

12. POMIAR PARAMETRÓW DYNAMICZNEJ ODPORNOŚCI NA PĘKANIE PRZY POMOCY INSTRUMENTOWANEGO MŁOTA SPADOWEGO*

12.1. WSTĘP

12.1.1. Zagadnienia dynamiczne w badaniach własności materiałów

Dynamika jest nauką o tym, jak rzeczy zmieniają się w czasie i o siłach, które są przyczyną tych zmian. Celem analizy dynamicznej układu fizycznego jest określenie reakcji dynamicznej tego układu na zewnętrzne wymuszenie. Interesuje nas, jaki będzie jego ruch swobodny po wyprowadzeniu go ze stanu równowagi i jak będzie on reagował na sterowanie i pobudzenia. Studium dynamiki układu zależy oczywiście od tego, jakie środowiska fizyczne występują w układzie, jakie są rozmiary i złożoność systemu, z jaką dokładnością musi on działać itp. Procedura studium analitycznego niezależnie od tego, jaki układ w danym przypadku podlega badaniu, obejmuje etapy:

- Dokładne określenie układu, który ma być przestudiowany, i przedstawienie modelu fizycznego, którego własności dynamiczne będą w dostatecznym stopniu zgodne z własnościami rzeczywistego układu.
- Znalezienie modelu matematycznego, który będzie opisywać model fizyczny, to znaczy ułożenie równań różniczkowych ruchu modelu fizycznego.
- Przestudiowanie własności dynamicznych modelu matematycznego na podstawie rozwiązania równań różniczkowych ruchu.
- Zmianę parametrów analizowanego układu fizycznego tak by jego własności dynamiczne były takie jakich wymagamy.

Więcej o klasycznej analizie dynamicznej można przeczytać w [1].

Powszechnie zakłada się, że własności mechaniczne metali nie zależą od prędkości odkształcania. W rzeczywistości jednak własności te są zależne od prędkości odkształcania, chociaż dla metali w dość szerokim zakresie małych prędkości odkształcania wpływ ten jest pomijalnie mały. Zakres ten jest oczywiście umowny i jest on różny dla różnych metali, ale orientacyjnie można powiedzieć, że przy prędkościach odkształcenia rzędu $d\varepsilon/dt < 10^{-3} s^{-1}$ ich wpływ na własności np. plastyczne można pominąć [9]. Przy większych prędkościach odkształcenia ich wpływ na zachowanie się metali ma charakter zarówno ilościowy i jakościowy i nie może być pominięty w formułowaniu związków fizycznych.

Badania doświadczalne odkształcenia plastycznego metali przy założonych stanach naprężenia ze znacznymi prędkościami odkształcenia są niezwykle skomplikowane

* Opracował Zbigniew R. Lis

i poza pojedynczymi próbami [9] brak jest danych pozwalających na pełniejsze określenie postaci uogólnionego równania stanu. Dysponujemy wyłącznie danymi dotyczącymi jednoosiowych sposobów obciążania przy dużych prędkościach. Maksymalny zakres prędkości odkształcenia $d\varepsilon/dt$, stosowany w badaniach doświadczalnych metali, zawiera się w wielu rzędach dziesiętnych mierzonych w s^{-1} . Jako statyczną krzywą umocnienia przyjmuje się zazwyczaj krzywą otrzymaną przy prędkościach rzędu $10^{-4} s^{-1}$.

W widmie prędkości odkształcenia wyróżnia się następujące zakresy [6]:

- $d\varepsilon/dt < 10^{-4} s^{-1}$ – zakres ten odpowiada prędkości pełzania metali;
- $10^{-4} s^{-1} < d\varepsilon/dt < 10^{-2} s^{-1}$ – zakres normalnych prób statycznych przeprowadzanych na standardowych maszynach wytrzymałościowych, pozwalających na utrzymanie stałej prędkości odkształcania;
- $10^{-2} s^{-1} < d\varepsilon/dt < 10^2 s^{-1}$ – zakres ten jest zakresem prób quasi–statycznych dokonywanych przy pomocy takich urządzeń, jak młoty spadowe, rotacyjne, młoty Charpy’ego, maszyny pneumatyczne i inne;
- $10^2 s^{-1} < d\varepsilon/dt < 10^4 s^{-1}$ – zakres prób przy dużych prędkościach odkształcenia; badania doświadczalne przeprowadza się na ściskanie lub skręcanie próbek, jak również na rozciąganie;
- $d\varepsilon/dt > 10^4 s^{-1}$ – zakres ten jest nazywany zakresem bardzo dużych prędkości odkształcenia; prędkości te uzyskuje się poprzez generacje fal uderzeniowych.

12.1.2. Dynamiczna odporność na pękanie

Analizę zagadnień dynamicznych w mechanice pękania należy rozpocząć od uściślenia pojęcia *dynamiczny*. Słowo to dość powszechnie używa się do opisu zjawisk, które zmieniają się w czasie np. położenie masy skupionej, zmiana masy ciała promieniującego, zmiana położenia pojazdu kosmicznego, ale także zmiana popytu na towar na rynku czy zmiana notowań papierów wartościowych na giełdzie. W tych przypadkach najczęściej nie wskazuje się jaki wpływ na przebieg samego zjawiska ma prędkość tych zmian. Zmiana w czasie obserwowanego zjawiska pozwala na wyznaczenie prędkości takiej zmiany w czasie (wartość przyrostu wyznaczona w jednostce czasu) i z punktu widzenia analizowanych tutaj zjawisk to właśnie wartość tego przyrostu jest istotnie ważna, a nie sam fakt samej zmiany obserwowanego parametru w czasie. Zgodnie bowiem z drugim prawem dynamiki Newtona dla zagadnień mechanicznych zmiana prędkości jest przyczyną powstania pozornej siły (siły bezwładności) w układzie, której zaniechanie dla odpowiednio szybkich zmian jest niemożliwe. Rodzi to możliwość pełnego spojrzenia na zjawiska, które zaliczamy do „dynamicznych”. Z punktu widzenia rozpatrywanych tutaj zjawisk mechanicznych dynamicznymi będziemy nazywać te, w których powstające na skutek zmian prędkości siły bezwładności są na tyle duże w porównaniu np. z siłami obciążającymi układ, że zaniechanie ich byłoby poważnym błędem analizy. Freund [3] napisał, że **dynamiczna mechanika pękania jest gałęzią mechaniki**

pękania wydzieloną dla zagadnień, w których rola bezwładności materiału staje się istotnie ważna. Drugim wyróżnieniem zagadnień dynamicznego pękania są te sytuacje, w których własności materiału silnie zależą od prędkości zmian odkształcenia. Ostateczne rozstrzygnięcie jak podano w [5] powinno zależeć od tego czy naprężenia związane z bezwładnością materiału są porównywalne co do wielkości z naprężeniami powstającymi na skutek mechanicznego odkształcenia.

Dynamiczna mechanika pękania jest gałęzią mechaniki pękania wydzieloną dla zagadnień, w których rola bezwładności materiału staje się istotnie ważna lub gdy własności materiału silnie zależą od prędkości zmian odkształcenia; ostatecznym rozstrzygnięciem czy proces ma charakter dynamiczny jest relacja naprężeń powodowanych bezwładnością materiału do naprężeń powstałych na skutek mechanicznego odkształcenia; brak tu ścisłego rozgraniczenia.

Efekty bezwładnościowe mogą powstać bądź w wyniku gwałtownie przyłożonego obciążenia, bądź też na skutek szybkiego wzrostu pęknięcia. Pola mechaniczne przed wierzchołkiem szczeliny zależą w istotnym stopniu od zewnętrznych obciążeń przenoszonych przez fale naprężeń. Pola te generowane są również przez gwałtownie poruszający się wierzchołek szczeliny. Analiza dynamicznych zagadnień mechaniki pękania jest istotna ze względu na wyznaczenie odporności na pękanie materiału w warunkach dynamicznych obciążeń, ale także jesteśmy zainteresowani możliwościami zatrzymania szybko wzrastającej niestabilnej szczeliny, co pozwala na zapobieganie katastrofom.

Opis szczeliny w jej szybkim niestabilnym ruchu wymaga podania pewnej miary prędkości. Spotyka się następujące miary prędkości:

- prędkość deformacji w strefie zniszczenia przed wierzchołkiem pęknięcia,
- prędkość ruchu wierzchołka szczeliny,
- prędkość obciążania (wyrażona np. dla materiałów kruchych prędkością zmiany K_I współczynnika intensywności naprężeń, który jest jednoznacznie funkcją obciążeń zewnętrznych).

Pojęcie prędkości $\dot{\gamma}$ propagacji pęknięcia wykorzystuje się dla tych przypadków, gdy analizie poddaje się proces rozwoju pęknięcia i jego zatrzymania. Prędkość $\dot{\gamma}$ mierzona w m/s zależy od własności materiału, sposobu obciążenia i geometrii wierzchołka pęknięcia przed momentem inicjacji (np. sztucznie wprowadzone stępienie w wierzchołku pęknięcia). Dla polikrystalicznych materiałów konstrukcyjnych oraz dla większości materiałów amorficznych prędkość $\dot{\gamma}$ nie przekracza zazwyczaj połowy prędkości fali Rayleigha c_R . W zależności od materiału są one rzędu kilkuset m/s .

W ciele sprężystym można spotkać się z falami, które propagują się tylko na powierzchni i które w głąb ciała przenikają bardzo nieznacznie. Fale te są podobne do fal, jakie tworzą się na gładkiej powierzchni wody, gdy uderzy w nią rzucony kamień. Noszą one nazwę fal powierzchniowych. Najprostsze z nich to fale Rayleigha występujące na powierzchni swobodnej jednorodnego, izotropowego, półnieskończonego ciała stałego. Ten typ fal posiada duże znaczenie praktyczne, gdyż większe wstrząsy spowodowane trzęsieniami ziemi i zarejestrowane na sejsmografach odległych od ognisk są zazwyczaj falami Rayleigha.

Maksymalne prędkości w monokryształach przy łupliwym charakterze przelomu obserwowane były na poziomie $0,8 c_R$ [5]. Teoretyczne rozważania dla ciał kruchych przewidują maksymalną prędkość wierzchołka pęknięcia równą prędkości fali Rayleigha dla I sposobu obciążania i prędkość fali ścinania dla III sposobu obciążania. Przyczyny rozbieżności pomiędzy teorią a doświadczeniem nie są do tej pory znane. Przyjmuje się dalej, chociaż jest to trudne do ustalenia, że z praktycznego punktu widzenia należy stosować teorię uwzględniającą procesy inercyjne dla prędkości wierzchołka szczeliny powyżej $0,1 c_R$.

Testując materiał w zakresie jego odporności na pękanie w warunkach dynamicznych obciążeń (młot Charpy'ego, młot spadowy, młot rotacyjny, działko gazowe) posługujemy się pojęciem prędkości poruszającego się elementu obciążającego lub prędkością zmiany współczynnika intensywności naprężeń. Prędkości te wybiera się z zakresu od 1 m/s do 50 m/s . Przekroczenie górnej granicy prowadzi zazwyczaj do zniszczenia na skutek zjawiska fragmentacji i nie pozwala na jednoznaczną analizę rozwoju pęknięcia.

Intuicyjnie wydaje się, że prędkość spadającego bijaka młota poniżej 1 m/s nie powinna być kwalifikowana do zjawisk dynamicznych. Jednakże na dynamikę procesu zasadniczy wpływ mają drgania własne próbki wzbudzone przez uderzenie młota.

Ogólnym parametrem definiującym „dynamikę” procesu pęknięcia w ciałach liniowo-sprężystych (kruchych) jest prędkość zmiany współczynnika intensywności naprężeń $dK(\sigma_{zw}, a)/dt$:

$$\frac{dK}{dt} = \frac{\partial K}{\partial \sigma_{zw}} \frac{d\sigma_{zw}}{dt} + \frac{\partial K}{\partial a} \frac{da}{dt} \left[\frac{MPa \sqrt{m}}{s} \right] \quad (12.1)$$

Urządzenia laboratoryjne realizują obciążenia pozwalające na generowanie prędkości zmian współczynnika intensywności naprężeń dK/dt w zakresie:

- $10^{-2} \div 10^2 \text{ MPa } \sqrt{m/s}$ prawie statyczne obciążenia realizowane na urządzeniach standardowych,
- $10^2 \div 10^4 \text{ MPa } \sqrt{m/s}$ – współczesne maszyny hydrauliczne sterowane komputerem; powyżej $10^4 \text{ MPa } \sqrt{m/s}$ uważa się proces obciążania za „dynamiczny”,
- $10^4 \div 5 \cdot 10^5 \text{ MPa } \sqrt{m/s}$ – młot Charp'ego, młot spadowy,
- $> 5 \cdot 10^5 \text{ MPa } \sqrt{m/s}$ – obciążenie realizowane jest za pomocą fali naprężeń osiągalnej najczęściej za pomocą prętów Hopkinsona lub metod wybuchowych; można osiągnąć dK/dt aż do $10^9 \text{ MPa } \sqrt{m/s}$.

Zjawiska szybkiego wzrostu pęknięcia oraz inicjacji tego wzrostu pod wpływem dynamicznych obciążeń są pozornie dalekie od siebie. Należy jednak sądzić, że wspólnym mianownikiem łączącym je ze sobą jest prędkość odkształcenia mierzona w dowolnym punkcie wewnątrz strefy zniszczenia. W obydwu przypadkach prędkość ta może być bardzo wysoka i może kształtować bądź istotnie wpływać na mechanizmy zniszczenia. Obliczenie prędkości odkształcenia wewnątrz strefy

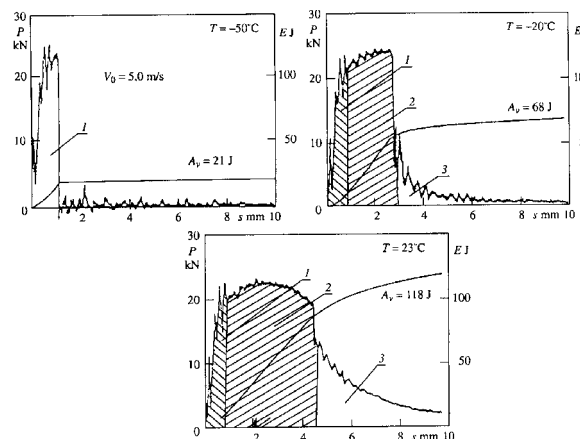
zniszczenia jest jednak bardzo trudne i chyba niemożliwe ze względu na charakter odkształceń i mikrostruktury tej strefy. Nie można stosować tam znanych narzędzi mechaniki ciała stałego. W literaturze spotykamy się z prędkościami odkształcenia w strefie zniszczenia przed wierzchołkiem pęknięcia od 10^{-3} s^{-1} do 10^5 s^{-1} . Dla wielu materiałów (np. żelazo) w zależności $\sigma_Y = f(\epsilon, d\epsilon/dt)$ krytyczne stają się prędkości rzędu $(3 \div 4) \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$. Obliczona prędkość odkształcenia tuż przed wierzchołkiem szczeliny zależy będzie od subiektywnego wyboru związku konstytutywnego, założeń co do wielkości odkształceń czy też ciągłości ośrodka. Obliczone metodą elementów skończonych prędkości oscylują wokół wartości 10^3 s^{-1} i należy je traktować z dużą ostrożnością. Dla prędkości odkształceń poniżej 1 s^{-1} nie obserwuje się istotnego wpływu prędkości procesu na wartość granicy plastyczności ani też odporności na pękanie.

Zagadnienia dynamicznej odporności na pękanie można sklasyfikować w trzech zasadniczych grupach:

- Statyczne obciążenia oraz szybki wzrost pęknięcia.
- Dynamiczne obciążenia oraz prawie statyczny wzrost bądź brak wzrostu pęknięcia.
- Dynamiczne obciążenia oraz szybki wzrost pęknięcia.

12.2. Parametry dynamicznej odporności na pękanie

Konstrukcje mechaniczne, budowlane, energetyczne itp. są często poddawane obciążeniom z dużymi prędkościami. Bezwładność materiału powoduje, że w obciążanym dynamicznie elemencie generowane są dodatkowe obciążenia, których zmiana jest na ogół rozbieżna w fazie z zewnętrznym wymuszeniem. Propagujące



s – przemieszczenie bijaka, P – siła rejestrowana w bijaku.

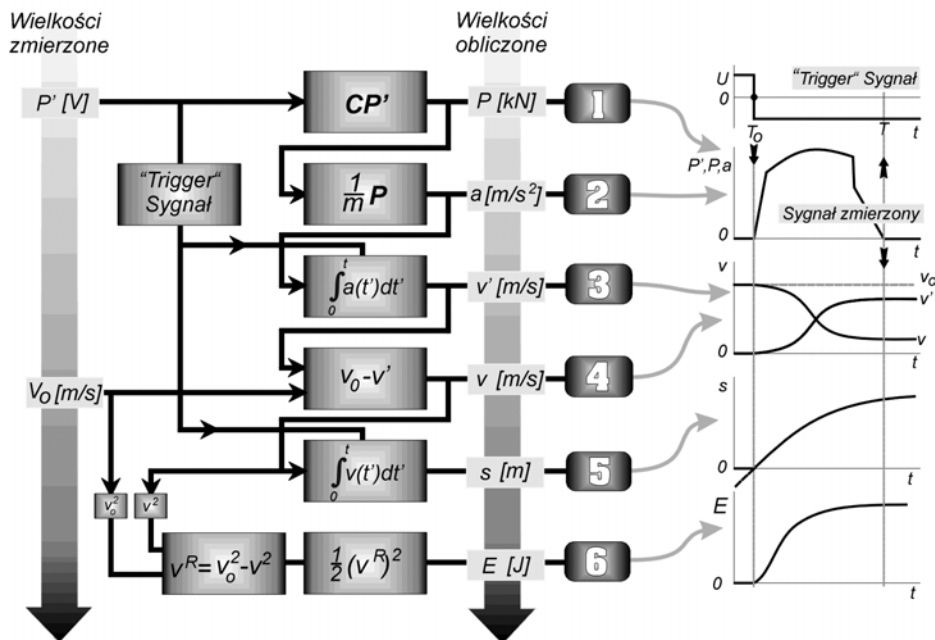
1 – energia inicjacji wzrostu pęknięcia, 2 – energia propagacji,

3 – energia dolamania

Rys.12.1. Wykres siły $P=f(s)$ w próbie Charpy'ego

fale sprężyste i drgania próbki (elementu) powodują złożony stan naprężeń. Odpowiedź materiału w wierzchołku szczeliny na zewnętrzne obciążenia, czyli współczynnik intensywności naprężeń $K_I(t)$, nie jest już liniową funkcją przemieszczenia punktu przyłożenia siły. Jest to funkcja oscylująca wokół odpowiedniej statycznej wartości, przy czym amplituda oscylacji zmienia się w czasie. Sytuacja ta-

ka powoduje, że zachowanie się sprężystej próbki dynamicznie obciążonej zależy od wielu parametrów: masy bijaka, prędkości uderzenia, podatności maszyny, geometrii próbki, długości pęknięcia, podatności próbki, modułu Younga, współczynnika Poissona, gęstości materiału i rozstawienia podpór. Złożoność zagadnienia spowodowała, że do chwili obecnej nie opracowano powszechnie akceptowanej normy, która pozwoliłaby w sposób jednoznaczny zmierzyć krytyczny dynamiczny współczynnik intensywności naprężeń. Potrzeba takiego pomiaru wynika z faktu, że nie istnieją obecnie inne parametry, które oceniałyby odporność materiału na pękanie przy dynamicznym obciążeniu. Powszechnie znana i stosowana wielkość, zwana udarnością, pozwala co najwyżej porównać ze sobą dwa materiały pod względem ilości energii, która jest niezbędna do złamania próbki. Energia ta jest jednak silnie zależna od geometrii karbu i wymiarów próbki. Za pomocą próbki typu Charpy'ego można określić temperaturę przejścia, powyżej której pękanie ma charakter ciągły, a poniżej której – kruchy. Temperatura ta zależy jednak równocześnie od geometrii. Energia Charpy'ego nie może być wykorzystywana przy projektowaniu. Nie pozwala ona na jednoznaczne skwantyfikowanie procesu, na określenie, ile energii zostało rozproszone na proces inicjacji pęknięcia, ile na proces propagacji. Aby to stwierdzić należy przeprowadzić instrumentowaną próbę Charpy'ego pozwalającą na rejestrację siły w funkcji czasu. Na rysunku 12.1 pokazano kilka przykładowych krzywych $P=f(s)$.



Rys. 12.2. Algorytm wyznaczenia przemieszczenia $s(t)$

Przemieszczenie bijaka $s(t)$ można mierzyć bezpośrednio instrumentując odpowiednio młot lub można je obliczyć ze wzorów (stosując drugie prawo dynamiki Newtona, algorytm pokazano na rysunku 12.2):

$$s(t) = \int_0^t v(\tau) d\tau, \quad v(t) = v_0 - \frac{1}{m} \int_0^t P(\tau) d\tau, \quad E(s) = \int P(s) ds \quad (12.2)$$

$v(t)$ jest prędkością bijaka, m jest masą bijaka, $P(t)$ – zarejestrowaną funkcją siły, v_0 – prędkością bijaka w momencie pierwszego kontaktu z próbką. $E(s)$ – energią.

12.2.1. Pomiar krytycznej, dynamicznej wartości współczynnika intensywności K_{Id}

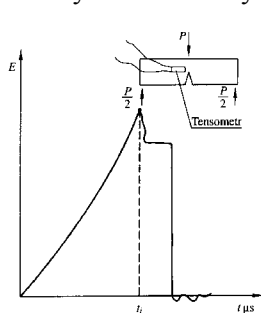
Pomiar K_{Id} może mieć miejsce tylko dla materiałów kruchych, dla których naprężenia oblicza się w oparciu o liniową teorię sprężystości. Wyznacza się go na instrumentowanym młocie Charpy'ego lub młocie spadowym. Istnieje obecnie kilka propozycji wyznaczenia tej wielkości i do tej pory nie ma jeszcze opracowanego standardu. Poniżej przedstawimy jeden z możliwych algorytmów, który będzie zrealizowany w ramach przeprowadzanych ćwiczeń.

Parametr K_{Id} wyznacza się na próbkach typu Chapry'ego (do wyznaczania udarności), które różnią się od klasycznych tym, że w dnie karbu inicjuje się szczelinę zmęczeniową o długości około 1 mm tak, aby sumaryczna długość karbu i szczeliny a_0 mieściła się w zakresie $0,45 \leq a_0 \leq 0,55$, gdzie W jest szerokością próbki ($W=10$ mm). Siła użyta przy zmęczeniu próbki powinna być mniejsza niż $0,6F_Y$, gdzie $F_Y = 4B(W - a_0)^2 \sigma_Y / 3S$, B jest grubością próbki, S jest rozstawem podpór, σ_Y jest granicą plastyczności. Dla materiałów, które charakteryzują się liniową zależnością pomiędzy siłą a przemieszczeniem przed momentem inicjacji wzrostu pęknięcia, siłę F_Y należy zastąpić siłą P_i zmierzoną w momencie inicjacji. Prędkość uderzenia bijaka nie powinna na ogół przekraczać 5,5 m/s. Podczas kalibracji bijaka wraz z czujnikiem siły, błąd liniowości i histerezy powinien być zawarty w zakresie 2% rejestrowanej siły. Na tak przygotowanym stanowisku przeprowadza się próbę i rejestruje siłę w funkcji czasu. Na ogół otrzymany wykres charakteryzuje się silnymi oscylacjami o zmniejszającej się w czasie amplitudzie. Będą one tym większe, im materiał jest bardziej kruchy oraz długość próbki i prędkość obciążenia większa. Wielkość oscylacji zależy również od podatności maszyny i próbki. Od wielkości oscylacji zależy sposób analizy otrzymanych krzywych w celu wyznaczenia K_{Id} . Jeśli zanikają, to proponuje się tzw. analizę prawie statyczną, polegającą na zarejestrowaniu sygnału siły wraz z momentem inicjacji wzrostu pęknięcia oraz skorzystanie ze wzoru:

$$K_I = \frac{PS}{BW^{3/2}} \frac{3(\alpha)^{1/2} \{1,99 - \alpha(1-\alpha)[2,15 - 3,93\alpha + 2,7\alpha^2]\}}{2(1+2\alpha)(1-\alpha)^{3/2}} \quad (12.3)$$

P jest zarejestrowaną siłą w momencie inicjacji, ($P=P_i(t=t_i)$), S rozstawieniem podpór ($S=4W$), a długość szczeliny, $\alpha=a/W$, B i W grubość i szerokość próbki.

Moment inicjacji wzrostu pęknięcia oszacować można w różny sposób. Dla materiałów bardzo kruchych moment ten jest utożsamiany z maksymalną siłą występującą tuż przed jej gwałtowną redukcją. Bardziej wiarygodny rezultat otrzymuje się jednak stosując jedną z dwóch technik: pomiar momentu spadku naprężeń przed frontem szczeliny oraz pomiar sygnału magnetycznego (dla ferromagnetyków) generowany przez inicjowany wzrost pęknięcia. Omówimy pierwsze rozwiązanie. W tym celu należy przykleić przed frontem szczeliny tensometr pod kątem



Rys. 12.3. Pomiar czasu inicjacji

90° w stosunku do kierunku propagacji i zarejestrować odkształcenie w trakcie próby. Pokazano to na rysunku 12.3. Do badań należy użyć tensometru o bazie $1,5\text{ mm}$, którego nie trzeba kalibrować.

Dyskusyjny jest sposób oceny czy efekty dynamiczne zostały w sposób dostateczny wytłumione, aby prowadzić analizę prawie statyczną. Spotyka się w literaturze kilka podejść. Przytoczymy jedno z nich, w którym stwierdza się, że jeśli czas pomiędzy momentem uderzenia w próbkę a momentem inicjacji pęknięcia jest

dłuższy niż 3τ , to zagadnienie jest prawie statyczne i można skorzystać ze wzoru pokazanego poniżej, gdzie τ jest umownym okresem oscylacji siły $P(t)$:

$$\tau = \frac{1,68(SWBCE)^{1/2}}{c_0}$$

C w tym wzorze jest podatnością próbki, c_0 prędkością fali w ośrodku (ok. 5000 m/s dla stali), E modem Younga, S, W, B są wymiarami próbki. Podane informacje stanowią niezbędne minimum dla wyznaczenia krytycznej

wartości K_{Id} . W celu znacznie szerszego spojrzenia na problem wyznaczenia K_{Id} i zapoznania się z obecnym stanem wiedzy na ten temat należy sięgnąć do pracy [5] (rozdz. 6.3).

12.2.2. Pomiar krytycznej dynamicznej wartości całki J_{Id}

Dla wielu materiałów konstrukcyjnych warunek $r_p \leq 0,01a$, B, W , gdzie r_p jest długością strefy plastycznej nie jest spełniony. Dla takich przypadków posługiwanie się współczynnikiem intensywności naprężeń traci sens fizyczny. Tradycyjnie już w mechanice pękania przyjmuje się, że całka J może opisywać zachowanie się materiałów sprężysto-plastycznych zawierających szczelinę. Całka J jest niezmiennicza od konturu całkowania. Niezmienniczość tą można wykazać jedynie dla takiego materiału, dla którego gęstość energii odkształcenia w jest jednoznacznie funkcją odkształcenia $w(\epsilon_{ij})$. Wówczas naprężenia są definiowane jako:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial w(\varepsilon_{ij})}{\partial \varepsilon_{ij}}$$

Taka zależność jest prawdziwa dla liniowych i nieliniowych ciał sprężystych oraz dla ciał plastycznych wg deformacyjnej teorii plastyczności, lecz tylko w przypadku obciążeń proporcjonalnych. Dla ciał plastycznych nie są dopuszczalne odciążenia w żadnym punkcie ciała, w przeciwnym przypadku powyższa zależność nie jest jednoznaczna. Całka J w swej podstawowej postaci nie miałaby tak istotnego znaczenia dla mechaniki pęknięcia, gdyby nie jej interpretacja fizyczna. Można wykazać, że dla ciała nieliniowo sprężystego, oznacza ona zmianę energii potencjalnej Π ciała ze szczeliną podczas zmiany jej długości o infimezmalną wartość da . Wówczas zapisać to możemy we wzorze poniżej w którym T_i^0 jest obciążeniem na

$$J = -\frac{\partial \Pi}{\partial a},$$

$$\Pi = \int_V w(\varepsilon_{ij}) dV - \int_S T_i^0 u_i ds$$

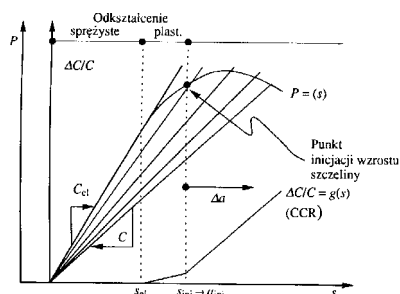
brzegu próbki spełniającym zależność $T_i^0 = \sigma_{ij} n_j$, V jest objętością próbki przy jednostkowej grubości, S jest brzegiem próbki. Dla ciał plastycznych powyższą definicję zależałoby zmienić na: całka J jest różnicą pomiędzy energiami potencjalnymi dwóch prawie identycznych, obciążonych elementów różniących się jedynie długością szczeliny o wartości da . Ta pozornie błaha różnica w definicjach całki J dla ciał nieliniowo sprężystego i plastycznego ma istotne znaczenie. W przypadku obciążenia z dużymi prędkościami, całka J przestaje być całką niezmienniczą od drogi całkowania ze względu na fakt oddziaływania wierzchołka pęknięcia z wielokrotnie odbitą falą sprężystą od powierzchni próbki. Nie traci jednak sensu fizycznego definicja całki J jako różnica energii potencjalnej dwóch obciążonych próbek różniących się od siebie jedynie długością szczeliny o da . Prawdziwy zatem pozostaje wzór:

$$J = \frac{\eta A}{b_0 B_N}$$

w którym η parametr określający kształt próbki do pomiaru J_{IC} , b_0 początkowa długość nie pękniętego odcinka próbki przed frontem szczeliny, B_N efektywna grubość próbki, $B_N=B$ dla próbki gładkiej. Krytyczną dynamiczną całkę J (J_{Id}) można w zasadzie obliczyć pod warunkiem że znana byłaby powierzchnia $A=A_i$ pod krzywą $F(t)-s(t)$ w momencie inicjacji wzrostu. Ponieważ jednak problemy techniczne z wyznaczeniem momentu inicjacji wzrostu są jednak znacznie większe niż dla próby statycznej pozostaje stosować metody, które z mniejszym lub większym sukcesem pozwalają pomimo tego braku wyznaczyć krytyczną wartość tego parametru. Metody te można podzielić w zależności od ilości użytych próbek do wykonania testu na metody jednej próbki i metody wielu próbek. Z kilku metod pojawiających się w literaturze zaprezentowane zostaną dwie:

- metoda zmian podatności (metoda jednej próbki),
- metoda zatrzymanego bijaka (ang. *stop block*) (metoda wielu próbek).

Metoda zmian podatności (metoda jednej próbki). Metoda ta zaproponowana przez Tsenga i Makrusa [10] oraz rozwijana w pracach Kobayashiego [11] polega na wykonaniu testu dla jednej próbki na instrumentowanym młocie i wykonaniu



Rys. 12.4. Schemat określenia momentu inicjacji za pomocą metody zmiany podatności

jest zero. W obszarze plastycznej deformacji obserwuje się stałe przyrosty $\Delta C/C_{el}$, które zależą od współczynnika umocnienia materiału, natomiast gdy szczelina inicjuje swój ruch $\Delta C/C_{el}$ wzrasta istotnie podczas zmniejszania się przekroju próbki. Przyjęto interpretować wyraźne przegięcie tak wyznaczonej krzywej jako punkt inicjacji. Metoda wymaga starannego przygotowania wykresów zarejestrowanych (odfiltrowanych i wygładzonych) tak, by zakłócenia rejestrowanych wykresów nie wpływały na wyznaczenie punktu przegięcia.

Metoda wielu próbek (metoda zatrzymanego bijaka). Polega na wykreśleniu „dynamicznej” krzywej $J-R$. W tym celu wykonuje się kilka identycznych próbek z zainicjowaną szczeliną zmęczeniową. Próbkę tę obciąża się na młocie typu Charpy’ego lub spadowym wyposażonym w sztywny zderzak. Rolą zderzaka jest zatrzymanie bijaka młota w ten sposób, aby za każdy razem otrzymać inny przyrost długości szczeliny. Oznacza to, że próbka pozostaje nie złamana a część energii kinetycznej bijaka młota zostaje przejęta przez sztywne uderzenie bijaka w zamontowane ograniczniki. Za każdym razem rejestruje się wykres siły $P(t)$ i kreśli wykres $P=f(s)$ (s podobnie jak poprzednio może być obliczone z zarejestrowanego wykresu siły w czasie lub zmierzone). Można więc określić powierzchnię A dla każdego przyrostu długości szczeliny Δa . Długość szczeliny mierzy się po próbie (po dołamaniu próbki), za pomocą mikroskopu warsztatowego. Następnie wykreśla się krzywą $J-R$, czyli funkcję $J=f(\Delta a)$ w podobny sposób, jak dla obciążeń statycznych (rozdz. 9 skryptu) korzystając z norm dla określenia J_{lc} . Przecięcie się linii regresji (liniowej lub nieliniowej) krzywej $J-R$ z linią stępidła określa wartość J_{ld} .

Zaletą pierwszej z metod jest stosowanie do wyznaczenia krytycznej dynamicznej wartości całki J tylko jednej próbki wadą zaś nie zawsze wyraźnie czytelny punkt przegięcia. W przypadku drugiej metody wadą jest konieczność użycia wielu próbek i znaczny wysiłek doświadczalny zaletą zaś wyznaczenie krytycznej dynamicznej wartości całki J na podstawie liczniejszego zbioru wyników eksperymentalnych. Zalecane jest wykorzystanie pierwszej z metod a gdy wynik jest trudny do uzyskania dodanie próbek i przeprowadzenie badań wg drugiej z metod. Więcej na ten temat można przeczytać w pracach [4,5,11] oraz rozdz. 6.4 w pracy [5].

rysunku zależności $P=f(s)$ gdzie P – siła rejestrowana na bijaku młota podczas testu zaś s przemieszczenie bijaka młota (s może być obliczone lub zmierzone). Następnie rysujemy na tym wykresie zależność: $\Delta C/C_{el}=f(s)$ gdzie $\Delta C=C-C_{el}$, C jest podatnością (nachyleniem linii „odciążenia”) mierzoną wzdłuż krzywej P,s [mm/N], C_{el} jest podatnością sprężystą wyznaczoną dla liniowo-sprężystej części wykresu, (rys. 13.4).

W obszarze sprężystego odkształcenia, gdy podatność próbki jest stała, $\Delta C/C_{el}$ równe

12.3. UDARNOŚĆ

Oprócz wskazanych wcześniej metod wyznaczenia odporności na pękanie, które zaliczamy do metod ilościowych istnieje cała gama tzw. prób technologicznych, które mają charakter jakościowy. Najczęściej używa się tego typu metod do odbioru stali w hutach i określania jakości złączy spawanych czy też porównania jakości różnych gatunków stali. Te metody mimo rozwoju mechaniki pękania funkcjonują dalej, dzięki przede wszystkim prostocie prób i przyzwyczajeniu jakie odgrywa istotną rolę w przemyśle. Spośród tych metod wybierzemy udarność.

Próba udarności polega na dynamicznym łamaniu próbek o przekroju poprzecznego kwadratowego $10 \times 10 \text{ mm}$ mających z jednej strony nacięty karb. W Polsce obowiązuje obecnie norma europejska przetłumaczona na język polski o numerze PN-EN 10045-1. Norma ta rozróżnia dwa rodzaje karbów:

- karb w kształcie litery V o kącie 45° , głębokości 2 mm i promieniu zaokrąglenia jego dna $0,25 \text{ mm}$,
- karb w kształcie litery U o kącie 45° , głębokości 5 mm i promieniu zaokrąglenia jego dna 1 mm .

Udarnością nazywa się energię potrzebną na złamanie określonej próbki na stanowisku do dynamicznego obciążania odniesioną do przekroju łamanej próbki. W przypadku klasycznego młota Charpy'ego mierzy się położenie (kątowe) ramienia bijaka przed próbą i po złamaniu (wskazówka położenia bijaka jest zatrzymana w jego maksymalnym położeniu). W przypadku innych urządzeń musi istnieć możliwość pomiaru energii początkowej ruchomego bijaka i energii po złamaniu próbki.

Standardowe warunki badania powinny odpowiadać energii początkowej maszyny $300 \pm 10 \text{ J}$. Jeżeli jest inaczej to należy to zaznaczyć w podanym wyniku próby np. oznaczenie:

- *KU 120* – oznacza energię złamania próbki z karbem U równą 120 J na młocie o energii początkowej 300 J ,
- *KV 115* – oznacza energię złamania próbki z karbem V równą 115 J na młocie o energii początkowej 300 J ,
- *KU 103: o początkowej energii 200 J* – oznacza energię złamania próbki z karbem U równą 103 J na młocie o energii początkowej 200 J ,
- *KV 126: o początkowej energii 500 J* – oznacza energię złamania próbki z karbem U równą 126 J na młocie o energii początkowej 500 J .

Tak zmierzony parametr ma oczywiście tylko znaczenie jakościowe bo jest wyznaczony dla określonej geometrii próbki i kształtu karbu. Gdybyśmy zmienili geometrię to zmieni się także wartość tego parametru. Tak zachowujący się parametr nie może być stałą materiałową bo wartość takiej stałej nie może zależeć od parametrów próby i geometrii próbki. W przypadku udarności wykonuje się próby dla różnych temperatur (uzyskując krzywą udarności charakteryzująca temperaturę przejścia materiału w stan kruchy przy danym kształcie karbu).

Istotny jest fakt, że udarność służy do klasyfikacji stali, do łatwego porównania jakości stali przy odbiorze, natomiast badania K_{Ic} określa charakterystykę odporności materiału na pękanie w sposób ilościowy. Wyniki K_{Ic} można stosować w obliczeniach, podobnie jak R_e czy R_m natomiast wyników badań udarności nie można uwzględniać w obliczeniach wytrzymałości konstrukcji.

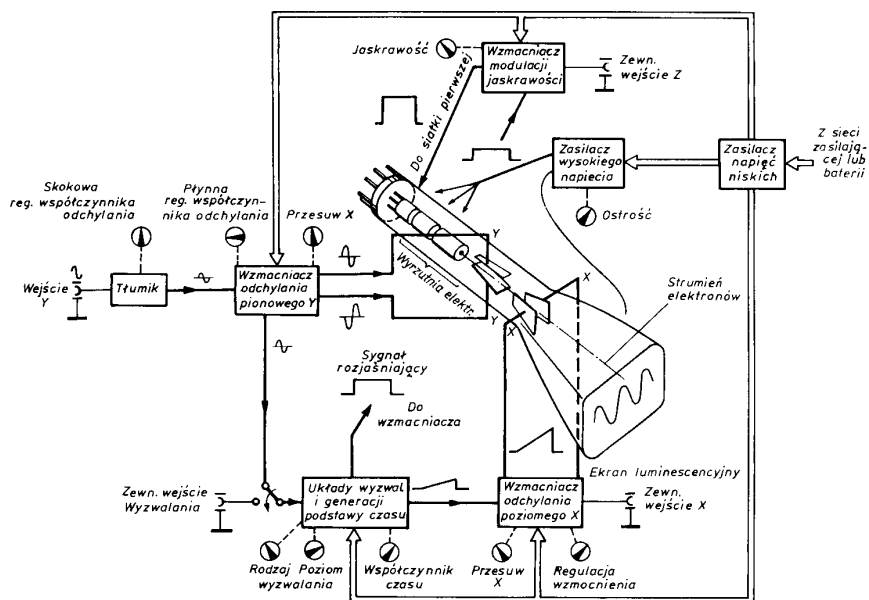
12.4. STANOWISKO BADAWCZE *

12.4.1. Pomiary w warunkach szybkozmiennych sygnałów

W przypadkach pomiaru szybkozmiennych sygnałów w czasie stosuje się oscyloskopy pomiarowe. Poniżej przedstawiono krótki opis działania oscyloskopu, ponieważ stanowi on podstawowe wyposażenie stanowiska pomiarowego. Jest on na tyle użytecznym i wszechstronnym elektronicznym urządzeniem pomiarowym, że trudno sobie wyobrazić inżyniera dokonującego pomiary bez znajomości wspaniałych możliwości jakie posiadają współcześnie produkowane tego typu urządzenia. Oscyloskop służy głównie do „oglądania” przebiegów napięć występujących w funkcji czasu. Jego wyzwalanie w określonej chwili rejestrowanego sygnału wejściowego umożliwia otrzymanie nieruchomego obrazu. Podstawową rolę w tym przyrządzie pełni lampa oscylograficzna. Obrazy sygnałów elektrycznych są kreślone za pomocą wiązki elektronowej na szklanym ekranie pokrytym luminoforem, czyli materiałem pobudzającym do świecenia pod wpływem bombardowania elektronami. Ich wiązka emitowana jest z działła elektronowego, którego pracę kontroluje odpowiedni wzmacniacz, za pomocą którego ustala się jasność plamki na ekranie. Wiazka podlega uformowaniu w układzie soczewek elektrostatycznych sterowanych odpowiednio z zasilacza wysokiego napięcia. Dalej elektrony biegną przez obszar, w którym prostopadle do ich kierunku ruchu działają na nie odchylające pola elektrostatyczne. Pola te są wytwarzane przez dwie pary płytek odchylających. Napięcia przykładane do nich ze wzmacniaczy odchylania poziomego X i pionowego Y są proporcjonalne do chwilowych wartości badanych sygnałów. W ten sposób powstaje na ekranie krzywa obrazująca zależność między tymi sygnałami. Większość oscyloskopów ma dwa kanały, co jest bardzo przydatne gdy trzeba zbadać związek między dwoma sygnałami. Każdy kanał jest wyposażony w kalibrowany przełącznik wzmocnienia, którym ustawia się skalę pionową na ekranie (w woltach na działkę – *volts/DIV*). Istnieje też pokrętło płynnej regulacji wzmocnienia używane wtedy, gdy trzeba sygnał wpasować w określoną liczbę działek. Oscyloskop ma wejście stałoprądowe (DC) co jest bardzo ważne – dzięki temu można obserwować równocześnie składową zmienną i składową stałą sygnału doprowadzonego do wejścia. Przełączniki wejściowe toru odchylania pionowego większości oscyloskopów mają także pozycje oznaczone symbolem masy

* Zaleca się przeczytanie paragrafów 12.4.1, 12.4.2. Szczegóły w przygotowaniu oscyloskopów do pracy nie będą wymagane

(*GND*), które służą do ustalenia położenia na ekranie linii odpowiadających *O* *V* napięć wejściowych. W bloku wzmacniacza odchylenia pionowego znajdują się pokrętła przesuwające obraz w pionie (*POSITION*), przełącznik odwracania fazy sygnału (*INVERT*) w co najmniej jednym kanale oraz przełącznik trybu pracy (*INPUT MODE*). Ten ostatni umożliwia oglądanie sygnału w wybranym kanale, obu sygnałów lub ich sumy (albo różnicy).

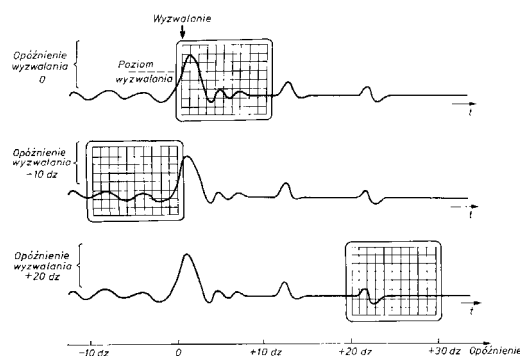


Rys. 12.5. Schemat blokowy oscyloskopu analogowego [7]

łów. Sygnał wejściowy jest doprowadzony do układu odchylenia pionowego i powoduje przesuwanie plamki na ekranie w górę i dół. Sygnał odchylenia poziomego jest wytwarzany przez wewnętrzny generator przebiegu pikokształtnego, realizujący odchylenie proporcjonalne do czasu. Podobnie jak w przypadku odchylenia pionowego mamy do dyspozycji skalibrowany przełącznik rozciągu poziomego *time/DIV*. Istotną operacją w pracy oscyloskopu jest wyzwalanie. Mamy ustalony sygnał odchylenia pionowego i sygnał odchylenia poziomego. Są to wystarczające sygnały aby zobrazować przebieg w czasie. Jeżeli jednak początek odchylenia poziomego nie rozpocznie się za każdym razem w tym samym punkcie przebiegu

wejściowego (przy założeniu powtarzalności sygnału wejściowego) obraz będzie zawierał szereg nakładających się na siebie krzywych przesuniętych w czasie. Dlatego też układ wyzwalania pozwala wybrać poziom (*LEVEL*) i zboczce (*SLOPE* – nachylenie krzywej) sygnału od którego ma się zacząć odchylenie w poziomie. Istnieje możliwość wyboru źródła wyzwalania i trybu wyzwalania. W trybie *NORM* podstawa czasu jest wyzwalana tylko w momencie przejścia sygnału wyzwalającego przez ustawiony poziom w kierunku określonym zboczem (rosnącym lub malejącym). Gdy badane są zależności czasowe mierzonego sygnału, do wzmacniacza odchylenia poziomego dostarczany jest sygnał pikokształtny z generatora podstawy czasu. Podczas jednego cyklu podstawy czasu plamka przebiega po ekranie od lewej do prawej strony, po czym następuje jej powrót. Na czas powrotu jest ona wygaszana przez dostarczenie odpowiedniego impulsu do wzmacniacza modulacji jasności, po to by na ekranie oscyloskopu nie został wytworzony niepotrzebny obraz. Możliwe jest też odłączenie generatora podstawy czasu i skierowanie do wejścia wzmacniacza odchylenia poziomego innego dowolnego sygnału. Podobnie możliwe jest dostarczenie zewnętrznego wyzwalania (*External Trigger*). Powyższy opis dotyczył działania oscyloskopu analogowego. Z punktu widzenia użytkownika istotne staje się nie tylko wizualizacja obserwowanego przebiegu na ekranie (lampie oscyloskopowej), ale możliwość jego zapamiętania. Oczywiście, jeżeli przebieg jest powtarzalny możliwe jest to na zwykłym analogowym oscyloskopie. W przypadku przebiegów jednorazowych wymagane jest przetwarzanie w czasie rzeczywistym z możliwością pamiętania obrazu. Taką rolę spełniają min. oscyloskopy z lampą pamiętającą, wyposażone w specjalną lampę, która umożliwia obserwację przebiegu jak w oscyloskopie ze zwykłą lampą (tj. w czasie rzeczywistym) lub zapamiętanie wewnątrz lampy obrazu przebiegu jednorazowego lub powtarzalnego i wyświetlanie go przez pewien czas na ekranie. Innym rozwiązaniem jest oscyloskop próbkujący, który przeznaczony jest do pomiarów bardzo szybkich przebiegów powtarzalnych. W oscyloskopie takim następuje sukcesywne pobieranie próbek sygnału, kolejno z innego fragmentu przebiegu za każdym następnym okresem, a następnie złożenie całego obrazu z punktów i wyświetlenie go na ekranie. Dla pomiarów przebiegów jednorazowych jakich spodziewamy się w czasie omawianych prób doskonale nadaje się oscyloskop cyfrowy. Jego działanie polega na pobieraniu próbek badanego przebiegu, równych wartości chwilowej sygnału w czasie próbkowania oraz po zamianie wartości próbki na kod cyfrowy zapamiętaniu go w pamięci cyfrowej. Przy pomiarze przebiegów powtarzalnych próbki mogą być pobierane analogicznie jak w oscyloskopie próbkującym w sposób przypadkowy. Natomiast przy pomiarze przebiegu jednorazowego próbki są pobierane w czasie rzeczywistym. Ten sposób próbkowania znacznie zawęża pasmo oscyloskopu cyfrowego, które dla przebiegów jednorazowych jest znacznie węższe niż dla przebiegów powtarzalnych. O paśmie decyduje liczba próbek na sekundę jaką dysponuje dany oscyloskop. Na przykład, jeżeli przyjmiemy, że na przybliżone odtworzenie przebiegu sinusoidalnego trzeba czte-

rech próbek, to przy częstotliwości próbkowania 20 MHz maksymalna częstotliwość oscyloskopu wyniesie $20\text{ MHz}/4=5\text{ MHz}$ [7]. Raz zapamiętany w pamięci cyfrowej sygnał jest wyświetlany na ekranie z częstotliwością większą niż 50 Hz , tak że obraz nie jest migocący, niezależnie od tego, jak powolny był oryginalny badany przebieg. Zapamiętany sygnał w pamięci pozwala na przeprowadzenie wielu operacji matematycznych np. uśrednianie usuwające szумы i zakłócenia, obliczenie wartości skutecznej. Istotna jest możliwość przesłania sygnału z pamięci do in-



Rys. 12.6. Położenie obrazu na ekranie w zależności od wartości opóźnienia cyfrowego [7]

nych urządzeń cyfrowych np. komputera *PC* i dalsza obróbka uzyskanych wyników. Do głównych parametrów oscyloskopu cyfrowego należą: pasmo dla przebiegów jednorazowych, pasmo dla przebiegów powtarzalnych, częstotliwość próbkowana, zdolność rozdzielcza w kierunku osi pionowej *Y* i osi poziomej *X*. Najczęściej wynosi ona od 8 bitów (256 poziomów) do 10 bitów (1024 poziomów). Mierzony przebieg powtarzalny może być w pamięci zamrożony na stałe i pomimo odjęcia sygnału od wejścia oscyloskopu może być odtwarzany długo na ekranie (*stored trace*). Przy tym sposobie pracy oscyloskopu cyfrowego zmiany występujące w sygnale w trakcie pomiarów po czasie jego zamrożenia nie są widoczne. Możliwe jest też uzyskanie obrazu aktywnego (*active trace*) przez stałe kasowanie zawartości pamięci i ponowne jej wypełnienie sygnałem o aktualnym w danej chwili kształcie. Przebieg jednorazowy może być odtworzony oczywiście tylko przy pracy z zamrożeniem. W oscyloskopie cyfrowym zbieranie danych może zachodzić niezależnie od chwili wyzwalania. Przebieg może być zapamiętany w dowolnej relacji czasowej w stosunku do impulsu wyzwalającego. Przedwyzwalanie jest możliwe dlatego, że **układ próbkujący stale próbkuje przebieg wejściowy, a impuls wyzwalający jedynie ustala chwilę jego zamrożenia w pamięci**. Chwilę tę można z góry ustalić. Oczywiście istnieje także możliwość opóźnienia obrazu przebiegu w stosunku do impulsu wyzwalającego (*post-trigger viewing*).

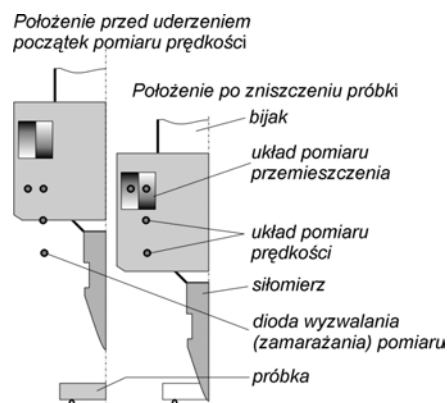
Na rysunku 12.6 pokazano jaki fragment przebiegu zostanie przedstawiony na ekranie oscyloskopu cyfrowego w zależności od wartości opóźnienia wyzwalania. Wartość wyprzedzenia zamrożonego w cyfrowej pamięci obrazu określa się w jednostkach czasu, w liczbie działek lub w procentach od pełnej osi *X* na ekranie [7]. Na ekranie oscyloskopu możemy zobaczyć literkę *T*, która oznacza punkt wyzwalania (*trigger point*) a jej położenie względem osi czasu wskazuje na ustawione

przedwyzwalanie (*pre-trigger viewing*). Zwracamy uwagę na taką możliwość oscyloskopu cyfrowego, ponieważ przedwyzwalanie jest szczególnie użyteczne przy badaniu przebiegów o złożonym kształcie i zjawisk jednorazowych. Umożliwia np. obejrzenie przebiegu w czasie poprzedzającym główne zjawisko, występujące w momencie krytycznym, jak np. pęknięcie materiału przy badaniach wytrzymałościowych.

W ramach ćwiczeń zostanie wykorzystany czterokanałowy oscyloskop cyfrowy firmy *HEWLETT PACKARD* model *HP54602B*. Główne parametry to pasmo oscyloskopu 150 MHz (kanał 1 i 2), 250 MHz (kanał 3 i 4), rozdzielczość pionowa 2 mV/div do 5 V/div, rozdzielczość pozioma 5 s/div do 2 ns/div, przedwyzwalanie (*pre-trigger viewing*) ≥ 10 div, maksymalne próbkowanie 20 MSa/s, długość rekordu 4000 punktów, pasmo dla pojedynczych przebiegów 2 MHz (pojedynczy kanał) lub 1 MHz (dwa kanały).

12.4.2. Instrumentowany młot spadowy

Przeprowadzenie próby pomiaru dynamicznej odporności na pękanie wymaga odpowiedniego stanowiska badawczego. Od takiego stanowiska wymagamy możliwości przyłożenia obciążenia z odpowiednią prędkością oraz pomiaru wybranych parametrów mechanicznych. Tradycyjnie zaadoptowano do tego celu znane rozwiązania tj. młot typu Charpy'ego lub młot spadowy. Młot spadowy ma pewną przewagę na młotem Charpy'ego ponieważ pozwala na uzyskanie większych prędkości uderzenia.



Rys. 12.7. Układy pomiarowe w instrumentowanym młocie spadowym

Wyposażenie tych urządzeń w odpowiednie tory pomiarowe czyni z nich instrumentowane stanowiska badawcze. W Laboratorium Mechaniki Doświadczalnej znajduje się urządzenie typu młot spadowy. Zostało ono zaprojektowane przez pracowników Katedry Podstaw Konstrukcji Maszyn. Jest to młot spadowy pozwalający na uzyskanie maksymalnej prędkości uderzenia bijaka w próbkę 10 m/s. Oryginalne są czujniki pomiarowe, które pozwalają mierzyć siłę w bijaku młota, przemieszczenia bijaka młota, prędkość przed uderzeniem w próbkę i po jej złamaniu (rys. 12.7). Dodatkowo pomiar w warunkach szybkozmiennych sygnałów w czasie wymaga

przygotowania odpowiedniego sygnału wyzwalającego układ pomiarowy (*TRIGGER*). W tym rozwiązaniu wykorzystano strumień świetlny diody elektroluminescencyjnej, który jest przecinany przez element związany z ruchomym bija-

kiem młota. Odpowiedni układ elektroniczny kształtuje zbocze tego sygnału tak, by mogło ono wyzwolić układ pomiarowy. W torach pomiarowych zainstalowano oscyloskop cyfrowy HP 54602B. System pomiarowy wyposażono w pakiet programów komputerowych do transmisji i archiwizacji danych. Wymienimy tu program *DF-CONF* do konfiguracji torów pomiarowych, *DF-KALIB* program do kalibracji torów pomiarowych, *DF-VIS* program do wizualizacji i wstępnej analizy pomiarów. Ostatecznie student otrzymuje plik końcowy, (jest to plik tekstowy) który będzie można obrabiać w ramach dalszej analizy w inżynierskich programach obliczeniowych (np. *MATHCAD*).

12.5. REALIZACJA ĆWICZENIA

12.5.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenia parametrów dynamicznej odporności na pękanie oraz poznanie stanowiska badawczego do badań dynamicznej odporności na pękanie.

12.5.2. Przebieg ćwiczenia

W ramach ćwiczenia wykonane zostaną pomiary dwóch parametrów określających dynamiczną odporność na pękanie K_{Id} i J_{Id} . Pomiar obu tych parametrów wymaga podobnego postępowania przy rejestrowaniu sygnałów pomiarowych. Pełna procedura pomiarowa składa się z następujących etapów:

1. Przygotowanie próbki.
 2. Przygotowanie młota spadowego.
 3. Przygotowanie oscyloskopu pomiarowego.
 4. Wykonanie próby.
 5. Transmisja danych do komputera pomiarowego.
 6. Kalibracja otrzymanych wyników.
 7. Przygotowanie wyników do analizy – wstępna obróbka danych (wygładzanie).
 8. Analiza otrzymanych wyników i wyznaczenia wg odpowiedniego algorytmu odpowiedniego parametru odporności na pękanie.
- *Ad.1.* Przygotowanie próbki obejmuje oprócz odpowiedniej obróbki cieplnej wykonanie szczeliny zmęczeniowej. Obydwie te czynności zostaną wykonane wcześniej ze względu na ich pracochłonność. Studentowi pozostawia się wykonanie pomiaru geometrii próbki, i ustalenie pełnej informacji dotyczącej parametrów obróbki cieplnej oraz procesu zmęczenia w celu wykonania szczeliny zmęczeniowej. Informacje te będą zamieszczone w protokole testu.
 - *Ad.2.* Przygotowanie młota spadowego obejmuje: ustalenie bądź zmianę masy ruchomej bijaka (decyduje o wartości energii kinetycznej w momencie uderzenia w próbkę); ustawienie początkowego położenia bijaka młota (decyduje

o prędkości uderzenia bijaka w próbkę); dla metody wielu próbek przy wyznaczaniu całki J należy ustalić grubość podkładek *stop bloku* i zamontować je. W końcu należy ułożyć centralnie próbkę na podporach.

- *Ad.3.* Pomiar obejmował będzie siłę w bijaku, przemieszczenie i prędkość bijaka tuż przed jego uderzeniem w próbkę. Siła i przemieszczenie bijaka rejestrowane będą w czasie za pomocą oscyloskopu pomiarowego, prędkość rejestrowana jest w postaci cyfrowej i wyświetlana na wskaźniku ciekłokrystalicznym. Przygotowania wymaga każdy z torów pomiarowych tzn. ustawienia wzmocnienia, zera wzmacniacza itd. Oscyloskop pomiarowy dzięki któremu możliwe jest zarejestrowanie szybkozmiennych sygnałów w czasie wymaga wyboru trybu pracy *Single* oraz odpowiedniego sposobu wyzwalania (w tym przypadku przygotowano sygnał cyfrowy, którego zbocze rosnące wyzwala układ pamiętania oscyloskopu). Istotne ustawienia oscyloskopu dotyczą rozdzielczości poziomej (czas) i rozdzielczości pionowej (napięcie rejestrowane z czujnika). Przy złych ustawieniach wymienionych parametrów zarejestrowane przebiegi mogą w ogóle nie nadawać się do analizy i próba zostanie zaliczona do nieważnych. Wszystkie te ustawienia zostaną wykonane z prowadzącym ćwiczenie.
- *Ad.4.* Wykonanie testu wymaga ustawienia oscyloskopu w położenie *Run*, wyzerowanie układu pomiaru prędkości i zwolnienie zaczepu utrzymującego bijak młota. W takim układzie zewnętrzny sygnał wyzwalający uruchomi jednokrotną rejestrację sygnałów. Należy zachować ostrożność przy wykonywaniu najważniejszej czynności testu ze względu na nieprzewidziane zachowanie się próbki (lub jej fragmentów) w czasie uderzenia.
- *Ad.5.* Najważniejszą czynnością po wykonaniu próby jest zachowanie wyników w pamięci komputera. Wymaga to przesłania zawartości pamięci oscyloskopu do pamięci komputera za pomocą standardowego portu (w tym przypadku *RS-232C*). W tym celu uruchamiamy program *BENCHLINK*, a następnie po określeniu numerów kanałów oscyloskopu z których następował będzie transport danych uruchamiamy transmisję. Następnie zapisujemy ten plik wybierając rozszerzenie *.dat i nadając mu odpowiednią nazwę (ustalają studenci) oraz folder docelowy.
- *Ad.6.* Otrzymane wyniki są wyrażone w postaci zmiany napięcia odpowiedniego czujnika w czasie. Wymaga to jeszcze transformacji tych wyników do układu fizycznego. Dokonujemy tego za pomocą przygotowanego programu komputerowego a właściwie pakietu programów. Konfiguracja torów pomiarowych – uruchamiamy program *DF-CONF* który zapyta nas o ustawienie torów pomiarowych w oscyloskopie pomiarowym. Kalibracja torów pomiarowych – uruchamiamy program *DF-CAL*, który pozwala na wprowadzenie funkcji kalibrujących dany tor pomiarowy; charakterystyki takie zostały przygotowane wcześniej w procesie wzorcowania toru siły i przemieszczenia bijaka młota spadowego. Wizualizacja wyników pomiarów – uruchamiamy program *DF-VIS*, który pozwala na wizualizację wyników, ich wstępną analizę oraz

dalsze zapisanie w postaci dogodnej do współpracy z komercyjnymi programami analizy inżynierskiej (np. *MATHCAD*, *MATLAB*)

- *Ad.7.* Zapisane wyniki próby są uzyskane poprzez rejestrację analogowo-cyfrową w oscyloskopie cyfrowym i podobnie jak to było w warunkach rejestracji statycznej otrzymane rezultaty są obarczone zniekształceniami i zakłóceniami. Wymaga to dokonania wstępnej obróbki uzyskanych wyników. Polecaną metodą jest zastosowanie opcji wygładzania dostępnych na przykład w programie *MATHCAD*.
- *Ad.8.* Analiza wyników i wykorzystanie ich zależy już teraz od wyznaczanego parametru i stosowanego algorytmu. Opis odpowiednich czynności podano poniżej.

Czynność 1–6 studenci wykonują w laboratorium zaś czynność 7 i 8 wykonują indywidualnie i wyniki zamieszczają w sprawozdaniu.

12.5.2.1. Wyznaczenie dynamicznej odporności na pękanie dla materiałów kruchych – dynamiczny współczynnik intensywności naprężeń na pękanie K_{Id}

- Przykleić na powierzchni bocznej tensometr i uruchomić tor pomiarowy z możliwością rejestracji w czasie zmiany napięcia na tym tensometrze ($U_T = f(t)$).
- Wykonać test wg czynności od 1 do 6 z dodatkową rejestracją $U_T = f(t)$.
- Oszacować czas inicjacji t_i z wykresu $U_T = f(t)$.
- Wyznaczyć czas τ w celu oceny czy zagadnienie może być potraktowane jako prawie statyczne.
- Wyznaczyć z zarejestrowanego wykresu $P = f(t)$ siłę odpowiadającą czasowi inicjacji P_i .
- Zmierzyć parametry geometryczne $-B, W, a_0$.
- Podstawić dane do wzoru (12.3) obliczając K_{Id} .
- Wynik zapisać do protokołu z badań.
- Zapisać wyniki uzyskane w innych grupach (wpisać do tabeli wyników nr 1 – wspólnej dla wszystkich grup).
- Wyznaczyć wartość średnią K_{Id} i odchylenie standardowe.

Tabela 12.1

Dynamiczna współczynnik intensywności naprężeń K_{Id}									
Materiał:				R_e [MPa] =		R_m [MPa] =			
Stan materiału: obróbka cieplna:									
Grupa	Wielkości zmierzone				Wielkości obliczone				
	B [mm]	W [mm]	a_0 [mm]	S [mm]	$\alpha=a/W$	t_i [s]	P_i [N]	τ [s]	K_{Id} [MPa $\sqrt{m}$]
1–									
2–									
...									
Dołączyć wykresy: $P=f(t)$, $U_T=g(t)$,									
Średnia wartość K_{Id} = odchylenie standardowe =									

12.5.2.2. Wyznaczenie dynamicznej odporności na pękanie dla materiałów sprężysto-plastycznych – dynamiczna całka J_{Id}

Metoda jednej próbki

- Wykonać test wg czynności od 1 do 6;
- Wykreślić zależność $P=f(s)$ (wcześniej wykonać $P=h(t)$, $s=q(t)$).
- Wykreślić zależność (na tym samym rysunku) $\Delta C/C_{el}=g(s)$.
- Dokonać analizy otrzymanej krzywej poszukując potencjalnego punktu przegięcia – punktu inicjacji (stosować metodę przecięcia linii prostych uzyskanych metodą regresji liniowej dla pobliskich obszarów poszukiwanego punktu; rys.13.4).
- Wyznaczyć energię pochłoniętą przez próbkę do momentu inicjacji szczeliny A.
- Zmierzyć parametry geometryczne $-B, W, a_0$.
- Obliczyć wartość całki J_{Id} wg wzoru.
- Wynik zapisać do protokołu z badań.
- Zapisać wyniki uzyskane w innych grupach (wpisać do tabeli wyników nr 2 – wspólnej dla wszystkich grup).
- Wyznaczyć wartość średnią J_{Id} i odchylenie standardowe.

Tabela 12.2

Dynamiczna całka J _{IdC} –metoda jednej próbki						
Material:			R _e [MPa] =		R _m [MPa] =	
Stan materiału: obróbka cieplna:						
Grupa	Wielkości zmierzone			Wielkości obliczone		
	B [mm]	W [mm]	a ₀ [mm]	b [mm]	A [J]	J _{Id} [N/m]
1–						
2–						
...						
Dołączyć wykresy: P=h(t), s=q(t), P=f(s), ΔC/C _{el} =g(s)						
Średnia wartość J _{IdC} =				odchylenie standardowe =		

Metoda wielu próbek

W tej metodzie możliwy do uzyskania wynik końcowy wymaga wykonania testu dla wielu próbek. Ponieważ w jednej grupie zostanie wykonana jedna próbka, więc uzyskanie końcowego wyniku wymaga wpisania wszystkich wyników do jednej tabeli, narysowania krzywej $J-R$ i dalej postępowania wg algorytmu jak dla próby wyznaczania krytycznej wartości całki J_{Id} w próbie statycznej.

- Wykonać test wg czynności od 1 do 6 (dla ustawionego odpowiednio *stop bloku*).
- Kolorować próbkę na niebiesko i dołamać w celu wyznaczenia Δa .
- Wykreślić zależność $P=f(s)$ (wcześniej wykreślić $P=h(t)$, $s=q(t)$).
- Znaleźć na wykresie $s=q(t)$ moment uderzenia bijaka młota w *stop blok*.
- Przenieść te dane na zależność $P=f(s)$.
- Wyznaczyć energię pochłoniętą w procesie inicjacji i propagacji szczeliny A .
- Zmierzyć parametry geometryczne $-B, W, a_0, \Delta a$.
- Obliczyć wartość całki J_{Id} wg wzoru.
- Wyniki umieścić w protokole z badań.
- Zapisać wyniki uzyskane w innych grupach (wpisać do tabeli wyników nr 3).
- Narysować na podstawie uzyskanych wyników krzywą $J-R$ ($J=f(\Delta a)$).
- Narysować prostą tępienia (na podstawie własności wytrzymałościowych materiału).
- Wyznaczyć wartość J_{Idc} metodą nieliniowej regresji.

Tabela 12.3

Dynamiczna całka J_{Id} –metoda wielu próbek								
Materiał:				R_e [MPa] =			R_m [MPa] =	
Stan materiału:				obróbka cieplna:				
Grupa	Wielkości zmierzone				Wielkości obliczone			
	B [mm]	W [mm]	a_0 [mm]	A_k [mm]	b [mm]	A [J]	Δa [mm]	J_{Id} [N/m]
1–								
2–								
...								
Dołączyć wykresy: $P=h(t)$, $s=q(t)$, $P=f(s)$, $\Delta C/C_{el}=g(s)$								
Krytyczna wartość J_{Id} =								

12.5.2.3. Udarność

W przypadku młota spadowego udarność można wyznaczyć, mierząc energię kinetyczną młota przed złamaniem i po złamaniu próbki. W rozwiązaniu konstrukcyjnym rozważanego młota spadowego istnieje możliwość pomiaru energii kinetycznej przez pomiar prędkości w odpowiednich położeniach bijaka.

Wykonać test wg czynności od 1, 2 i 4

- Zarejestrować prędkość v_1 i v_2 .
- Wyznaczyć zmianę energii kinetycznej zużytą na złamanie próbki.
- Obliczyć udarność KV (lub KU w zależności od rodzaju naciętego karbu).

Tabela 12.4

Udarność								
Materiał:			R _e [MPa] =			R _m [MPa] =		
Stan materiału:			obróbka cieplna:					
Grupa	Wielkości zmierzone					Wielkości obliczone		
	B [mm]	W [mm]	h [mm]	V ₁ [m/s]	V ₂ [m/s]	S [mm ²]	E ₀ [J]	KV (KU) [J/m ²]
1–								
2–								
...								
Udarność (wartość średnia) KV (KU) = odchylenie standardowe =								

12.5.3. Sprawozdanie

W sprawozdaniu należy umieścić:

W części opisowej:

- Opis stanowiska pomiarowego.
- Algorytm wyznaczenia krytycznej wartości dynamicznego współczynnika intensywności naprężeń.
- Algorytm wyznaczenia krytycznej wartości całki J wg metody jednej i wielu próbek.
- Algorytm wyznaczenia udarności.

W części obliczeniowej:

- Wyniki Pomiaru K_{Id} (wykres tabela wyników nr 2); wykres $P=f(t)$, $U_T=g(t)$.
- Wyniki pomiaru J_{Id} wg metody jednej próbki (wykres $P=f(s)$, wykres $\Delta C/C=f(s)$, tabela wyników nr 3).
- Wyniki pomiaru J_{Id} wg metody wielu próbek (wykres $s=g(t)$, $P=h(t)$, $P=f(s)$, (tabela wyników nr 4).
- Wyniki pomiaru udarności (tabela wyników nr 4).

Wnioski.

12.6. ZAGADNIENIA KONTROLNE

- Zagadnienia dynamicznej odporności na pękanie.
- Parametry dynamicznej odporności na pękanie (K_{Id} , J_{Id}).
- Pomiary szybkozmiennych sygnałów.
- Instrumentowany młot spadowy.

Literatura

1. CANNON jr R. H., Dynamika układów fizycznych. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo–Techniczne 1973
2. HAGEL R., ZAKRZEWSKI J: Miernictwo dynamiczne. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo–Techniczne 1984
3. FREUND L., B.: Dynamic Fracture Mechanics. Cambridge University Press , 1990
4. LIS Z.: Wyznaczenie miary odporności na pękanie dla materiałów sprężysto–plastycznych. XVII Sympozjon Podstaw Konstrukcji Maszyn, (1995), s.551–562
5. NEIMITZ A.: Mechanika pękania. Warszawa: Wydawnictwa Naukowe PWN 1998
6. NOWACKI W., K.: Badania mechaniczne własności materiałów konstrukcyjnych obciążonych dynamicznie, seminarium Badania mechaniczne własności materiałów i konstrukcji. Zakopane: 1996
7. RYDZEWSKI J.: Pomiary oscyloskopowe. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo–Techniczne 1994
8. STACEWICZ T., KOTLICKI A.: Elektronika w laboratorium naukowym, Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa 1994
9. SZCZEPIŃSKI W. red.: Mechanika Techniczna, Metody doświadczalne mechaniki ciała stałego, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1984
10. TSENG M.K., MARCUS H.L.: A single specimen determination of J_{Ic} for aluminium alloys, Engineering Fracture Mechanics, vol, 16, 6(1982), pp.895–90
11. YAMAMOTO I., KOBAYASHI T., Evaluation Method of Dynamic Fracture Toughness by the Computer–Aided Instrumented Charpy Impact Testing System, Int. J. Pres. Ves&Piping 55(1993), pp.295–312