

9. CAŁKA J – POMIAR METODĄ JEDNEJ PRÓBKII*

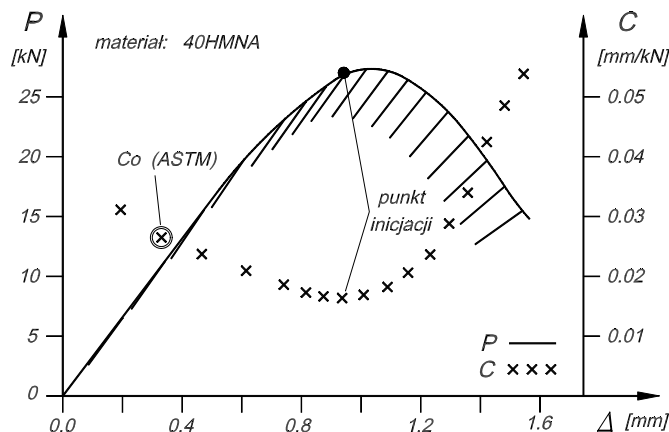
W poprzednim rozdziale podano dość obszerny wstęp teoretyczny dotyczący całki J: jej definicji, sensu fizycznego i zastosowań. Przed przystąpieniem do czytania niniejszego rozdziału i wykonywania proponowanego ćwiczenia należy koniecznie przeczytać rozdział 8. Podane w nim wiadomości są najlepszym przykładem ścisłego związku pomiędzy teorią i doświadczeniem. Bez teorii nie byłoby dobrze zdefiniowanej wielkości fizycznej dzięki której można oceniać poziom naprężeń przed frontem pęknięcia oraz oceniać wytrzymałość elementu konstrukcyjnego zawierającego pęknięcie. Dzięki teorii pojawiło się najpierw pojęcie całki J z jej dobrze zdefiniowanym sensem fizycznym. W tym samym roku wyprowadzono wzory na rozkład naprężeń i odkształceń przed frontem szczeliny dla materiałów nieliniowych. Całka J nie pojawiła się z początku w tych wzorach. Dopiero później skojarzono bliżej nieokreślony plastyczny współczynnik intensywności naprężeń z tą wielkością. Dzięki rozważaniom teoretycznym Broberga profesorowie Landes i Begeley opracowali po raz pierwszy technikę pomiaru całki J w momencie krytycznym definiując szereg ograniczeń w jej praktycznym stosowaniu. Od tego momentu całka J znalazła szerokie zastosowanie w praktyce inżynierskiej. Teoria wielokrotnie potem interweniowała w techniki pomiarowe. Przykładem tego jest ewolucja metod pomiarowych wyznaczania krytycznej wartości całki J znajdująca swe odbicie w zmieniających się normach krajowych i międzynarodowych. Dwie z takich technik pomiarowych zostaną zaprezentowane w niniejszym rozdziale. Należą one do metody zwanej metodą jednej próbki. Metoda ta jest znacznie szybsza i mniej kosztowna niż przedstawiona w poprzednim rozdziale metoda wielu próbek.

9.1. METODA JEDNEJ PRÓBKII – TECHNIKA ZMIANY PODATNOŚCI

Przy pomiarze krytycznej wartości całki J, J_{IC} wykorzystano obserwację, że wraz ze wzrostem długości pęknięcia zmienia się jej przekrój czynny a więc i sztywność całej próbki. Podatność jest odwrotnością sztywności. Opracowaną technikę pomiarową całki J nazwano więc techniką zmiany podatności. Mowa tu oczywiście o zmianie podatności próbki przy jej **odciążeniu**. Opisaną sytuację przedstawiono na rysunku 9.1. Zjawiska towarzyszące próbie są nieco bardziej złożone i nieco mniej jednoznaczne niż dla jednorodnej próbki poddanej procesowi obciążania i kolejnym odciążeniom (próba jednoosiowego rozciągania). W tym ostatnim przypadku do czasu osiągnięcia umownej granicy plastyczności odkształcenia plastyczne są pomijalnie małe z praktycznego punktu widzenia (prosta obciążenia pokrywa się z prostą odciążenia). Po przekroczeniu granicy plastyczności materiał odkształca się plastycznie w sposób niemal jednorodny w całej objętości

* Opracował: Andrzej Neimitz

próbki aż do czasu pojawienia się szyjki. Jeśli do tego momentu odciążać będziemy próbkę to okaże się,



Rys. 9.1. Wykres obciążania i odciążania próbki zawierającej pęknięcie oraz wykres zmiany podatności wraz z wzrastającym przemieszczeniem

że podatność (sztywność) przy odciążeniu niewiele się różni od podatności (sztywności) przy obciążaniu w zakresie sprężystym. Nie jest tak jednak po przekroczeniu maksimum na wykresie siła-przemieszczenie. Od tego momentu zmienia się bowiem czynny przekrój próbki (szyjka, pustki i mikropęknięcia). W przypadku próbki zawierającej pęknięcie sytuacja jest bardziej złożona. Nawet bowiem w zakresie niewielkich obciążeń próbki przed frontem szczeliny powstaje obszar plastyczny ze względu na koncentrację naprężeń. Obszar ten rośnie wraz ze wzrostem zewnętrznych obciążeń również wtedy gdy pęknięcie pozostaje stacjonarne. Obserwujemy wówczas pozornie dziwne zjawisko. Przy stacjonarnej szczelinie podatność przy odciążeniu (w zakresie prawie liniowych obciążeń) zmniejsza się (sztywność próbki zwiększa się). Wynikałoby z tego, że przyrost strefy plastycznej „usztynia” próbkę. Faktycznie jednak tak być musi gdyż przy ewolucji obszaru plastycznego następuje dyssypacja energii, która musi znaleźć swe odbicie na wykresie rozciągania. Zmniejszanie się podatności może zaniknąć i następnie może ona rozpocząć wzrost jeśli pojawi się ku temu fizyczna przyczyna. Może nią być wzrost długości pęknięcia. Zmniejszanie się przekroju czynnego próbki sprawia bowiem, że staje się ona mniej sztywna (bardziej podatna). Tak więc można by postawić tezę, że moment inicjacji wzrostu pęknięcia nastąpi w pobliżu (raczej przed) minimum na krzywej podatność C - przemieszczenie Δ . Tezę taką przyjmujemy w niniejszym ćwiczeniu. Posłuży ona dwóm celom:

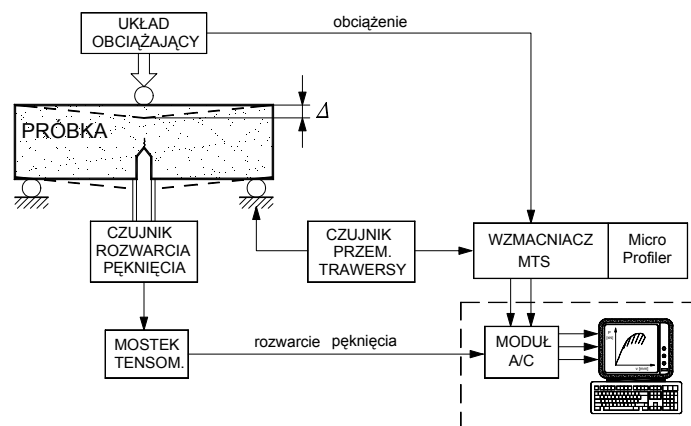
1. Określimy wartość całki J_{IC} bezpośrednio ze wzoru 8.10 w momencie osiągnięcia przez podatność minimum, jeśli możliwe będzie jego określenie.

2. Obliczymy wartość całki J_{IC} zgodnie z odpowiednimi normami z tą w stosunku do nich różnicą, że wartość podatności początkowej C_0 określimy jako występującą tuż przed hipotetycznym minimum. Polska norma i norma ASTM nie określają precyzyjnie podatności początkowej C_0 co prowadzi do niezgodnej z rzeczywistością rejestracji ujemnych przyrostów długości pęknięcia. Najnowszą normą ASTM E 1737-96 proponuje inne procedury obliczeniowe aby uniknąć wspomnianej niefizyczności.

Wyniki obliczeń uzyskane w niniejszym ćwiczeniu porównane zostaną z tymi uzyskanymi wg. metody opisanej w rozdziałach 7 i 8.2

9.1.1. Przeprowadzenie próby

- **Przygotowanie próbek.** Wybieramy próbki zwarte lub zginane jednostronnie nacięte. Kształt próbek podano w rozdziale 6. O wielkości próbki decyduje jej grubość, którą dobieramy w taki sposób aby po próbie był spełniony warunek 7.6. Wymaga to pewnego doświadczenia i studenci otrzymają już próbki przygotowane łącznie ze szczeliną zmęczeniową o długości ok. 2 mm przed frontem karbu. Przygotowanie szczeliny zmęczeniowej należy wykonywać z umiarkowanie wysokim obciążeniem aby przed próbą nie wprowadzać zbyt dużej strefy plastycznej. Czasami, gdy próbka jest wykonana z bardzo plastycznego metalu na jej bocznych powierzchniach, wzdłuż potencjalnej płaszczyzny propagacji pęknięcia, frezuje się tak zwane rowki boczne (*side grooves*). Rowki te mają za zadanie zlokalizować powierzchnię pęknięcia w kierunku prostopadłym do przyłożonych zewnętrznych obciążeń. Należy również zwrócić uwagę na fakt, że normy nakładają ograniczenie na początkową długość pęknięcia. Powinna ona być w zakresie $0.45W \leq a_0 \leq 0.7W$. W innym przypadku obliczona krytyczna wartość całki J nie będzie stałą materiałową. Wskazówki na temat przygotowania próbek można znaleźć w normach.
- Tak przygotowaną próbkę trzeba będzie dodatkowo „uzbroić” w celu umożliwienia pomiaru rozwarcia powierzchni szczeliny na krawędzi próbki za pomocą ekstensometru blaszkowego (rozdział 6). W naszym laboratorium przyklejamy do powierzchni próbki od strony wyfrezowanego karbu dwie blaszki o grubości 1 mm. Każda z blaszek ma zaostrzoną jedną krawędź. Są one równoległe względem siebie i względem krawędzi wyfrezowanego karbu i oddalone są od siebie na odległość nie większą niż $0.2W$ (W jest szerokością próbki). Za te wyostrome krawędzie zaczepimy wyfrezowane w blaszkach ekstensometru wycięcia. Pomiar rozwarcia powierzchni pęknięcia nie jest konieczny gdy wykorzystujemy polską normę. Jest zaś niezbędny do pomiaru przyrostu długości pęknięcia metodą zmiany podatności przy pomocy normy ASTM. Studenci otrzymują próbki z już naklejonymi blaszkami.



Rys. 9.2. Schemat układu pomiarowego do pomiaru J_{IC} metodą zmiany podatności

- Próbkę przygotowaną i uzbrojoną jak wyżej mocuje się na maszynie wytrzymałościowej. Uchwyty do zamocowania próbki muszą być wykonane ściśle wg. zaleceń odpowiednich norm (jest to bardzo ważne). Podczas próby rejestrować będziemy poza przemieszczeniem rozwarcia powierzchni szczeliny siłę oraz przemieszczenie punktu przyłożenia siły. To ostatnie nie jest przemieszczeniem trawersy rejestrowanym automatycznie w układzie pomiarowym maszyny. Trawersa i uchwyty próbek mają swoją własną sztywność, która powoduje, że przemieszczenie rejestrowane na trawersie jest nieco większe niż mierzone za pomocą specjalnych ekstensometrów rejestrujących przemieszczenie punktu, w którym jest przyłożona siła. Rejestrujemy więc **trzy** sygnały: **siłę**, **przemieszczenie punktu przyłożenia siły** oraz **rozwarcie powierzchni szczeliny**.
- **Schemat całego układu pomiarowego** przedstawiono na rysunku 9.2. Schemat ten należy zestawić ściśle wg. zaleceń podanych w rozdziale 3. W układzie pomiarowym nie powinny być zainstalowane żadne zbędne przewody i rejestrowane zbędne sygnały. Obciążają one niepotrzebnie pamięć komputera i mogą wprowadzać dodatkowe szумы zakłócające mierzone sygnały. Norma ASTM stawia niezwykle wysokie i trudne do osiągnięcia wymagania dotyczące poziomu szumów i stabilności sygnałów. Przy A/C 12 bitowej (zakres pomiarowy np. 10V jest dzielony na 4096 poziomów) poziom szumów nie powinien przekraczać dwóch działek karty a stabilność sygnału w czasie 10 min czterech działek.
- **Przeprowadzenie pomiaru** polega na tym, że próbkę obciążać będziemy na maszynie wytrzymałościowej z niewielką prędkością. Wartość siły powyżej której powstaje istotna nieliniowość na wykresie siła P - przemieszczenie Δ powinna być osiągnięta w czasie nie krótszym niż 0.1 min i nie dłuższym niż

10 min. (zakładając, że obciążenie rośnie monotonicznie). Musimy zaprogramować pracę maszyny w ten sposób, aby wprowadzić jak najwięcej odciążań i to zaczynając już na poziomie liniowej części wykresu obciążenia (*studenci sami programują maszynę*). Aby można było napisać program sterujący maszyną należy wykonać wcześniej próbę bez odciążań aby zorientować się w zakresie występujących sił i przemieszczeń. (Na ogół studenci otrzymują te informacje od prowadzącego ćwiczenia). Odciążenia programuje się w ten sposób, żeby stanowiły około 20% wartości siły obciążającej w momencie rozpoczęcia procesu odciążenia. Dla niektórych materiałów, czułych na prędkość obciążenia, przed momentem odciążenia należy wytrzymać próbkę pod stałym obciążeniem czasami nawet do 15 min. (w przypadku stali konstrukcyjnych na ogół nie jest to konieczne). Odciążenia należy wykonywać dość często. Sugeruje się 20-30 odciążań w całym zakresie pomiarowym. Próbę należy zakończyć gdy obciążenie rejestrowane w trakcie próby osiągnie wartość 50-40% obciążenia maksymalnego.

- **Istota pomiarów i opracowania wyników.** Istota przeprowadzenia pomiarów metodą jednej próbki jest identyczna do tej jaką przedstawiono dla metody wielu próbek: obliczamy wartość całki J (wzór 8.10 wg. polskiej normy lub wzór 8.11 wg. ASTM) dla kolejnych przyrostów długości pęknięcia, aproksymujemy zarejestrowane na wykresie J - Δa punkty leżące pomiędzy liniami ograniczającymi (linie 0.15 mm i 1.5 mm równoległe do linii stępienia) linią prostą (wg. PN) lub linią potęgową (wg. ASTM), znajdujemy punkt przecięcia otrzymanych linii bądź z osią rzędnych (PN-metoda podstawowa), bądź z linią stępienia (PN-metoda uzupełniająca) bądź z linią równoległą do linii stępienia i oddaloną od niej o 0.2 mm (ASTM). Kolejne przyrosty długości pęknięcia mierzymy dla tych momentów w czasie próby dla których zaczynano proces odciążenia. Celem tych zabiegów jest wyznaczenie **umownego momentu inicjacji wzrostu szczeliny**. Dla tego momentu wyznaczamy krytyczną wartość całki J , która jeśli spełni warunek (8.9) to uznamy ją za stałą materiałową J_{IC} . Jeśli nie spełni to próbę należy powtórzyć na grubszej próbce.
- **Różnice pomiędzy normą polską i amerykańską.** Choć istota pomiaru w obu normach jest identyczna to technika pomiaru i przeprowadzenia obliczeń jest w obu normach zupełnie inna. Bez wątpienia norma ASTM bardziej odpowiada dzisiejszemu stanowi wiedzy niż norma polska. Dzieli ich przecież osiem lat. Dokonywać pomiaru wg. polskiej normy będziemy choćby dlatego, że jest ona naszą aktualnie obowiązującą normą i jak należy sądzić nie prędko jeszcze zostanie zmieniona. Polska norma jest znacznie prostsza w realizacji doświadczenia i należy podkreślić, że osiem lat przed normą amerykańską wprowadziła technikę zmiany potencjału którą będziemy omawiać w dalszej części rozdziału 8.
- **Procedura postępowania wg PN-88/H-4336 oraz obliczanie minimalnej**

podatności.

- Z zarejestrowanych podczas próby trzech sygnałów interesują nas tylko dwa: siła P i przemieszczenie punktu przyłożenia siły Δ . Zmianę w czasie obydwu sygnałów obserwujemy w trakcie przeprowadzania próby po ich wcześniejszym skalibrowaniu. Wybieramy częstotliwość próbkowania z przedziału $[0.001 - 0.005]$ 1/s. Punkty pomiarowe zapisujemy zarówno w formacie z rozszerzeniem *.cfg jak i *.pom (format tekstowy). Pliki z rozszerzeniem *.cfg możemy analizować przy pomocy programu „Fracture”, pliki z rozszerzeniem *.pom pod jakimś innym programem wybranym przez studenta.
- Korzystając z programu „Fracture” dokonujemy w module „filtry” filtracji analizowanych sygnałów jeśli zachodzi taka potrzeba i wprowadzamy do pliku z rozszerzeniem *.res własności materiałowe (np. granicę plastyczności, moduł Younga, wsp. Poissona oraz podstawowe parametry geometryczne próbki).
- Przechodzimy do modułu analizy wstępnej gdzie na wykresie $P-\Delta$, który zawiera oczywiście wszystkie odciążenia, dokonujemy pomiarów podatności wzdłuż kolejnych linii odciążeń. Na wykresie zaznaczamy kolejne odciążenia a program z zależności $C_i = (\Delta\Delta/\Delta P)_i$ oblicza i podaje kolejne wartości podatności.
- Rysujemy wykres $C=C(\Delta)$ i staramy się, jeśli to możliwe określić minimum na tym wykresie. Wartość tę określimy jako podatność początkową C_0 . Gdy otrzymamy w okolicach minimum „płaską krzywą” to wybieramy jako podatność początkową C_0 wartość znajdującą się na początku plateau.
- Poczynając od odciążenia, które wyznacza wartość C_0 obliczamy kolejne pola powierzchni A_i pod krzywą $P-\Delta$ i zapisujemy te wartości w tablicy w pliku *.res (program sam całkuje wskazane powierzchnie i zapisuje je pod kolejnymi numerami w tablicy). Program również zapisuje automatycznie do tablicy kolejne wartości podatności C_i .
- Przechodzimy do modułu analizy końcowej i wybieramy opcję obliczania całki J . Wybieramy z menu wariant obliczania całki J wg. PN - sposób pierwszy podstawowy lub sposób drugi uzupełniający. Program wykonuje następujące czynności: oblicza przyrosty długości szczeliny dla kolejnych odciążeń korzystając ze wzoru:

$$\Delta a_i = \frac{b(C_i - C_0)}{2C_i}, \quad (9.1)$$

oblicza kolejne wartości całki J_i wg. wzoru 8.10, wprowadza kolejne punkty o współrzędnych $(\Delta a_i, J_i)$ na wykres: J – oś rzędnych, Δa – oś odciętych. Dla sposobu drugiego uzupełniającego program rysowuje prostą stępienia (tak jak w rozdziale 8), rysowuje dwie linie ograniczające równoległe do linii stępienia i oddalone od niej o 0.15 i 1.5 mm (jeśli wybraliśmy sposób pierwszy, pod-

stawowy to linie ograniczające są prostopadłe do osi odciętych), oblicza i rysuje prostą regresji (linię R) na bazie punktów leżących pomiędzy liniami ograniczającymi, wprowadza linie pomocnicze +35% i -25% w stosunku do linii-R i eliminuje punkty leżące na zewnątrz ograniczonego obszaru. W końcu program oblicza współrzędne punktu przecięcia linii R z osią rzędnych (podstawowy sposób) lub z linią stępienia (sposób uzupełniający). Otrzymana wartość J_C zostaje uznana za stałą materiałową J_{IC} jeśli spełniony zostanie warunek 8.9. Przedstawiona powyżej procedura różni się od tej przedstawionej w polskiej normie jedynie inną definicją podatności początkowej C_0 . W polskiej normie postuluje się przyjęcie jako C_0 podatności mierzonej wzdłuż linii obciążenia w zakresie prawie liniowego przebiegu wykresu. Wiemy już, że tak zmierzona podatność może mieć z początku większą wartość niż podatności mierzone wzdłuż kolejnych odciażeń w trakcie przyrostów długości pęknięcia. W efekcie otrzymalibyśmy (w większości przypadków) ujemne wartości przyrostów długości pęknięcia, z czym trudno się jest zgodzić. Najnowsza norma ASTM proponuje inne podejście do tego zagadnienia o czym za chwilę.

– Gdy student nie będzie korzystał z programu Fracture powinien sam wykonać wszystkie operacje i obliczenia wymienione powyżej.

• procedura postępowania wg ASTM E 1737-96

– Jak wspomniano wcześniej istota pomiaru J_{IC} wg. normy polskiej i amerykańskiej jest w zasadzie prawie taka sama. Jednakże procedury postępowania są różne. Omówimy je w skrócie wystarczającym do przeprowadzenia ćwiczenia. Wyznaczając jednak wartość J_{IC} wg tej normy zachęcamy do dokładnego przeczytania oryginalnej normy.

– Kształt próbek, konstrukcja uchwytów, tor pomiarowy, przygotowanie szczeliny zmęczeniowej są identyczne do tych, które omówiono w rozdziale 6 i w pierwszej części rozdziału 8.

– Istotne różnice występują w analizie danych zarejestrowanych podczas próby omówimy je poniżej

1. Kolejne wartości całki J obliczamy ze wzoru:

$$J_i = (J_{spr})_i + (J_{pl})_i \quad (9.2)$$

gdzie:
$$(J_{spr})_i = \frac{K_i^2 (1 - \nu^2)}{E}, \quad (9.3)$$

K_i jest współczynnikiem intensywności naprężeń zdefiniowanym dla próbek zwar- tych i trójpunktowo zginanych w rozdziale 6. Wartość całki $(J_{pl})_i$ wyznacza się ze

wzoru (7.11) z tą jednak różnicą, że symbol A_i oraz A_{i+1} należy zastąpić symbolami $(A_{pl})_i$ oraz $(A_{pl})_{i+1}$. Oznacza to, że powinniśmy mierzyć powierzchnie pod krzywą $P-\Delta$ pomiędzy kolejnymi punktami pomiarowymi i oraz i+1 ograniczone z dwóch stron prostymi odciążenia. Mierzymy więc teraz nie przyrost całkowitej energii pomiędzy dwoma punktami pomiarowymi a **przyrost energii dyssypowanej** pomiędzy dwoma punktami pomiarowymi.

2. Aktualną długość pęknięcia obliczamy ze wzoru:

$$a_i/W = 0.999748 - 3.9504U_x + 2.9821U_x^2 - 3.21408U_x^3 + 51.51564U_x^4 - 113.031U_x^5 \quad (9.4)$$

dla próbki trójpunktowo zginanej, lub

$$a_i/W = 1.000196 - 4.06319U_x + 11.242U_x^2 - 106.043U_x^3 + 464.335U_x^4 - 650.667U_x^5 \quad (9.5)$$

dla próbki zwartej

$$\text{gdzie :} \quad U_x = \frac{1}{\left(\frac{B_e W E' C_i}{S/4} \right)^{1/2} + 1}, \quad (9.6)$$

dla próbki trójpunktowo zginanej lub

$$U_x = \frac{1}{(B_e E' C_{ci})^{1/2} + 1}, \quad (9.7)$$

dla próbki zwartej.

B_e jest efektywną grubością próbki: $B_e = B - (B - B_N)^2/B$, B_N jest grubością próbki po wykonaniu nacięcia bocznego. Jeśli badamy próbkę bez nacięć bocznych to $B_N = B$. $E' = E/(1 - \nu^2)$, $C_i = (\Delta\delta_M/\Delta P)_i$ jest podatnością próbki trójpunktowo zginanej mierzoną wzdłuż linii odciążenia (w tym momencie widać powód dla którego mierzyliśmy rozwarcie powierzchni szczeliny za pomocą ekstensometru blaszkowego), C_{ci} jest podatnością próbki zwartej równą C_i (jak wyżej) pomnożoną przez pewien korekcyjny współczynnik, którego w niniejszym skrypcie nie będziemy cytować za normą.

3. Kolejnym krokiem jest obliczenie umownych przyrostów długości pęknięcia, które będą niezbędne do wykreślenia linii R. Mając aktualną długość pęknięcia obliczoną ze wzorów (9.4) i (9.5) mierzymy umowne przyrosty ze wzoru:

$$\Delta a_i = a_i - a_{oq} \quad (9.8)$$

gdzie a_{oq} jest umowną początkową długością pęknięcia, którą obliczamy z równania:

$$a = a_{oq} + \frac{J}{2\sigma_y} + BJ^2 + CJ^3 \quad (9.9)$$

a_{oq} obliczamy wraz z nieznanymi współczynnikami B i C metodą najmniejszych kwadratów posługując się parami liczb a_i i J_i uzyskanymi z przeprowadzonego doświadczenia. Odrzuca się te punkty, które odpowiadają sile mniejszej niż:

$$P_M = \frac{0.5\sigma_y B b^2}{S} \quad \text{dla próbki trójpunktowo zginanej (S jest odległością pomiędzy}$$

$$\text{punktami przyłożenia siły, lub } P_M = \frac{0.4\sigma_y B b^2}{(2W + a_o)} \quad \text{dla próbki zwartej. Norma ASTM}$$

podaje program dla określenia a_{oq} . Obliczona wartość a_{oq} nie może się różnić od zmierzonej pod mikroskopem warsztatowym długości a_o więcej niż o 0.01W. Początkową długość szczeliny a_o norma ASTM nakazuje określić jako średnią z dziewięciu pomiarów wzdłuż granicy pomiędzy szczeliną zmęczeniową a późniejszym przełomem.

4. Dysponując parami liczb J_i i Δa_i nanosimy odpowiadające im punkty na wykres. Następnie rysujemy linię stępienia o równaniu $J = M\sigma_y \Delta a$ gdzie $M \geq 2$. Zazwyczaj przyjmuje się $M=2$. Jednakże dla bardzo plastycznych materiałów można M obliczyć jako współczynnik nachylenia prostej aproksymującej pierwotny odcinek linii R (minimum 6 punktów blisko położonych początku układu współrzędnych). Z kolei rysujemy dwie linie ograniczające, równoległe do linii stępienia (linie 0.15 i 1.5mm) Na podstawie punktów pomiarowych występujących pomiędzy liniami ograniczającymi rysujemy potęgową krzywą regresji.

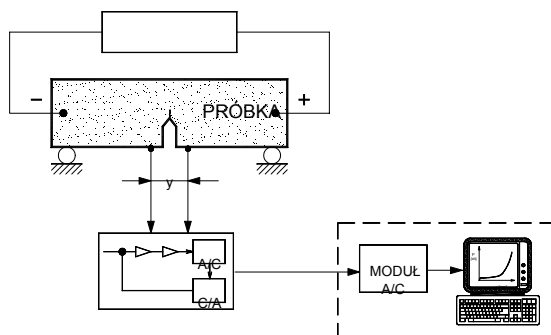
$$J = C_1 (\Delta a)^{C_2} \quad (9.10)$$

Linia ta przecinając dodatkową linię równoległą do linii stępienia oddaloną od niej o 0.2 mm określi nam wartość J_Q , która jeśli spełni warunek 7.9 będzie mogła być uznana za wartość J_{IC} . (norma podaje więcej ograniczeń, których jednak nie będziemy w tym ćwiczeniu sprawdzać).

- Wykonując ćwiczenie wykonamy więc następujące kroki:
 - * zarejestrujemy sygnały siły, przemieszczenia i δ_M (pliki *.cfg lub *.pom),
 - * posługując się programem Fracture zaznaczając kolejne odciażenia obliczymy podatności i powierzchnie $(A_{pl})_i$,
 - * program obliczy: przyrosty długości pęknięcia (wg. PN lub ASTM), wartości całki J,
 - * program rysuje w wykres wszystkie linie pomocnicze oraz linie R (jako linię prostą-PN lub potęgową-ASTM),
 - * program obliczy J_Q oraz sprawdzi czy otrzymana wartość jest stałą materiałową,
 - * gdy nie posługujemy się programem Fracture wszystkie opisane w tym rozdziale kroki należy wykonać samodzielnie.

9.2. METODA JEDNEJ PRÓBKII – TECHNIKA SPADKU POTENCJAŁU

Technika spadku potencjału pomiaru krytycznej wartości całki J różni się niewiele od techniki zmiany podatności. Różnica polega tylko na innym sposobie pomiaru przyrostów długości pęknięcia. Inne więc będą wzory 8.1 i 8.5-8.8. Przy pomiarze zmian długości pęknięcia techniką spadku potencjału wykorzystuje się zjawisko zmiany oporu elektrycznego próbki w trakcie zmiany jej czynnego przekroju. Przekrój zaś się zmienia wraz z przyrostem długości pęknięcia. W celu przeprowadzenia pomiaru tą techniką musimy zasilić próbkę prądem o stałym natężeniu. Może to być prąd stały lub zmienny. W naszym ćwiczeniu wykorzystywać będziemy jedynie prąd stały. Zasilacz prądu stałego powinien zapewnić przepływ prądu o gęstości od 3 do kilkunastu A/cm². Zbyt duży prąd może powodować nagrzewanie się próbki co z kolei ma istotny wpływ na uzyskane rezultaty. Układ pomiarowy do pomiaru spadku potencjału przedstawiono na rysunku 9.3

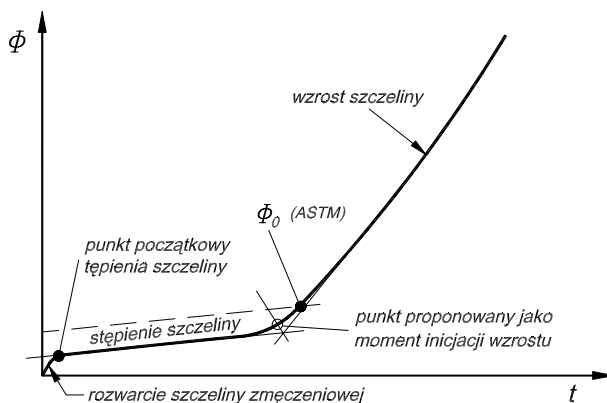


Rys. 9.3. Układ pomiarowy do określania przyrostów długości pęknięcia metodą spadku potencjału

Napięcie do próbki przykładana się w miejscach oddalonych możliwie daleko od elektrod do których przymocowany jest mikrowoltomierz. Mikrowoltomierz powinien rejestrować spadki potencjału na poziomie od dziesiątych części do kilkuset mikrowoltów. Przed przystąpieniem do rejestracji spadku potencjału dokonujemy kompensacji napięcia do zera. W naszym laboratorium czynności tej dokonuje komputer. Istotne jest miejsce przymocowania elektrod pomiarowych. Proponowane na schemacie miejsce jest rezultatem wielu prób i zapewnia pewien kompromis pomiędzy wrażliwością układu pomiarowego na przyrosty długości pęknięcia a uniezależnieniem się układu od niewielkich zmian w położeniu elektrod na kolejnych próbkach. Elektrody te zgrzewa się do powierzchni próbki.

Normy PN i ASTM podają różne wytyczne do pomiarów przyrostu długości pęknięcia metodą spadku potencjału. Należy zaznaczyć że polska norma jako pierwsza wprowadziła tę metodę do dokumentów normatywnych.

Stosując technikę spadku potencjału rejestrujemy trzy sygnały: **siłę obciążającą, przemieszczenie punktu przyłożenia siły i spadek potencjału**. Nie rejestrujemy sygnału przemieszczenia rozwarcia powierzchni pęknięcia gdyż służył on tylko do pomiaru zmiany podatności. Przy obecnej technice obciążamy próbkę bez odciążen przy monotonicznie rosnącym przemieszczeniu trawersy. Otrzymamy najprawdopodobniej wykres podobny do tego na rysunku 9.4.



Rys. 9.4. Przykładowy wykres spadku potencjału w czasie

Otrzymana krzywa sprawia wrażenie linii ciągłej. Wynika to ze stosowanej częstości próbkowania, zwykle rzędu 0.005 1/s.

- **Analiza rezultatów wg PN-88/H-04336**

Przyrost długości pęknięcia obliczamy ze wzoru:

$$\Delta a_i = \frac{\Delta a_k \Delta \Phi_i}{\Delta \Phi_k}, \quad (9.11)$$

gdzie Δa_i , $\Delta \Phi_i$ są kolejnymi przyrostami długości pęknięcia i potencjału zaś Δa_k i $\Delta \Phi_k$ są całkowitymi przyrostami długości pęknięcia ($= a_k - a_o$) i spadku potencjału.

Te ostatnie wielkości znane są dopiero po teście. Norma proponuje pomiar a_o za pomocą mikroskopu laboratoryjnego po dokonaniu termicznego kolorowania próbki i jej dołamaniu. Jest to średnia z pomiaru dziewięciu punktów wzdłuż frontu szczeliny zmęczeniowej. Na wykresie 9.4 zaznaczono punkt pomiarowy od którego rozpoczyna się obliczanie przyrostów długości pęknięcia. Pierwsza, często znaczna zmiana potencjału jest stowarzyszona z rozwarciem powierzchni szczeliny zmęczeniowej, potem łagodna zmiana potencjału odpowiada stępieniu próbki, następnie zaś po przegięciu na krzywej właściwy wzrost pęknięcia.

Znając Δa_i możemy przystąpić do procedury obliczania J_{IC} podanej przy okazji techniki zmiany podatności (obliczanie powierzchni A_i , kolejnych wartości całki J_i ze wzoru 7.10, rysowanie linii pomocniczych, obliczenie metodą najmniejszych kwadratów wyrażenia na linię R - jest to linia prosta). Program komputerowy Fracture wykonuje obliczenia dla wszystkich punktów pomiarowych. Wykonując obliczenia za pomocą innych programów należy oczywiście wybrać np. co setny punkt pomiarowy.

- **Analiza rezultatów wg ASTM E-1737**

Na podstawie mierzonego aktualnego sygnału napięcia (posługując się układem pomiarowym w naszym laboratorium musimy zanotować napięcie początkowe przed jego kompensacją) obliczamy aktualną długość pęknięcia wg wzoru:

$$\frac{a}{W} = \frac{2}{\pi} \arccos \left\{ \left\langle \cosh \left(\frac{\pi y}{2W} \right) \right\rangle \left\langle \cosh \left[\left(\frac{\Phi}{\Phi_0} \right) \arccos h \left[\frac{\cosh \left(\frac{\pi y}{2W} \right)}{\cosh \left(\frac{\pi a_o}{2W} \right)} \right] \right] \right\rangle^{-1} \right\}, \quad (9.12a)$$

gdzie $y = W/6$, W jest szerokością próbki, Φ i a oznaczają to co we wcześniejszych wzorach. Dla próbek takich jak na schemacie 9.3 powyższy wzór może być uproszczony do postaci:

$$\frac{a}{W} = \left[0.2864 \left(\frac{\Phi}{\Phi_0} \right) - 0.5 \right]^{0.3506} \quad (9.12b)$$

Norma proponuje obliczenie Φ_0 wg. schematu przedstawionego na rysunku 9.4.

Obliczenia wartości J_{IC} dokonujemy wg. takiego samego schematu jak w metodzie zmiany podatności. Zmienia się tylko sposób obliczenia Δa_i . Ponieważ jednak korzystamy ze wzorów 9.2, 9.3 (przy obliczeniu K_I należy użyć wzoru 6.12 lub 6.13.), 8.11 a jednocześnie w trakcie próby nie odciążaliśmy próbki należy obliczyć podatność $= \Delta A_i / \Delta P_i$ ze wzoru:

$$C_{LL(i)} = \frac{1}{E'B_e} \left(\frac{S}{W - a_i} \right)^2 \left[1.193 - 1.98 \frac{a_i}{W} + 4.478 \left(\frac{a_i}{W} \right)^2 - 4.443 \left(\frac{a_i}{W} \right)^3 + 1.739 \left(\frac{a_i}{W} \right)^4 \right], \quad (9.13)$$

dla próbki trójpunktowo zginanej

oraz

$$C_{(i)} = \frac{1}{E'B_e} \left(\frac{W - a_i}{W + a_i} \right)^2 \left[2.1630 + 12.219 \frac{a_i}{W} - 20.065 \left(\frac{a_i}{W} \right)^2 - 0.9925 \left(\frac{a_i}{W} \right)^3 + 20.609 \left(\frac{a_i}{W} \right)^4 - 9.9314 \left(\frac{a_i}{W} \right)^5 \right] \quad (9.14)$$

dla próbki zwartej. Symbole w powyższych wzorach zostały wyjaśnione pod wzorami 9.5-9.8. Znajomość podatności pozwoli na obliczenie $(A_p)_i$.

9.3. Wykonanie ćwiczenia i sporządzenie protokołu z badań

♦ technika zmiany podatności

- ⇒ wzorcowanie kanałów pomiarowych (siła, czujnik przemieszczenia, ekstensometr blaszkowy),
- ⇒ pomiar próbki: B, W, S (próbka trójpunktowo zginana),
- ⇒ zamontowanie próbki na stanowisku badawczym, zamocowanie ekstensometru blaszkowego,

- ⇒ zaprogramowanie obciążenia próbki (z uwzględnieniem odciążeń) - sterujemy przemieszczeniem trawersy,
- ⇒ wyzerowanie kanałów pomiarowych,
- ⇒ uruchomienie programu sterującego maszyną, rejestracja rezultatów,
- ⇒ zapisanie rezultatów w formacie *.cfg i *.pom,
- ⇒ wygrzanie próbki (300°C przez 30 min)
- ⇒ pomiar na mikroskopie laboratoryjnym a_0, a_k, b_o ,
- ⇒ obliczenie Δa_i
- ⇒ obliczenie J_i ,
- ⇒ narysowanie linii R, linii stępienia, linii ograniczającej, linii pomocniczej
- ⇒ obliczenie I_Q ,
- ⇒ sprawdzenie czy spełniony jest warunek 8.9
- ⇒ obliczenie C_0 jako minimum funkcji $C_0=f(\Delta)$
- ⇒ określenie w którym punkcie pomiarowym wystąpiło C_0
- ⇒ naniesienie tego punktu na wykres $P=f(\Delta)$
- ⇒ obliczenie wartości A dla wyznaczonego punktu
- ⇒ obliczenie J_Q ze wzoru 8.10.

PROTOKÓŁ Z BADAŃ

Obliczanie J_{IC} techniką zmiany podatności

Gatunek materiału, obróbka cieplna:

Typ próbki:

Granica plastyczności, wytrzymałość doraźna:

Norma (PN lub ASTM)

Nr próbki:

Nr. odciążenia	$(A_{spr})_i$ (kNm)	$(A_{pl})_i$ (kNm)	A_i (kNm)	a_0 (mm)	a_i (mm)	Δa_i (mm)	a_{oq} (mm)
	ASTM	ASTM	ASTM PN	ASTM PN	ASTM	ASTM PN	ASTM
C_0 (m/kN)	C_i (m/kN)	B (mm)	W (mm)	η_i	γ_i	J_i (kN/m)	
	ASTM PN	ASTM PN	ASTM PN	ASTM	ASTM	ASTM PN	

Wartość J_Q , wartość J_{IC} (dla różnych stosowanych metod)

Wnioski

♦ Technika spadku potencjału

- ⇒ Kalibracja kanałów pomiarowych,
- ⇒ pomiar próbki: B, W, S,
- ⇒ przymocowanie elektrod,
- ⇒ zamocowanie próbki na stanowisku badawczym, przyłączenie woltomierza,
- ⇒ zaprogramowanie maszyny wytrzymałościowej (bez odciążeń, sterowane przemieszczenie),
- ⇒ włączenie zasilacza prądu stałego,
- ⇒ wyzerowanie kanałów pomiarowych,
- ⇒ pomiar napięcia początkowego Φ_0 ,
- ⇒ uruchomienie programu sterującego maszyną, rejestracja wyników,
- ⇒ zapisanie rezultatów w plikach z rozszerzeniem *.cfg i *.pom,
- ⇒ wygrzanie próbki (300°C przez 30 min),
- ⇒ pomiar na mikroskopie laboratoryjnym a_0, a_k, b_0 ,
- ⇒ obliczenie Δa_i ,
- ⇒ obliczenie J_i ,
- ⇒ narysowanie linii R, linii stępienia, linii ograniczającej, linii pomocniczej
- ⇒ obliczenie I_Q ,
- ⇒ sprawdzenie czy spełniony jest warunek 8.9

PROTOKÓŁ Z BADAŃ

Obliczanie J_{IC} techniką spadku potencjału

Gatunek materiału, obróbka cieplna:

Typ próbki:

Granica plastyczności, wytrzymałość doraźna:

$\Phi_0=$

Norma (PN lub ASTM)

Nr próbki:

Nr. odciążenia	$(A_{spr})_i$ (kNm)	$(A_{pl})_i$ (kNm)	A_i (kNm)	a_0 (mm)	a_i (mm)	Δa_i (mm)	a_{oq} (mm)	a_k (mm)	Φ_i (μV)
	ASTM	ASTM	ASTM PN	ASTM PN	ASTM	ASTM PN	ASTM	PN	ASTM
	$\Delta\Phi_k$ (μV)	$\Delta\Phi_i$ (μV)	C_i (m/KN)	B (mm)	W (mm)	η_i	γ_i		J_i (kN/m)
	PN	PN	ASTM	ASTM PN	ASTM PN	ASTM	ASTM		ASTM PN

Wartość $J_Q=$, wartość $J_{IC}=$

Wnioski

9.4. Zawartość sprawozdania:

1. Krótki opis teoretyczny
2. Cel ćwiczenia
3. Wyniki pomiarów i obliczeń, wnioski
 - wykresy $P=P(\Delta)$
 - wykres $\Phi=\Phi(t)$
 - krzywa J-R
 - tabela jak wyżej

9.5. Wymagane wiadomości

- istota pomiaru przyrostu długości pęknięcia techniką zmiany podatności,
- istota pomiaru przyrostu długości pęknięcia techniką spadku potencjału,
- opisać metodykę pomiaru krytycznej wartości całki J techniką spadku potencjału,
- opisać metodykę pomiaru krytycznej wartości całki J techniką zmiany podatności.