2] lub Izoda [3] stosując specjalne urządzenia. Przeważnie udarność oznacza się metodą Charpy'ego na urządzeniach zwanych młotami wahadłowymi.

Zasada metody Charpy'ego polega na tym, że kształtkę do badań w postaci beleczki, podpartą w pobliżu jej końców i ułożoną poziomo, uderza się pojedynczym uderzeniem młota udarowego w środku między podporami i zgina z dużą, nominalnie stałą prędkością. W przypadku krawędziowego uderzania kształtki z karbem [1] (nacięcie – rowek o specjalnym kształcie i wymiarach), linia uderzenia znajduje się dokładnie naprzeciw pojedynczego karbu. Metodę tą wykorzystuje się do badania zachowania się określonych typów kształtek w określonych warunkach oznaczania udarności, do określenia oceny kruchości lub ciągliwości kształtek, z uwzględnieniem ograniczeń związanych z warunkami badań, a także do oznaczania danych porównywalnych podobnych rodzajów materiałów. Metodę Charpy'ego w odniesieniu do tworzyw sztucznych stosuje się do badania następujących rodzajów materiałów:

- sztywnych tworzyw termoplastycznych, przeznaczonych do formowania i wytłaczania, w tym również kompozycji napełnionych i wzmocnionych, a także nienapełnionych rodzajów tworzyw sztucznych, sztywnych płyt z tworzyw termoplastycznych;
- sztywnych tworzyw termoutwardzalnych przeznaczonych do formowania, w tym również kompozycji napełnionych i wzmocnionych, sztywnych płyt z tworzyw termoutwardzalnych, w tym także laminatów;
- termoutwardzalnych i termoplastycznych kompozytów wzmocnionych włóknami, w tym także wzmocnieniami zorientowanymi jednokierunkowo lub bez orientacji jednokierunkowej takimi jak: maty, tkaniny, tkaniny rowingowe, cięte włókna, wzmocnienia złożone i hybrydowe, włókna rowingowe i rozdrobnione, płyt wykonanych ze wstępnie impregnowanych materiałów (prepregów), a także kompozycji napełnionych i wzmocnionych;
- termotropowych polimerów ciekłokrystalicznych.

Metoda Charpy'ego, w porównaniu do metody Izoda jest bardziej odpowiednia do badania materiałów charakteryzujących się międzywarstwowym przełomem poślizgowym lub materiałów wykazujących efekty powierzchniowe spowodowane czynnikami środowiskowymi. Schemat działania młota wahadłowego Charpy'ego przedstawia rysunek 2.1.

Młot z położenia **1** o wysokości h , opada do położenia wyjściowego **0** osiągając maksymalną prędkość:

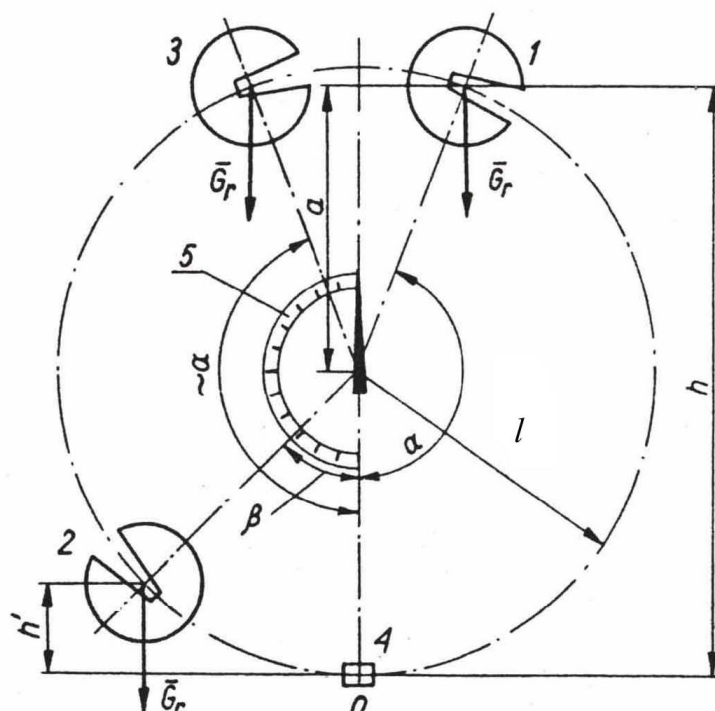
$$v = \sqrt{2gh} \quad (1)$$

gdzie: $g=9,81\text{m/s}^2$ - przyspieszenie ziemskie.

Po zniszczeniu próbki młot wznosi się na wysokość h' w położenie **2**. Młot puszczone luzem z położenia **1** osiągnie położenie **3**. Uwzględniając to, że straty spowodowane tarcie w młocie nie mogą przekraczać 1%, można przyjąć $\alpha \approx \alpha_0$, a wobec tego również $h \approx h_0$. W związku z powyższym energia potencjalna młota w położeniu **3** lub **1** wynosi:

$$L_1 = G_r h \quad (2)$$

gdzie: G_r - ciężar młota zredukowany do środka uderzenia.



Rys. 2.1. Schemat działania młota wahadłowego Charpy'ego

0 - położenie wyjściowe młota o minimalnej energii potencjalnej, 1 - położenie młota (początkowe) o maksymalnej energii potencjalnej, 2 - maksymalne wychylenie młota po zniszczeniu próbki, 3 - wychylenie młota przy biegu jałowym, 4 - próbka (kształtka), 5 - podziałka.

Energia potencjalna młota po złamaniu próbki, w położeniu 2 wynosi:

$$L_2 = G_r h' \quad (3)$$

Zatem energia zużyta na zniszczenie próbki wynosi:

$$L_u = L_1 - L_2 = G_r (h - h') \quad (4)$$

Z rysunku 4 wynika:

$$h = l + a = l + l \cos(180^\circ - \alpha) = l(1 - \cos \alpha) \quad (5)$$

$$h' = l(1 - \cos \beta) \quad (6)$$

gdzie: l - długość wahadła fizycznego.

Po wstawieniu wzorów (5) i (6) do (4) otrzymujemy:

$$L_u = G_r l (\cos \beta - \cos \alpha) \quad (7)$$

Maksymalną prędkość młota obliczyć można wstawiając do zależności (1) wzór (5):

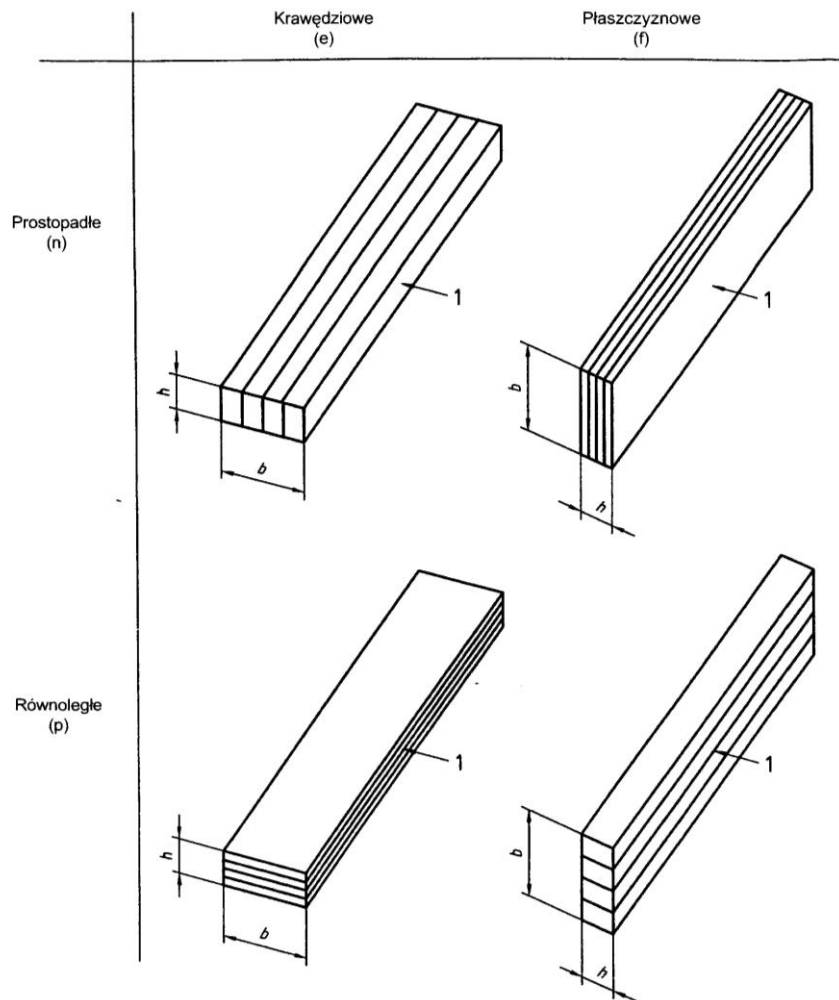
$$v_{\max} = \sqrt{2gl(1 - \cos \alpha)} \quad (8)$$

Próbie udarności przeprowadza się tak, aby: uderzenie młota było środkowe, jeżeli oznaczane są kształtki z karbem oś karbu musi leżeć w płaszczyźnie ruchu młota, a karb należy skierować do podpór. Do przeprowadzenia prób używa się młotów wahadłowych o energii od 100 do 300Nm, przy czym prędkość w chwili uderzenia powinna wynosić 4÷7m/s, a dopuszczalne straty wywołane tarciami do 1%.

2.4. Kierunki uderzenia kształtek – anizotropia

Kierunek uderzenia kształtki (próbki) jest związany ze sposobem jej ułożenia na podporze młota. Ponieważ kształtki do badań mają postać beleczek o przekroju prostokątnym i są anizotropowe istotnym ze względu na wytrzymałość jest ich orientacja w stosunku do kierunku uderzenia. Niektóre rodzaje materiałów w postaci płyt, arkuszy lub prętów o przekroju innym niż kołowy mogą wykazywać różne wartości udarności w zależności od kierunku płaszczyzny płyty, arkusza lub pręta. W takich przypadkach zwyczajowo przyjęte jest wycinanie serii kształtek w kierunkach odpowiadających ich głównym osiom [4], odpowiednio, równoległe lub prostopadłe do charakterystycznego kierunku płaszczyzny arkusza, płyty lub pręta, który jest widoczny lub może być ustalony na podstawie znajomości metody wytwarzania.

W metodzie Charpy'ego dla tworzyw sztucznych wyróżniamy zasadniczo dwa kierunki uderzenia: krawędziowe (dla kształtki z pojedynczym karbem) i płaszczyznowe (dla kształtki bez karbu). Ponadto badając udarność laminatów i innych tworzyw z napełniaczami o zorientowanym ułożeniu np. długie włókna stosuje się uderzenie płaszczyznowe-prostopadłe (fn) oraz krawędziowe-równoległe (ep) (rys. 2.1).



Objaśnienia

1 Kierunek uderzenia

Oznaczenia: krawędziowe (e) i płaszczyznowe (f) wskazują kierunek uderzenia w odniesieniu do grubości kształtki h i szerokości kształtki b . Oznaczenia: prostopadłe (n) i równoległe (p) wskazują kierunek uderzenia w odniesieniu do płaszczyzny laminatu.

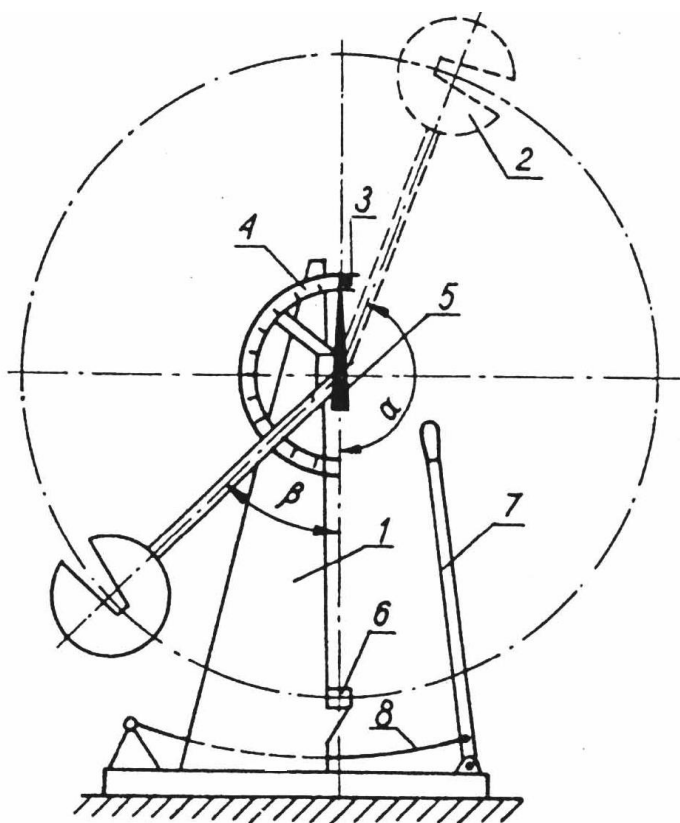
Badania udarności metodą Charpy'ego "fn" oraz "ep" stosuje się do laminatów, natomiast badanie udarności metodą Charpy'ego oznaczone jako "e" stosuje się do wszystkich innych materiałów. Badanie udarności metodą Charpy'ego oznaczone jako "f" stosuje się do materiałów wykazujących efekty powierzchniowe.

Rys. 2.1. Schemat oznaczeń przedstawiających kierunki uderzenia [1]

3. Opis stanowiska badawczego

Młot 2 jest zamocowany wahliwie na podstawie 1 (rys. 3.1). Na osi obrotowej, połączonej sztywno z wahadłem, znajduje się wskazówka 5, która z pewnym oporem może obracać się wokół osi. Po zamocowaniu wahadła w górnym, początkowym położeniu, przy wychyleniu o kącie α wskazówkę 5, powinno się dosunąć do ogranicznika 3. Po zwolnieniu zaczepu młot opada na próbkę 6, po czym wychyla się o kąt β .

W czasie ruchu wahadła wskazówka, opierając się o ogranicznik 3 i nie mając możliwości obracania się wraz z osią wahadła, zostaje przesunięta w położenie $180^\circ - \beta$ względem wahadła. Po zatrzymaniu wahadła za pomocą hamulca 7, 8 i ustaleniu się w położeniu 5 pionowym odczytuje się wartość kąta β na podziałce 4. Znając charakterystykę młota i jego energię oraz kąt β , obliczyć można dla różnych wartości kąta β pracę L_u ze wzoru (7).



Rys. 3.1. Schemat młota wahadłowego Charpy'ego

1 - podstawa, 2 - młot, 3 - ogranicznik – zapadka, 4 - podziałka, 5 - wskazówka, 6 – próbka (kształtka), 7 - dźwignia hamulca, 8 - pas hamulca młota

4. Kształtki do badań

Kształtki powinny być przygotowane zgodnie z odpowiednimi specyfikacjami dotyczącymi tworzyw. Jeżeli nie ma takich specyfikacji, kształtki należy bezpośrednio formować metodą prasowania, wtryskiwania lub obrabiać mechanicznie z płyt, które zostały przygotowane z kompozycji metodą prasowania lub wtryskiwania.

4.1. Typy i wymiary kształtek

Kształtki mają postać prostopadłościanów o grubości h , szerokości b i długości l . Typ i wymiary kształtek (tabl. 4.1) są zależne od rodzaju materiału poddawanego testom dla:

- materiałów nie wykazujących międzywarstwowego przełomu poślizgowego należy stosować **kształtki z karbem** typu 1 o wymiarach $b \times h \times l = 10 \times 4 \times 80$ [mm] (karb powinien być umiejscowiony na środku kształtki do badań),
- materiałów wykazujących międzywarstwowego pękanie poślizgowe (np. materiały wzmocnione długim włóknem) należy stosować **kształtki bez karbu** typu 2 lub 3, wymiary kształtki nie są ściśle określone – jedynym istotnym parametrem jest stosunek wielkości rozstawu podpór do wymiaru kształtki w kierunku uderzenia. Jeżeli kształtki są wycinane z płyty lub wyrobu do wymiaru 10,2mm, to wówczas wymiar h powinien być równy grubości arkusza lub wyrobu.

Tabl. 4.1. Typ kształtek, wymiary i rozstaw podpór [1]

Wymiary w milimetrach				
Typ kształtki	Długość ^a l	Szerokość ^a b	Grubość ^a h	Rozstaw podpór L
1	80 ± 2	$10,0 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,2$	$62^{+0,5}_{-0,0}$
2 ^b 3 ^b	$25h$ $11h$ lub $13h$	10 lub 15 ^c	3 ^d	$20h$ $6h$ lub $8h$
^a Wymiary kształtek (grubość h , szerokość b i długość l) określane są zgodnie z $h \leq b < l$. ^b Kształtki typu 2 i 3 powinny być stosowane tylko do materiałów opisanych w 6.3.2. ^c 10 mm w przypadku materiałów wzmocnionych o drobnoziarnistej strukturze, 15 mm w przypadku materiałów o gruboziarnistej strukturze punktowej (patrz 6.3.2.2). ^d Zalecana grubość. Jeżeli kształtki są wycinane z płyty lub wyrobu do wymiaru 10,2 mm (patrz 6.3.1.2), to wówczas wymiar h powinien być równy grubości arkusza lub wyrobu.				

6.3.2 – patrz 4.1. b

6.3.2.2. – badanie w kierunku uderzenia „płaszczyznowego prostopadłego”: dla materiałów wzmocnionych o strukturze rozdrobionej (cienkie tkaniny i włókna o zorientowaniu równoległym) szerokość kształtki powinna wynosić 10mm, a 15mm w przypadku materiałów wzmocnionych o gruboziarnistej strukturze punktowej (tkaniny rowingowe) lub strukturze nieregularnej.

6.3.1.2. – materiały w postaci płyt. Kształtki z materiałów grubszych niż 10,2mm należy obrócić do grubości $10\text{mm} \pm 0,2\text{mm}$.

Kształtki typu 1 można również wycinać z uniwersalnych kształtek do badań typu A zgodnie z ISO 3167. Przy wycinaniu odcinków próbnych na próbki należy unikać miejscowego nagrzewania lub rozwarstwienia, które mogłyby zmienić własności mechaniczne. Odcinki próbne wycina się stosując odpowiednie narzędzia do obróbki skrawaniem. Liczbę próbek i sposób ich pobierania ustalają normy przedmiotowe lub warunki techniczne. Jako obróbkę końcową zaleca się szlifowanie.







4.2. Rodzaje uszkodzeń

W przypadku kompozycji do formowania lub wytłaczania mogą występować cztery rodzaje uszkodzeń oznaczone następującym kodem literowym:

- C złamanie całkowite,
- H złamanie zawiasowe,
- P złamanie częściowe,
- N brak złamania.

W przypadku materiałów wzmacnianych np. długim włóknem najczęściej występuje międzywarstwowe pękanie poślizgowe (tab. 4.2).

Tabl. 4.2. Rodzaje uszkodzeń materiałów wykazujących międzywarstwowe pękanie poślizgowe [1]

Sposób oznaczenia	Typ kształtki	L/h	Rodzaj uszkodzenia	Rysunek
ISO 179-1/2 n lub p ^a	2	20	Rozciąganie t	
			Ściskanie c	
			Wyginanie b	
ISO 179-1/3 n lub p ^a	3	6 lub 8	Rozwarstwianie s	
			Rozwarstwianie wielokrotne ms	
			Rozwarstwianie z rozciąganiem st	

^a „n” jest kierunkiem prostopadłym a „p” kierunkiem równoległym względem płaszczyzny płyty (patrz rys. 2.1.).

5. Metodyka badań (przebieg ćwiczenia)

Badania przeprowadzone będą dla próbek wykonanych z kompozytu poliestrowo-szklanego, w którym zastosowano wzmocnienie w postaci długich włókien szklanych o zorientowanym ułożeniu.

5.1. Przygotowanie próbek do badań

Kondycjonowanie – Kształtki do badań należy kondycjonować przez co najmniej 16 h w temperaturze 23°C i przy wilgotności 50%.

Oczyszczenie próbek – Powierzchnie próbek należy oczyścić z wszelkich zanieczyszczeń i cząstek stałych.

Sprawdzenie stanu powierzchni próbki – Sprawdzić przez oględziny optyczne stan powierzchni kształtek – posiadające widoczne wady w postaci pęknięć, porów, pęcherzy lub innych skaz odrzucić.

5.2. Oznaczenie udarności

Próbkę udarności wykonać dla dwóch kierunków uderzenia: płaszczyznowego i krawędziowego stosując do każdego układu nową próbkę.

- badanie przeprowadzić w warunkach kondycjonowania próbek,
- zmierzyć wymiary próbki dokładnością do 0,02mm,
- sprawdzić młot w ruchu jałowym przez puszczenie wahadła z położenia początkowego I i wykonanie jednego wahnięcia; wskazówka młota powinna wskazywać na podziałce 4 zero z dokładnością do 1Nm lub wskazywać kąt $\beta = \alpha \approx \alpha_0$, odpowiadający $L_u = 0$ (określić starty na tarcie i skorygować wartość pochłanianej energii),
- umieścić próbkę na podporach przyrządu tak, aby:
 - zapewnić układ płaszczyznowy próbki (rys. 2.1),
 - próbka przylegała do oporów,
 - krawędź uderzająca trafiała w środek kształtki,

- e) unieść wahadło do położenia początkowego I i zablokować je zapadką 3,
- f) zwolnić zapadkę wahadła,
- g) po wykonaniu jednego wahanicia zatrzymać wahadło za pomocą hamulca,
- h) odczytać na podziałce młota (skala C) wartość kąta β a następnie obliczyć pracę zużyta na złamanie próbki,
- i) wyniki pomiarów zestawić w tabeli pomiarowej na karcie pracy,
- j) zmierzyć wymiary drugiej próbki z dokładnością do 0,02mm,
- k) ułożyć próbkę na podporach w układzie krawędziowym i powtórzyć czynności od d) do j).

5. Prezentacja i analiza wyników badań

Protokół badań powinien zawierać następujące informacje:

- powołanie się na normę wg której wykonywano oznaczenie,
- warunki klimatyczne kondycjonowania i badania,
- zastosowaną metodę odpowiednio oznaczoną:

Badanie udarności metodą Charpy'ego ISO 179-1/ 2 n

Typ kształtki (patrz **tab. 4.1**) _____

Kierunek uderzenia (patrz **rys. 2.1**) _____

- opis rodzaju i formy materiału, np. czy jest to wyrób gotowy, półprodukt, płytka do badań lub kształtka, z uwzględnieniem głównych wymiarów,
- prędkość uderzenia,
- nominalną energię wahadła,
- sposób przygotowania kształtek do badań i jej zorientowanie w stosunku do wyrobu,
- wyznaczoną wartość udarności,
- rodzaj obserwowanego uszkodzenia,
- datę badania

UWAGA:

Efektym końcowym laboratorium będzie wypełnienie (w formie pisemnej) i oddanie na końcu zajęć karty pracy wg zamieszczonego w tej instrukcji wzoru (str. 9). Kartę pracy każdy uczestnik zajęć wypełnia indywidualnie i w związku z tym jest zobligowany do przyniesienia tej karty na zajęcia. Brak karty pracy uniemożliwia zaliczenie zajęć.

Literatura

- [1] PN-EN ISO 179-1:2002 Tworzywa sztuczne -- Oznaczenie udarności metodą Charpy
- [2] PN-EN 180:2004 Tworzywa sztuczne -- Oznaczenie udarności metodą Izoda
- [3] PN-C-89028:1968 Tworzywa sztuczne -- Oznaczenie udarności za pomocą aparatu – typ Dynstat
- [4] Frącz W., Krywult B.: Projektowanie i wytwarzanie elementów z tworzyw sztucznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2005
- [5] Leda Henryk: Kompozyty polimerowe z włóknami ciągłymi, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2000
- [6] Żuchowska D.: Polimery konstrukcyjne: wprowadzenie do technologii i stosowania. WNT, Warszawa 1995
- [7] Szlezyngier W.: Tworzywa sztuczne: chemia, technologia wytwarzania, właściwości, przetwórstwo, zastosowanie. Wyd. Oświatowe FOSZE, Rzeszów 1998
- [8] Blicharski M: Wstęp do inżynierii materiałowej. WNT, Warszawa 2003

Karta pracy

Data:.....

.....
Nazwisko i imię, grupa

Temat ćwiczenia:
.....

Badany materiał (rodzaj, forma, typ kształtki):
.....

Rysunek badanej próbki (szkic):

Tablica wyników badań i obliczeń (obliczenia wykonać na odwrocie kartki)

Temperatura				Wilgotność							
Nominalna energia wahadła			Prędkość uderzenia				Kąt spadania wahadła $\alpha =$				
Masa młota $m =$			Długość wahadła $l =$				Kąt podniesienia b. jałowy $\beta_0 =$				
WYNIKI											
Moduł Younga E_k równoległe do włókien:						Moduł Younga E_k prostopadłe do włókien:					
Udarność metodą Charpiego											
Rodzaj materiału	Wymiary próbki [mm]			Pow. przekroju poprzecznego, S_0 [cm ²]	Kąt podniesienia, β [°]	Energia pochłonięta, L_u [J]	Energia pochłonięta skorygowana, E_c [J]	Udarność, a_{cU} [kJ/cm ²]	Udarność, a_{cU} [J/m ²]	Rodzaj uszkodzenia	Uwagi
	Grubość, h	Szerokość, b	Długość								
Uderzenie płaszczynowe											
KPS											
Uderzenie krawędziowe											
KPS											
Uderzenie płaszczynowe											
sklejka											
Uderzenie krawędziowe											
sklejka											
Stosunek udarności KPS przy uderzeniu płaszczynowym do udarności przy uderzeniu krawędziowym:											

Opis uszkodzenia próbki (szkic):
.....
.....
.....
.....

Wnioski:
.....
.....
.....
.....

6. Wiadomości uzupełniające

6.1. Polimerowe kompozyty konstrukcyjne

Kompozyty to materiały złożone, wytworzone przeważnie przez człowieka, (zwane niekiedy konstrukcjami lub układami kompozytowymi), a także naturalne (np. drewno, kości ssaków). Tworzywo sztuczne można uznać za kompozyt jeżeli jest złożone z co najmniej dwóch składników (zwanymi komponentami lub fazami) o różnych właściwościach i tworzy materiał o innych (nowych, lepszych) właściwościach w porównaniu z właściwościami poszczególnych składników lub w porównaniu z sumą właściwości tych składników [6-7]. Kompozyt jest materiałem zewnętrznym monolitycznym, jednakże z makroskopowo widocznymi granicami między poszczególnymi fazami. Między składnikami materiału kompozytowego może dochodzić do reakcji chemicznych, dyfuzyjnych, rozpuszczania, wzajemnego mieszania lub tworzenia nowych faz.

Kompozyty polimerowe są materiałami posiadającymi cechy heterogenne, w których fazą nośną – osnową jest polimer, a fazą dyspersyjną – rozproszoną napełniacz. Faza nośna składa się z jednego lub kilku komponentów, faza dyspersyjna to również jeden lub kilka składników, przy czym mogą to być pierwiastki (metali lub niemetalu) lub związki chemiczne. Właściwości kompozytów uzależnione są od: rodzaju polimeru, rodzaju wzmocnienia i stopnia rozdrobnienia fazy rozproszonej oraz adhezji między składnikami układu kompozytowego.

W zależności od postaci stosowanego napełniacza możemy wyróżnić kompozyty z napełniaczami włóknistymi lub proszkowymi. Do wytwarzania kompozytów napełnianych włóknami najczęściej stosuje się polimery chemo- i termoutwardzalne takie jak: żywice epoksydowe, fenolowe, silikonowe, nienasycone żywice poliestrowe oraz polimery termoplastyczne: PS, PP, ABS, PA, PC. Napełniaczami mogą być włókna szklane, węglowe, grafitowe, aramidowe, metalowe, a także mikrowłókna i włókna monokrystaliczne tzw. whiskersy [6-7]. Ze względu na długość włókien można wyróżnić:

- kompozyty z włóknami ciągłymi,
- kompozyty z włóknami nieciągłymi (ciętymi).

6.2. Właściwości mechaniczne kompozytów włóknistych

Głównym celem przy projektowaniu kompozytów włóknistych jest zwykle uzyskanie tworzywa o dużej sztywności i wytrzymałości właściwej. Właściwości mechaniczne kompozytów włóknistych zależą nie tylko od właściwości samych włókien, ale również od tego, w jakim stopniu obciążenie jest przekazywane z osnowy do włókien. To natomiast zależy od długości włókien i wytrzymałości granicy między włóknami a osnową. Przy projektowaniu kompozytów wzmocnionych włóknami należy uwzględnić [8]:

- właściwości włókien i osnowy,
- ułamek objętości zajętej przez włókna,
- długość i średnicę włókien,
- orientację i prostoliniowość włókien,
- wytrzymałość granicy między włóknami a osnową.

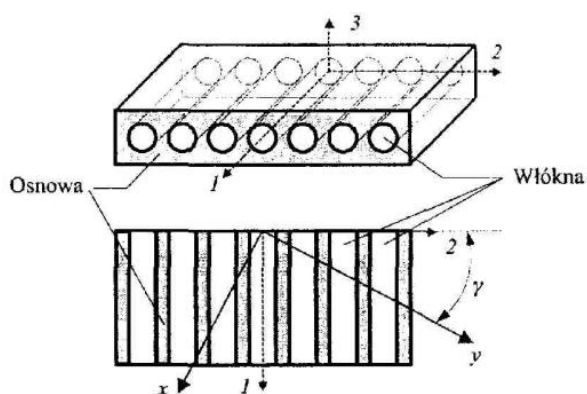
Wymiar włókna charakteryzuje się zwykle stosunkiem długości (l) do średnicy (d) – typowe włókna mają średnice od 10 do 150 μm . Wytrzymałość kompozytu rośnie ze wzrostem stosunku l/d . Pęknięcie włókien rozpoczyna się od wad występujących na ich powierzchni, stąd stosując włókno o jak najmniejszej średnicy zmniejsza się powierzchnię włókna, a przez to ogranicza się wielkość wad powierzchniowych, co prowadzi do wzrostu wytrzymałości włókien. Właściwości wybranych włókien wzmocniających zestawiono w tab. 6.1.

TABLICA 6.1 Własności wybranych włókien wzmacniających kompozyt
(Askeland D.R.: *The Science and Engineering of Materials*. Boston PWS Publishing Company, 1994)

Materiał	Gęstość ρ Mg · m ⁻³	E GPa	E/ρ	R_m MPa	R_m/ρ	Temperatura topnienia, °C
Szkło						
E	2,55	72	28	3450	1353	< 1725
S	2,50	87	35	4480	1792	< 1725
Węgiel						
o dużej R_m	1,75	275	157	5650	3229	3550
o dużym E	1,90	530	279	1860	979	3550
Ceramika						
SiC	3,00	480	160	3930	1310	2700
B ₄ C	2,36	480	203	2270	962	2450
Al ₂ O ₃	3,95	380	96	2060	522	2020
ZrO ₂	4,84	345	71	2060	426	2680
Polimer						
aramid (Kevlar)	1,44	124	86	4480	3111	500
poliamid (nylon)	1,14	2,8	2,5	830	728	249
polietylen	0,97	172	177	3300	3402	147
Metal						
beryl	1,83	303	166	1280	699	1278
wolfram	19,40	407	21	4000	206	3422
stal o dużej zawartości C	7,8	210	27	3000	385	1450
bor*	2,36	380	161	3450	1462	2300
Wiskery						
grafit	1,66	703	423	20700	12470	3550
SiC	3,18	483	152	20700	6509	2700
Si ₃ N ₄	3,18	380	119	13800	4340	–
Al ₂ O ₃	3,96	427	108	20700	5227	2020
Cr	7,20	241	33	8900	1236	1863

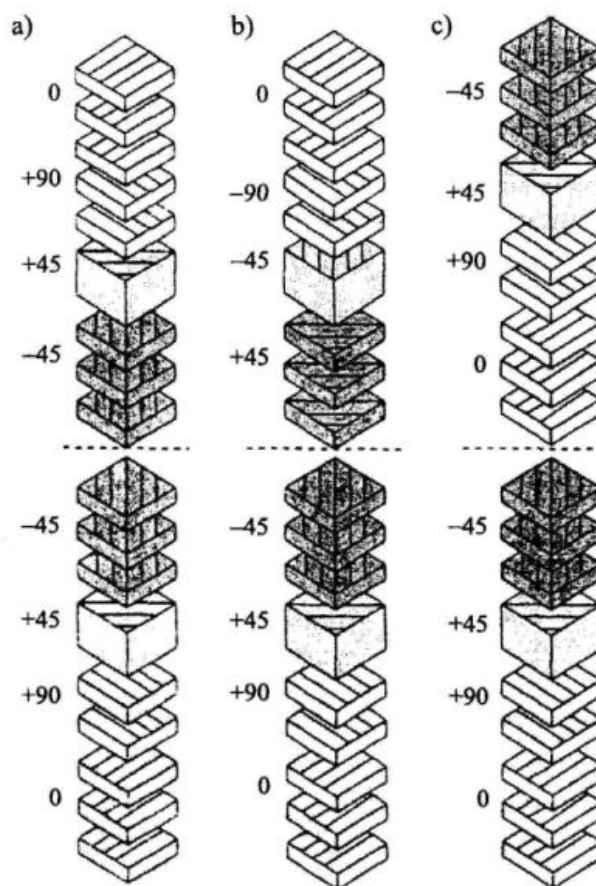
* Bor jest zaliczany do półmetali (metaloidów).

Tworzywa wzmacniane włóknami (TWW) są materiałami anizotropowymi, tzn. wykazującymi właściwości silnie uzależnione od kierunku obserwacji. Przykładowo właściwości sprężyste materiału izotropowego przy rozciąganiu opisuje jeden moduł: E , natomiast dla materiałów anizotropowych musimy podać co najmniej dwa moduły – wzdłuż i w poprzek włókien wzmacniających. Warstwy elementarne o wzmocnieniu jednokierunkowym są typowym produktem wyjściowym do tworzenia struktur wielowarstwowych. W warstwie elementarnej włókna wzmacniające otoczone materiałem osnowy są ułożone równolegle (rys. 6.1).



Rys. 6.1. Teoretyczna struktura warstwy elementarnej TWW o wzmocnieniu jednokierunkowym (transizotropowym) [4]. Układy współrzędnych: 1 – kąt $\gamma = 0^\circ$, 2 – kąt $\gamma = 90^\circ$ (układ podstawowy); $x-y$ – układ po obrocie osi 1-2 o kąt γ

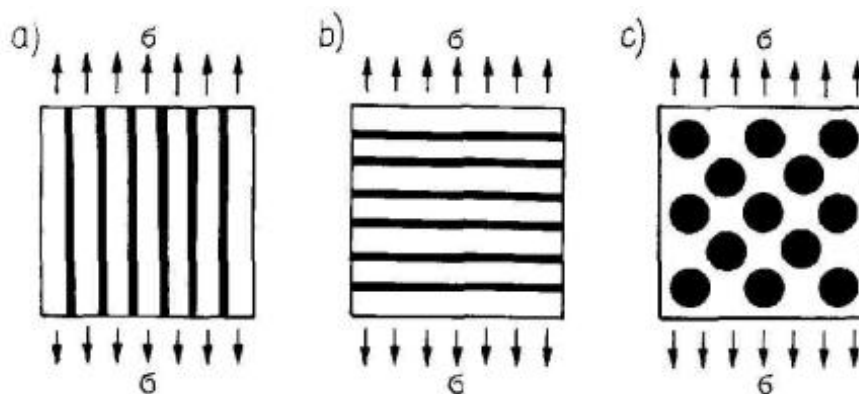
Główne dziedziny stosowania wyrobów z TWW to: sprzęt sportowy (narty, tyczki do skoków), łodzie i jachty, karoserie samochodów (głównie sportowych), szybowce, zbiorniki ciśnieniowe, elementy samolotów pasażerskich i wojskowych itp. Przeważnie wyroby z TWW tworzą struktury wielowarstwowe złożone z kilku do nawet kilkudziesięciu warstw elementarnych, zespolonych trwale w procesie technologicznym (rys. 6.2). Podstawą projektowania takich struktur jest znajomość właściwości sprężystych i wytrzymałościowych pojedynczych warstw elementarnych.



Rys. 6.2. Typowe układy warstw elementarnych makrostruktur TWW: a) symetryczny, b) antysymetryczny, c) powtarzalny w grupach (sekwencyjny) [4]

Przy rozważaniach dotyczących wpływu parametrów kompozytu na właściwości wytrzymałościowe rozpatruje się zwykle trzy wyidealizowane przypadki, a mianowicie [8]:

- 1) kompozyt wzmocniany równoległymi włóknami ciągłymi obciążony równoległe do osi włókien,
- 2) ten sam kompozyt obciążony prostopadle do osi włókien,
- 3) kompozyt z napełniaczami proszkowymi (agregatowy) z uszeregowanym rozmieszczeniem cząstek



RYS. 6.3. Typowe schematy obciążeń kompozytów: a) obciążenie siłą równoległą do osi włókien powoduje takie samo odkształcenie włókien i osnowy, b) obciążenie siłą prostopadłą powoduje w przybliżeniu takie samo napięcie włókien i osnowy, c) przybliżona równość naprężeń występuje również w przypadku kompozytu agregatowego [8]

Stosując pewne uproszczenia można wyprowadzić wyrażenie na moduł Younga dla struktur z wzmocnionych tworzyw sztucznych obciążonych jak na rys. 6.3:

- i) moduł Younga kompozytu z włóknami ciągłymi, obciążonego równoległe do osi włókien jest średnią ważoną modułów osnowy i włókien:

$$E_k = V_o E_o + V_w E_w = (1 - V_w) E_o + V_w E_w \quad (6.1)$$

- ii) moduł Younga kompozytu z włóknami ciągłymi, obciążonego prostopadle do osi włókien:

$$E_k = \frac{E_o E_w}{V_o E_w + V_w E_o} = \frac{E_o E_w}{(1 - V_w) E_w + V_w E_o} \quad (6.2)$$

gdzie: E_k, E_o, E_w – odpowiednio moduł Younga kompozytu, osnowy i włókien;
 V_o, V_w – ułamki objętości odpowiednio osnowy i włókien ($V_o + V_w = 1$)

- iii) określenie modułu Younga kompozytu z cząstkami kulistymi jest zagadnieniem trudnym