

**LABORATORIA
APARATURA
BADANIA**

ISSN-1427-5519

LAB

3 / 2018

DWUMIESIĘCZNIK

**Badania trybologiczne
materiałów inżynierskich**

**Wyznaczanie przepuszczalności
par wody przez materiały opakowań**

Badania własności mechanicznych materiałów inżynierskich

Mariusz Król, Zbigniew Brytan*

Dobór materiałów konstrukcyjnych, które umożliwiają w obecnym czasie projektowanie konstrukcji charakteryzujących się niską masą i energooszczędnością, polega na uwzględnianiu ich podstawowych cech jakimi się charakteryzują. W obecnym czasie liczba materiałów dostępnych dla inżynierów jest niebywale duża, gdyż sięga już 80 tysięcy, z widoczną tendencją wzrostową nowych materiałów o nowych, praktycznych właściwościach. Właściwie opracowany produkt, będący tani i zarazem użyteczny, wymaga od producenta zastosowania najlepszych w danym przypadku materiałów, których właściwości użytkowe są w pełni wykorzystane.

Cechy materiałów, czyli jego własności jakimi się charakteryzują, podzielić można na własności: chemiczne (odporność metalu na korozję oraz na działanie wysokiej temperatury), fizyczne (mechaniczne, termiczne, termoizolacyjne, termodynamiczne i dynamiczne, optyczne, elektryczne i magnetyczne), technologiczne (plastyczność, skrawalność, lejność) i eksploatacyjne (własności trybologiczne). Własności materiałów inżynierskich ograniczają rodzaj i zakres ich zastosowania na dany element lub urządzenie. Przy

doborze materiału w danym celu, pod uwagę należy brać kilka jego cech. Dla przykładu podczas projektowania lekkich konstrukcji bardzo ważny jest stosunek wytrzymałości do gęstości σ/ρ . Takie podejście wywarło wpływ na opracowanie map przedstawiających wybraną własność w zestawieniu do innej, całej gamy materiałów. Przykład takiej mapy przedstawiono na rys. 1.

W celu opracowania map własności należy wykonać szereg badań, oznaczając własności mechaniczne materiałów inżynierskich. Badania te wykonuje się z wykorzystaniem wielu zróżnicowanych metod

badawczych. Wynika to z konieczności wyznaczenia wartości charakterystycznych dla danego materiału poddawanego różnym rodzajom obciążenia, jak np.: rozciąganie, ściskanie, zginanie, skręcanie czy ścinanie, a także niektórym ich kombinacjom. Różne warunki pracy materiałów inżynierskich wymagają realizowania badań przy obciążeniach cyklicznych, a dla uwzględnienia wpływu środowiska oraz temperatury otoczenia – również prowadzenia prób w podwyższonych lub obniżonych temperaturach.

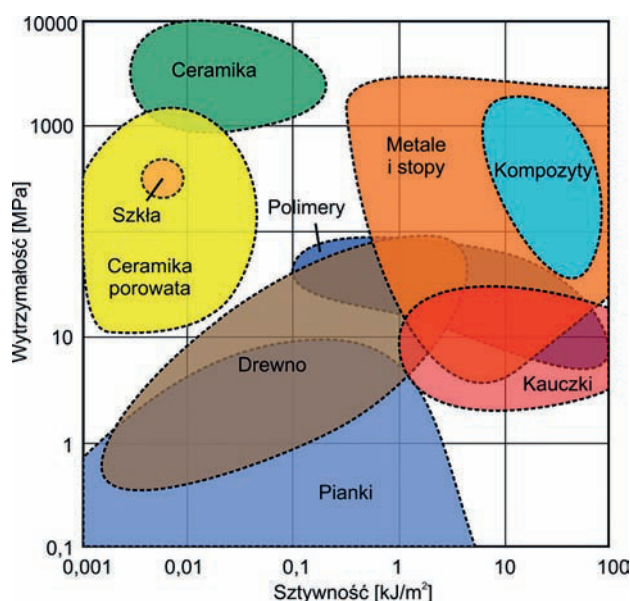
Wyznaczenie podstawowych własności mechanicznych materiałów konstrukcyjnych

realizowane jest z reguły na podstawie trzech odmiennych badań, a mianowicie: statycznej próby rozciągania (ściskania lub zginania), pomiary twardości i udarności.

Statyczna próba rozciągania polega na rozciąganiu próbki wykonanej z badanego materiału, próbki płaskiej lub walcowej i jednoczesnym rejestrowaniu siły oraz spowodowanej nią zmiany długości próbki. Na podstawie tej próby można wyznaczyć szereg parametrów opisujących charakterystykę badanego materiału: wytrzymałość na rozciąganie (R_m), granicę plastyczności (R_e), granicę sprężystości (R_{sp}), wydłużenie (A), przewężenie (Z) oraz stałe materiałowe takie jak moduł Younga (E) oraz współczynnik Poisson'a (ν).

Zasady przygotowania próbek, przeprowadzenia badania w temperaturze pokojowej dla metali oraz opracowania wyników reguluje norma PN-EN ISO 6892-1:2016-09.

Rozciąganie wcześniej przygotowanych próbek płaskich lub walcowych wykonuje się w uniwersalnych maszynach wytrzymałościowych (po przebrojeniu takie urządzenia umożliwiają wykonanie statycznej próby ściskania lub trójpunktowego zginania).



Rys. 1. Przykładowe zestawienie własności: wytrzymałość w funkcji sztywności dla różnych grup materiałów



Urządzenia te wyposażone są w odpowiednie szczęki zaciskowe, pozwalające na pewne zamocowanie badanej próbki, dynamometr pozwalający na pomiar siły F oddziałującej na próbkę oraz czujnik ruchu trawersy rejestrujący przyrost długości ΔL w stosunku do długości początkowej próbki L_0 . Uniwersalne maszyny wytrzymałościowe umożliwiają ponadto pomiar bezpośrednio odkształcenia przyjętego odcinka pomiarowego, lecz w tym wypadku niezbędne jest doposażenie w układ rejestrujący o odpowiedni ekstensometr (mechaniczny lub optyczny).

Na podstawie zarejestrowanych z badania statycznej próby rozciągania wyników wartości siły F i wydłużenia próbki ΔL można wyznaczyć zależności $\sigma=f(\epsilon)$ badanego materiału, gdzie kształt wykresu zależy od charakterystyki badanego materiału (rys. 2).

Z przedstawionych charakterystyk wynika, że początkowo powstające odkształcenia są proporcjonalne (0-I) i sprężyste (0-II). W większości przypadków nachylenie krzywej względem osi X jest strome, ponieważ odkształcenia sprężyste są niewielkie – w tym zakresie obowiązuje prawo Hooke’a. Dopiero po przejściu materiału w stan plastyczny, bezwzględna wartość wydłużenia narasta szybciej. Początkowo odkształcenia plastyczne są nieznaczne (II-III), po chwili następuje zaburzenie równowagi sił wewnętrznych i materiał zaczyna „płynąć” (III-IV). Wydłużenie próbki zwiększa się, przy czym siła F nie przybiera na wartości, a na-

wet może osiągać tendencję spadkową. Przy dalszym przebiegu próby „płynięcie” ustaje i następuje umocnienie materiału. Odbywa to się przy dalszym wzroście siły obciążającej i znacznych wydłużeniach trwałych (IV-V). Po osiągnięciu przez siłę wartości F_m (V), na próbce zaczyna tworzyć się w najslabszym miejscu lokalne przewężenie, czyli tzw. „szyjka”. Krzywa rozciągania zaczyna obniżać się, co w konsekwencji prowadzi do zerwania próbki (VI).

Na podstawie wyników statycznej próby rozciągania można wyróżnić szereg punktów charakterystycznych, stanowiących podstawę dla określenia własności wytrzymałościowych. Są to:

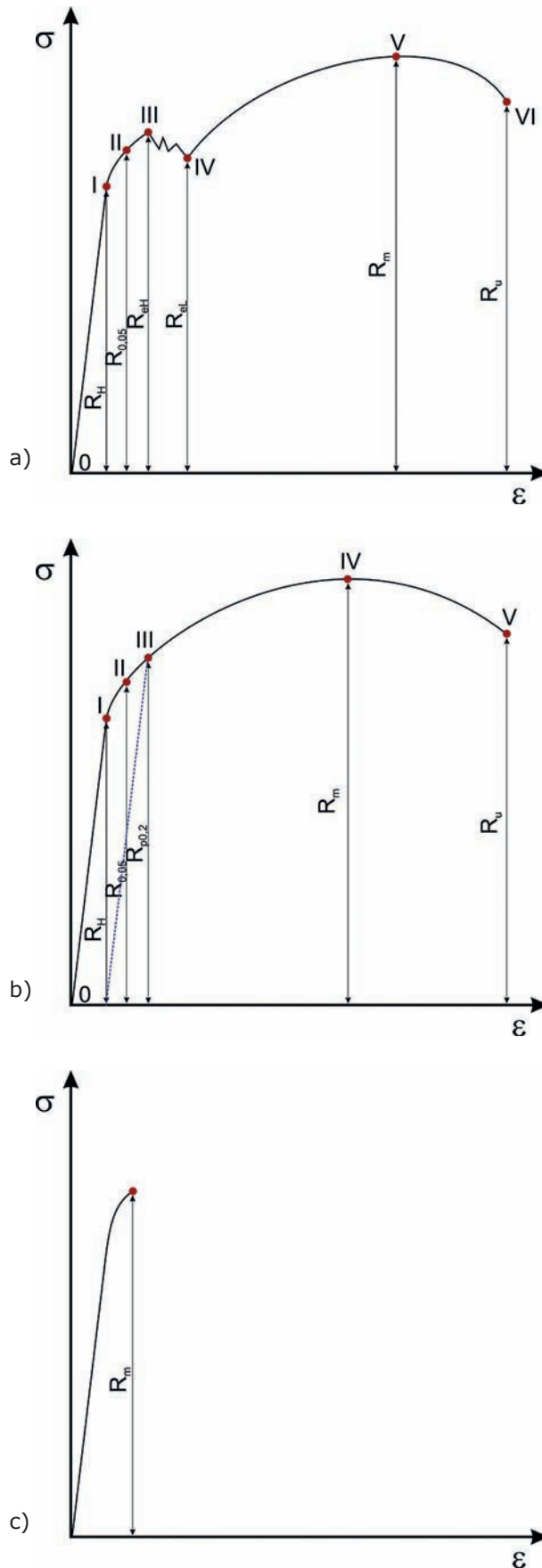
- *Moduł Young’a E* – moduł sprężystości wzdłużnej określany jest do granicy proporcjonalności na prostoliniowym odcinku charakterystyki $\sigma=f(\epsilon)$, tj. w zakresie charakterystyki, w którym obowiązuje prawo Hooke’a. Wartość modułu E wyznaczana jest na podstawie zależności:

$$E = \frac{\sigma_B - \sigma_A}{\epsilon_B - \epsilon_A} \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

- *Umowna granica sprężystości $R_{0,05}$* – naprężenie odpowiadające działaniu siły rozciągającej, wywołujące w badanym materiale umowne wydłużenie trwałe x , wynoszące 0,05% długości pomiarowej L_0 :

$$R_{0,05} = \frac{F_{0,05}}{S_0} \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

- *Umowna granica plastyczności $R_{p0,2}$* – naprężenie odpowiadające działaniu siły rozciągającej, wywołujące w badanym materiale umowne wydłużenie



Rys. 2. Przykładowe charakterystyki $F=f(\Delta L)$ dla materiałów: a) z wyraźną granicą plastyczności; b) bez wyraźnej granicy plastyczności, c) kruchych



trwałe wynoszące 0,2% długości pomiarowej L_0 :

$$R_{p0,2} = \frac{F_{0,2}}{S_0} \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

- **Wyrażna granica plastyczności R_e** – naprężenie odpowiadające działaniu siły F_e :

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

Rozróżnia się górną granicę plastyczności R_{eH} , w której naprężenie odpowiada pierwszej wartości maksymalnej zarejestrowanej przy badaniu materiału oraz dolną granicę plastyczności R_{eL} , odpowiadającą minimalnej wartości naprężenia przy wyraźnym wzroście wydłużenia.

- **Wytrzymałość na rozciąganie R_m** – naprężenie odpowiadające największej sile obciążającej F_m uzyskanej w czasie badania, odniesionej do pierwotnego pola przekroju poprzecznego próbki:

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} [MPa]$$

- **Naprężenie rozrywające R_u** – naprężenie występujące w przekroju poprzecznym próbki w miejscu przewężenia bezpośrednio przed rozerwaniem, obliczone z ilorazu siły w chwili rozerwania F_u i najmniejszego przekroju próbki S_u po rozerwaniu:

$$R_u = \frac{F_u}{S_u} \left[\frac{N}{m^2} \right]$$

- **Przewężenie względne Z** – określane jest jako zmniejszenie pola powierzchni przekroju poprzecznego próbki w miejscu rozerwania odniesione do pola powierzchni przekroju początkowego wyrażone w procentach:

$$Z = \frac{A_0 - A_u}{A_0} \cdot 100\%$$

- **Wydłużenie względne po rozerwaniu A** – określane jako przyrost długości pomiarowej próbki mierzonej po rozerwaniu w odniesieniu do pierwotnej długości pomiarowej próbki, wyrażony w procentach:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100\%$$

Statyczna próba rozciągania jest podstawową i najczęściej stosowaną próbą wytrzymałościową, jednak należy wziąć pod uwagę fakt, że wyniki uzyskane z tej próby mogą nie odzwierciedlać zachowania konstrukcji pod obciążeniem, dlatego też niektóre elementy poddaje się statycznej próbie rozciągania w całości (połączenia spawane czy nitowe, liny, łańcuchy). Ponadto prowadzi się próby rozciągania w temperaturze obniżonej i podwyższonej. Kolejną grupą badań, odmiennych do pomiarów statycznej charakterystyki rozciągania to badania zmęczeniowe przy cyklicznie zmiennym obciążeniu.

Twardość materiału jest jedną z własności, których nie można jednoznacznie zdefiniować w oparciu o znane wielkości fizyczne. W praktyce przez twardość rozumie się odporność badanego materiału na odkształcanie plastyczne w wyniku oddziaływania skupionego nacisku w postaci ściśle określonego wgłębnika (penetratora). Badania twardości są stosowane w praktyce ze względu na prostotę i szybkość pomiaru.

Ze względu na niewielkie odkształcenie oraz możliwość wykonywania pomiarów na gotowych wyrobach, pomiar twardości są zaliczane do badań nieniszczących. Wśród wszystkich pomiarów wykonywanych w przedsiębiorstwach produkcyjnych, badania twardości należą do najbardziej zróżnicowanych. Badania te mogą być prowadzone pod obciążeniem od zaledwie kilku gramów do kilkudziesięciu tysięcy N. Z jednej strony badana jest twardość wielkich odlewów, a z drugiej strony elementów pokrytych cienkimi powłokami o grubościach rzędu kilku mikrometrów, a zakres badanych materiałów obejmuje elementy wykonane z najtwardszych spieków, jak ceramika, jak i z miękkich stopów metali: stopów litu czy magnezu. Przed przystąpieniem do wyboru metody pomiarowej należy wziąć pod uwagę takie aspekty jak obciążenie, zakres mierzonych twardości, dokładność i możliwość dostosowania urządzenia do kształtu i wymiaru badanego elementu.

Obciążenie przyłożone do wgłębnika nie może spowodować zagłębienia się w materiał bardziej niż na 1/10 grubości mierzonego elementu lub badanej warstwy. Jeżeli jest to możliwe, zaleca się stosowanie obciążeń o dużych wartościach, podnosząc tym samym dokładność osiąganych wyników. Z drugiej strony, zbyt duże obciążenie może spowodować uszkodzenie badanego elementu, inicjując mikropęknięcia na powierzchni. A zatem możliwość pozycjonowania przedmiotu względem

twardościomierza i odwrotnie to kolejny czynnik jaki należy uwzględnić przy doborze metody pomiarowej.

W metodzie Rockwell'a jako penetratora wykorzystuje się wgłębnik w postaci stożka diamentowego o kącie wierzchołkowym 120° i promieniu zaokrąglenia 0,2 mm dla skali C, A, N lub kulki stalowej o średnicy 1/16, 1/8, 1/4, 1/2 cala dla skali B, F i T. Zdarza się również, w niektórych typach twardościomierzy, zastąpienie kulki stalowej kulką wykonaną z węgla wolframu. Metoda pomiaru twardości metodą Rockwell'a polega na obciążeniu wgłębnika siłą wstępną o wartości F_0 , powodującą nieznaczne zagłębienie penetratora. W kolejnym etapie pomiaru dokładane jest stopniowo, unikając uderzenia, obciążenie główne F_1 , które w rezultacie, sumując z obciążeniem wstępnym, daje obciążenie całkowite F . W kolejnym etapie badania, zwalniane jest obciążenie główne, dzięki czemu penetrator pozostaje w materiale, eliminując odkształcenia sprężyste powstające w badanym materiale. Wynik jaki otrzymujemy podczas tego badania oznacza się przez HR z kolejną literą oznaczającą zastosowany typ penetratora i obciążenia. Metoda ta opiera się na pomiarze głębokości odcisku, a szczegółowe informacje zawarte procedury pomiarowej zawarte są w normie PN-EN ISO 6508-1:2016-10. Należy pamiętać, że przed każdą serią badań, należy sprawdzić poprawność działania twardościomierza. Dokonuje się tego poprzez wykonanie



pomiaru twardości wzorca, jaki został dostarczony wraz z urządzeniem. Jeżeli pomiar twardości odpowiada twardości materiału wzorcowego, można przystąpić do badań; w przeciwnym wypadku należy zgłosić taki fakt do serwisu i dokonać kalibracji.

W metodzie Vickersa (zasady pomiaru reguluje norma PN-EN ISO 6507-1:2007) twardość HV jest określana jako stosunek obciążenia F do powierzchni S pobocznic odcisku penetratora. Wgłębnikiem w tej metodzie pomiarowej jest diamentowy ostrosłup o kwadratowej podstawie i kącie $\alpha=136^\circ$ między przeciwległymi ścianami. Wywierany nacisk, zależnie od rodzaju powierzchni badanej, może przybrać wartość $F=9,8; 24,5; 49; 98; 196; 294; 491$ lub 981 N. Po wykonaniu badania mierzy się długości przekątnych powstałego odcisku przyjmując do dalszych obliczeń wartość średnią. Wartość twardości w metodzie Vickersa wyznaczana jest na podstawie zależności:

$$HV = \frac{2F}{d^2} \cdot \sin \frac{136^\circ}{2} = 1,854 \cdot \frac{F}{d^2}$$

gdzie:

F – przyłożone obciążenie,
 d – średnia odległość dwóch przekątnych.

Dzięki tej metodzie możliwe jest badanie twardości szerokiej gamy materiałów: zarówno stopów metali miękkich (stopy Zn, Mg, Al), jak i bardzo twardych (narzędzia, warstwy po azotowaniu lub hartowaniu). W celu pomiaru twardości powłok lub warstw utwardzonych stosuje się od-

mianę metody Vickersa jaką jest pomiar mikrotwardości. Jedyną różnicą jaką występuje pomiędzy tymi metodami, to wartość stosowanego obciążenia, które wynoszą poniżej 10 N.

Kolejnym sposobem pomiaru twardości jest pomiar metodą Brinella. Zasada pomiaru tą metodą jest podobna do metody pomiaru sposobem Vickersa, z tym że stosowany jest inny rodzaj wgłębnika. Sposób pomiaru metodą Brinella przedstawiono w normie PN-EN ISO 6506-1:2014-12. Metoda ta polega na wciskaniu pod obciążeniem F wgłębnika w postaci hartowanej kulki stalowej o średnicy $D=10; 5; 2,5$ lub 1 mm w powierzchnię badanego materiału, w czasie t . Wgłębnik ten powoduje powstanie na powierzchni próbki odcisku, którego średnicę, z wykorzystaniem systemu optycznego, jako średnia z dwóch pomiarów w kierunkach wzajemnie prostopadłych, służy do obliczania pola powierzchni czaszy odcisku, którą wyznacza się z zależności:

$$HB = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

gdzie:

F – siła,
 D – średnica zastosowanej w badaniu kulki,
 d – średnica powstałego odcisku.

Norma wymaga, aby średnica odcisku była zawarta w przedziale między 0,24 a 0,60 średnicy kulki.

Wyżej wymienione próby badania własności mechanicznych zalicza się do grupy badań statycznych. Do prób badań dynamicznych zaliczyć można próby udarowe, które określają zdolność materiału do przenoszenia gwałtownych obciążeń typu uderzeniowego. Określają one te własności materiału, których nie można wyznaczyć przy pomocy prób statycznych. Jedną z takich prób jest próba udarności sposobem Charpy'ego (PN-EN ISO 148-1:2017-02). Próba ta polega na zniszczeniu podpartego swobodnie na obu końcach badanego materiału z karbem typu U lub V, którego głębokość wynosi odpowiednio 5 i 2 mm, przez jednorazowe uderzenie młotem poruszającym się z prędkością $v=5\pm 0,5$ m/s, w warunkach zgodnych z obowiązującą normą oraz pomiarze pracy, odpowiadającej energii zużytej na złamanie tej próbki. Praca uderzenia, odpowiadająca energii zużytej na złamanie próbki, określona jest zależnością:

$$KC = \frac{K}{S_0} \left[\frac{J}{cm^2} \right]$$

gdzie:

m – masa młota,
 R – odległość od osi wahadła do środka próbki umieszczonej na podporach,
 β – kąt wychylenia wahadła po złamaniu próbki,
 α – kąt wychylenia wahadła w położeniu początkowym.

Udarnością KC nazywa się odporność badanego materiału na działanie obciążeń dynamicznych, którą wyznacza się na podstawie zależności:

$$K = mgR(\cos\beta - \cos\alpha)$$

gdzie:

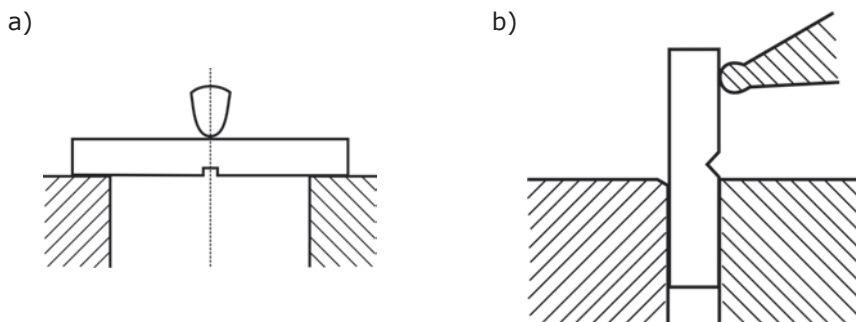
K – wyznaczona wartość pracy odpowiadająca energii zużytej na złamanie próbki,
 S_0 – pole powierzchni przekroju poprzecznego próbki w miejscu karbu.

Udarność K należy uzupełnić dodatkowym symbolem wskazującym typ zastosowanej próbki podczas badania:

- udarność próbek z karbem w kształcie litery U oznacza się jako KCU,
- udarność próbek z karbem w kształcie litery V oznacza się jako KV.

Należy bezwzględnie pamiętać, że wyniki prób udarności są porównywalne tylko i wyłącznie dla próbek o jednakowym kształcie i badań wykonanych w tych samych warunkach.

Metodą podobną do metody Charpy'ego, umożliwiającą wykonanie prób udarnościowych jest metoda Izoda. Metoda, poza tym że jest przeznaczona dla materiałów polimerowych i pozwala na badanie się wyłącznie próbek z karbem, różni się od metody Charpy'ego sposobem zamocowania próbek, ich wymiarami oraz prędkością uderzenia wahadła młota (rys. 3). W metodzie tej próbkę mocuje się pionowo, jednym końcem w uchwycie podstawy młota i łamie ostrzem walcowym wahadła młota w określonej odległości od krawędzi uchwytu. Udarność, tak jak przy metodzie Charpy'ego, określa praca zużyta na dynamiczne złamanie próbek z karbem, odniesiona do



Rys. 3. Różnica w sposobie podparcia próbki podczas pomiaru udarności metodami: a) Charpy'ego, b) Izoda

początkowego przekroju poprzecznego w miejscu karbu. Szczegółowe informacje dotyczące tej metody pomiarowej zestawiono w normie PN-EN ISO 180:2004

Badania podstawowych własności mechanicznych materiałów wyznaczanych w statycznej próbie rozciągania,

pomiary twardości czy udarności stanowią fundamentalne źródło informacji do ich klasyfikacji i kontroli. Stanowią także najpopularniejsze z metod pomiaru własności mechanicznych materiałów. Wyniki opisanych prób są stosowane w praktyce dla materiałów metalowych np. dla potwierdzania

głównych własności tych materiałów we wszystkich dokumentach kontroli jakości produktów stalowych. Znajomość sposobu ich wyznaczania oraz stosowanych symboli stanowi zatem podstawową wiedzę o materiałach inżynierskich. Wiedza ta jest wymagana nie tylko od inżynierów, ale także

od handlowców produktów stalowych, a zwłaszcza przetwórców końcowych tych materiałów. Znajomość podstawowych charakterystyk mechanicznych materiałów umożliwia bowiem świadomy i zoptymalizowany dobór do danego zastosowania, kontrolę procesu ich przetwarzania i produkcji wyrobów końcowych oraz reagowanie na powstające problemy technologiczne przetwarzania na bazie analizy własności materiału wsadowego.

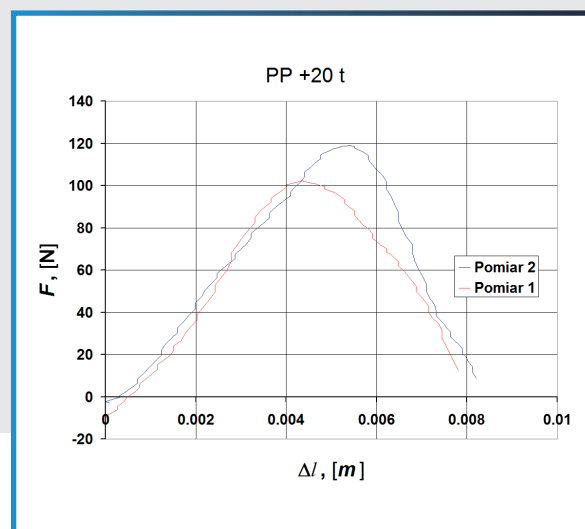
* Zakład Technologii Procesów Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Śląska w Gliwicach

Oferujemy modyfikację młotów Charpy'ego

Młot Charpy'ego służy do wyznaczania energii zużywaną do złamania odpowiednio przygotowanych próbek z tworzyw sztucznych, metali, itp. Dzięki naszej prostej modyfikacji sprzętowej i programowej jest możliwe wyznaczenie zależności siły od odkształcenia lub obu tych wielkości od czasu podczas procesu łamania próbek uderzanych przez młot umieszczony na wahadle.

Na rysunku pokazano zależność siły od odkształcenia dla pewnej próbki polimeru.

W uzgodnieniu z klientem możliwa jest budowa wielu instalacji, często w pełni automatycznych, z pełną kontrolą ich pracy nawet poprzez internet.



Z P P H | Zakład Produkcyjno-Projektowo-Handlowy
 ul. Kochanowskiego 37
 44-230 Czerwionka – Leszczyny
 www.zpph.com, info@zpph.com
 tel. kom.: 697 845 322