

**Jerzy WAWSZCZAK**

Szkoła Nauk Technicznych

i Społecznych Politechniki Warszawskiej w Płocku

## **ZASTOSOWANIE WYKRESU SIŁA-PRZEMIESZCZENIE W PRÓBIE CHARPY V DO ANALIZY ODPORNOŚCI NA PĘKANIE W TEMPERATURZE CIEKŁEGO AZOTU, TECHNICZNIE CZYSTEGO ŻELAZA**

### **Słowa kluczowe**

Udarność, obciążenie dynamiczne, kruche pękanie, wykres siła–przemieszczenie, odporność na pękanie, szczelina krytyczna, próg kruchości.

### **Streszczenie**

W pracy rozważano metodę wyznaczania dynamicznego współczynnika odporności na pękanie  $K_{Id}$ . Koncepcję oparto na wykorzystaniu krzywych siła–przemieszczenie, uzyskanych w trakcie próby udarności Charpy V. Wartości przemieszczenia w punkcie przyłożenia siły w przebiegu próby udarności Charpy V określano na próbkach z żelaza czystego technicznie w temperaturze ciekłego azotu. Określano położenie punktu krytycznego na krzywej dopasowania przemieszczenia względem rzeczywistej wartości ugięcia próbki. Wyniki dynamicznej odporności na pękanie porównano względem próbek, w których karb technologiczny przedłużono o pęknięcie uzyskane metodami zmęczeniaowymi.

### **Wprowadzenie**

Analiza wpływu struktury i/lub warunków obciążania materiałów ze względu na skłonność do katastrofального zniszczenia jest przedmiotem intensywnych

badań od blisko 100 lat, jeśli uznać za ich początek dokonania Inglisha i Griffitha.

O ich podjęciu w pierwszym rządzie decydowały względy bezpieczeństwa eksploatacji obiektów technicznych, konieczne więc było ustalenie wiarygodnych naukowo cech materiału istotnych przy projektowaniu obiektów technicznych, zapewniających bezpieczeństwo jego eksploatacji w zakładanych warunkach i czasie.

W dostatecznym stopniu zadania te, stawiane Mechanice Ośrodków Ciągłych i Inżynierii Materiałowej, wypełniły osiągnięcia Liniowo Sprężystej Mechaniki Pękania (LSMP), osiągającej swe największe sukcesy w latach 50. i 60. ubiegłego wieku.

Obecnie większe znaczenie odgrywa poznanie mikromechanizmów pękania materiału w rzeczywistych uwarunkowaniach jego budowy, w każdej skali, poprzez wyznaczenie jakościowo i ilościowo zapisanych reakcji odpowiednio zdefiniowanych obiektów struktury z polem sił o charakterze statycznym lub dynamicznym. Nie trzeba dodawać, że analiza tych reakcji w warunkach dynamicznych jest trudniejsza tak teoretycznie jak i eksperymentalnie. Wyniki tych badań są konieczne przy prawidłowym projektowaniu nowych materiałów o strukturze opisywanej w mikro lub nanoskali [1, 2].

Podstawową właściwością materiału, wyznaczaną w warunkach dynamicznych jest praca pochłonięta na zniszczenie próbki albo udarność, próba udarowości zatem, z racji prostoty oprzyrządowania i przekonujących wyników, jest powszechnie wykonywana na potrzeby odbioru obiektów technicznych o ważnym znaczeniu.

Zjawiska udarowego pękania zachodzące w niskich temperaturach i/lub dużych szybkościach obciążania można interpretować na gruncie rozwiązań LSMP w odniesieniu do ruchu szczelin. Klasycznie pojmowana LSMP dotyczy jednak zachowania się materiału w chwili utraty stabilności mechanicznej ciała stałego ze szczeliną, a wielkości opisujące naprężenie i odkształcenie w tym momencie nazywane są krytycznymi i noszą znamiona stałych materiałowych. Kontynuacja wzrostu szczeliny wywołana uwalnianiem energii sprężystej zgromadzonej na etapie poprzedzającym pęknięcie lub wskutek działania sił zewnętrznych, zaliczana jest do kategorii procesów dynamicznych.

Badania udarowości z towarzyszącymi im procesami należy traktować jako dynamiczne. Oznacza to, że ilość energii sprężystej, kumulowanej przed frontem karbu, jest w przybliżeniu zależna od dynamicznych reakcji sieci krystalicznej na przemieszczający się wraz z dnem karbu rozkład naprężeń w środowisku realnych fluktuacji czynnika strukturalnego w postaci statystyk rozkładów wielkości ziaren lub rozkładów ich aglomeracji [3].

W pracy zajmowano się zagadnieniem pęknięcia udarowego, w temperaturze ciekłego azotu, poszukując takich sposobów interpretacji krzywych siła–przemieszczenie, otrzymanych podczas łamania próbek Charpy V wykonanych

z żelaza czystego technicznie o zróżnicowanej strukturze, by uzasadnić możliwość ich wykorzystania do oszacowania Dynamicznego Współczynnika Intensywności Naprężeń  $K_{Id}$ .

Założono, że im niższa jest temperatura badania, tym przełom, powstający przy znaczącej przewodze fragmentów złomu łupliwego, poprzedzają procesy formowania karbu ostrego.

Jak już wspomniano, większość prac teoretycznych, dotycząca opisu ruchu szczelin i ich prędkości pochodzi z lat 50.–70., przy czym wymienić tu należy dokonania Motta i Barry'ego z istotnym uzupełnieniem o wcześniejsze dokonania Yoffe, a następnie Craggsa, Wnuka, Rice'a i innych [4÷11]. Można także wymienić nowsze publikacje dotyczące tego tematu [12÷14].

## 1. Część eksperymentalna

### 1.1. Materiał

Obiektem badań były próbki z żelaza czystego technicznie o składzie jak w tabeli 1, z karbem typu Charpy V. Badane próbki różniły się wielkością ziarna, uzyskaną wskutek zabiegów spęczania swobodnego na zimno i rekrytalizacji.

W pracy przedstawiono wyniki badań próbek w trzech stanach obróbki ze względu na strukturę: stan 1 – 89/700/60, stan 2 – 68/750/90, stan 3 – 48/800/90. Gdzie pierwsza liczba określa procent zgniotu, druga temperaturę wyżarzania rekrytalizującego, a trzecia czas tego wyżarzania w minutach. Średnie powierzchnie ziaren dla próbek pomiędzy stanami różniły się średnio o ~ 20%, mieszcząc się w przedziale od 900 do 14 000  $\mu\text{m}^2$ .

Zależność udarności od temperatury, dla żelaza i stali niskowęglowych, w pewnym jej zakresie jest nieliniowa wykazując próg kruchości, po przekroczeniu którego udarność zmienia się już nieznacznie aż do 0°K. Temperaturę ciekłego azotu (77°K) wybrano dlatego, by zmniejszyć do minimum dyssypację plastyczną wywołaną ruchem dyslokacji w strukturze ferrytu.

Tabela 1. Skład chemiczny badanego żelaza

C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	W	V	Mo
0,025	0,134	0,016	0,009	0,009	0,0264	0,046	0,058	0,001	0,001	0,006
Al	Ti	Sr	As	Nb	B	Co	Ca	Pb	Sb	Fe
0,03	0,001	0,001	0,002	0,002	0,0001	0,003	0,001	0,001	0,001	99,64

### 1.2. Założenia

Z istoty badania udarności, jako metody, wynika jej statystyczny charakter, rozumiany jako pomiar uśrednionego zachowania się mikrostruktury badanego materiału w warunkach quasi-kruchoego pęknięcia, tzn. jako sumy wszystkich prac cząstkowych, liczonych łącznie, w postaci pracy łamania względem przekroju

badanej próbki. Wynik badania zapisany więc jest dla każdej próbki pojedynczą liczbą. Znacznie większy zasób informacji z przebiegu próby jest możliwy dopiero wówczas, jeśli młot jest dodatkowo oprzyrządowany w urządzenia do rejestracji siły w funkcji czasu.

Badania na tak oprzyrządzanym młocie są znormalizowane i zapisane w normie [15]. Spośród istniejących w literaturze równań wiążących przemieszczenie punktu przyłożenia siły ze względu na kształt próbki i siłę obciążającą  $F$  oraz długość szczeliny, dla przypadku próbki trójpunktowo zginanej możemy zapisać następujące wyrażenie:

$$V = \frac{6F(1-\nu^2)}{4BH^2E} l_p^2 f(a/H). \quad (1)$$

gdzie:  $V$  – przemieszczenie w punkcie przyłożenia siły od młota udarowego,  
 $F$  – bieżąca siła obciążająca próbkę,  
 $\nu$  – współczynniki Poissona,  
 $B$  i  $H$  – odpowiednio szerokość i wysokość próbki,  
 $E$  – stała sprężystości,  
 $l_p$  – odległość między podporami umieszczonymi centralnie względem siły obciążającej,  
 $f(a/H)$  – wielomian czwartego stopnia opisujący wpływ długości karbu  $a$  na przemieszczenie, przy stałej sile i z odpowiednią dokładnością.

Funkcja  $f(a/H)$ , [10] ma dokładność 1% i można ją zapisać w postaci:

$$f(a/H) = \left( \frac{a/H}{1-a/H} \right)^2 \left[ \begin{array}{l} 5.58 - 19.57(a/H) + 36.82(a/H)^2 - \\ 34.94(a/H)^3 + 12.77(a/H)^4 \end{array} \right] \quad (2)$$

W istocie, zmiennymi w równaniu (1) są siła  $F$  i odpowiadająca jej długość szczeliny  $a$ . Znając przemieszczenie  $V$ , musimy wyznaczyć wartość funkcji dopasowania  $f(a/H)$ , a następnie znajdując funkcję odwrotną do zapisanej w (2) odczytać długość szczeliny.

Należy jednak pamiętać, że wszystkie równania LSMP, generalnie dotyczą szczelin „matematycznych”, których geometria wymaga, by promień zaokrąglenia dna karbu dążył w granicy do zera. Z zasady zatem nie możemy wyznaczać bezpośrednio stałych materiałowych typu  $K$  dla próbek Charpy V, gdyż promień zaokrąglenia w dnie karbu  $\rho = 0,25$  mm.

Innym istotnym ograniczeniem jest wspomniany już dynamiczny charakter próby, gdy tymczasem równania stanu mają statyczny charakter, tzn. gdy prędkość zmiany dąży w granicy do zera.

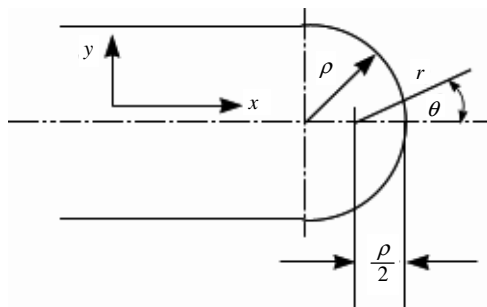
Co prawda dla warunków statycznych [10], przedstawione zostały interesujące rozważania, świadczące, że w pewnej, bardzo bliskiej odległości od dna karbu, naprężenie podobnie do wzorów Williama-Irwina, nie zależy od „ostrości karbu”, zatem wyrażenie na naprężenie maksymalne jest sformułowane analogicznie do znanych wzorów z LSMP w postaci:

$$\sigma_{\max} = \left| \sigma_y \right|_{r=\rho/2(\theta=0)} = \frac{2K_I}{\sqrt{\pi\rho}} \quad (3)$$

gdzie:  $\rho$  – oznacza promień zaokrąglenia dna karbu,  $r$  i  $\theta$  – mają oznaczenia jak na rysunku 1.

Wyznaczony na podstawie podanej zależności współczynnik  $K_I$  jest niższy od współczynników uzyskanych klasycznie o prawie dwie trzecie. Ponadto pękanie spontaniczne ma miejsce dopiero wtedy, gdy w dnie karbu powstanie dostatecznie ostre pęknięcie wskutek działania procesów formujących zdolny do propagacji karb, utworzony przez lawinową koalescencję początkowych przedpęknięć łupliwych.

Wstawienie więc w obliczeniach wielkości odpowiadających rozmiarom karbu technologicznego typu V nie uwzględnia złożonej struktury mikropeknięć poprzedzających właściwy rozwój szczeliny, który można w pewien sposób utożsamiać dla warunków dynamicznych, jak podkrytyczny wzrost karbu w warunkach statycznych.



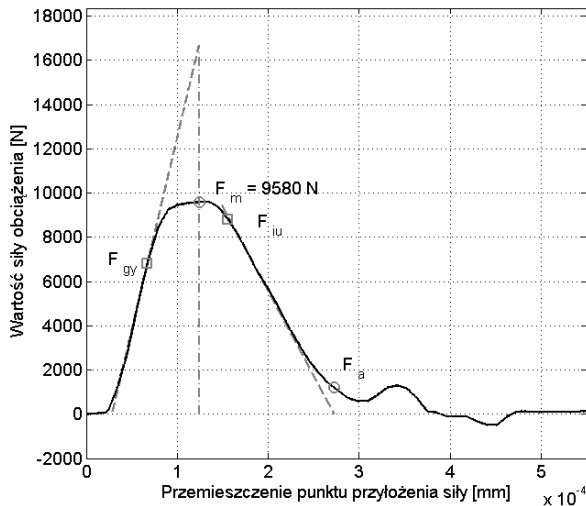
Rys. 1. Interpretacja graficzna zależności (3), [10], za [11]

W celu dokładniejszego określenia omawianych zjawisk można wykorzystać zapis w układzie siła–przesunięcie, zdjęty z młota udarowego w chwili łamania.

### 1.3. Metoda

Badania wykonano na młocie Wolpert 35, znajdującym się w Laboratorium Badań Materiałowych Zakładu Doświadczalnego Instytutu Energii Atomowej w Świerku. Istotną niedogodnością postaci otrzymanych wyników, spowodowanych przestarzałym systemem komputerowym, w jaki wyposażono młot, był brak bezpośredniego dostępu do zapisów tych badań w układzie siła–czas, pobieranych bezpośrednio z pamięci komputera pokładowego. Jedynym substytutem tych danych były graficzne wizualizacje mierzonych wielkości, w postaci wydruków z plotera komputerowego oraz końcowe raporty z wyników badania, stanowiące zamknięty zbiór wyliczonych wartości dla punktów charakterystycznych wykresów.

Jak można było oczekiwać, w trakcie badań występowały bardzo niskie wartości rejestrowanych sił maksymalnych, rzędu 10 kN, (przy pracy łamania w przedziale od 1 do 3,5 J) oraz przypadki oscylujących wokół zera sił pochodzących od tarcia o podpory porównywalnych co do wartości z siłami łamania, w końcowych partiach wykresu, o zauważalnych w stosunku do siły maksymalnej amplitudach (rysunek 2). Skutkowało to w raportach występowaniem wielu przypadków, dla których wyniki nie opisywały rzeczywistych (fizycznie realnych) wartości mierzonych (wartości ujemne sił itp.). Wobec braku dostępu do firmowego softwaru, konieczność dalszej obróbki wyników stworzyła potrzebę przekształcenia ploterowych wizualizacji w ich cyfrowe odpowiedniki, zgodnie z zasadami komputerowej obróbki obrazu.



Rys. 2. Przykład wykresu siła – przemieszczenie dla próbki typu Charpy V, po komputerowej digitalizacji. Oznaczenia punktów charakterystycznych na podstawie cytowanej w pracy normy [15]

Raporty zostały zweryfikowane na podstawie zeskanowanych w skali 1:1 zapisów z próby łamania w postaci wykresów siła – przemieszczenie. Kolejnym etapem analizy było wyznaczenie charakterystycznych punktów, odpowiadających położeniu punktów zapisanych zgodnie z międzynarodowymi znormalizowanymi oznaczeniami.

Ważnym dla końcowych efektów fragmentem pracy była dokładna komputerowa obróbka zeskanowanych wykresów, w celu uzyskania możliwie wiernego względem pierwowzoru obrazu linii szerokości pisaka, zredukowanych do linii o grubości 1 piksela. Powstały po przekształceniu zbiorów tworzył reprezentację kolejnych par punktów pomiarowych dla siły i czasu lub siły i przemieszczenia, w przestrzeni pikseli, tak by liczby danych dla osi odciętych i rzędnych tworzyły wektory tej samej długości. Wartości osi  $x$  stanowiły zatem wektor rosnący w przedziale od  $1 \rightarrow n$  z krokiem 1, zaś każdej wartości  $V_i$  odpowiadała jedna wartość siły  $F_i$ .

Istotnym mankamentem zapisu na ploterze są niewynikające z pomiaru niedokładności, pochodzące np. z drgań pisaka, wywołane nierównościami papieru, stopniem wsiąkania tuszu, zmienną wskutek nacisków geometrią końcówki pisaka itp. W zastosowanych procedurach przyjęto domyślnie, że przebieg krzywej z plotera jest dokładnym odwzorowaniem zmierzonych wartości elektrycznych sygnału, zatem jego dokładny kształt obrazuje położenie środka linii z plotera w postaci krzywej szkieletowej z usuniętymi gałęziami. Operację tę często nazywa się obcinaniem szkieletu lub okrawaniem (ang. *prune*). Zdigitalizowane do postaci wektorów  $V$  i  $F$  dane z próby pęknięcia wymagały następnie wyznaczenia wartości punktów charakterystycznych odpowiadających cytowanej normie. W celu ich wyznaczenia posługiwano się dość złożoną numerycznie procedurą. Warto przypomnieć, że przytoczone w normie punkty charakterystyczne przebiegu siła–przemieszczenie zdefiniowane są jako:

$F_a$  – siła w momencie zatrzymania niestabilnego rozwoju szczeliny,

$F_{gy}$  – siła płynięcia plastycznego,

$F_{iu}$  – siła inicjacji wzrostu szczeliny,

$F_m$  – siła maksymalna.

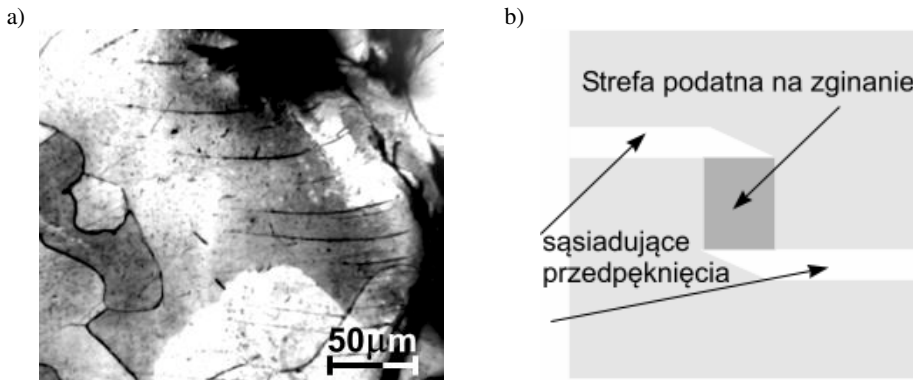
Wyraźnie widać z interpretacyjnego nazewnictwa, że norma dotyczy przypadków łamania w warunkach płynięcia plastycznego, a nie kruchego. Wyznaczano punkty rozgraniczające obszary w przybliżeniu prostoliniowe od krzywoliniowych na wykresach siła–przemieszczenie, z możliwie jak najmniejszym błędem kształtu. Badając współczynnik korelacji dla prostych i wycinków interpolowanych krzywych (rosnącej i opadającej), poszukiwano punktów, względem których wzajemne współczynniki korelacji nie zmieniały się w dość dużym zakresie. Punkty te następnie stanowiły odniesienie, względem którego wyznaczano współczynniki równania prostych jako poszukiwanych stycznych.

Punkty jak na rysunku 2 stanowiły miejsca na krzywej siła–przemieszczenie i linii stycznych do niej, na początku ich wzajemnego rozwierania się.

Krytyczne odstępę względem przebiegu stycznej do tej krzywej ustalano na podstawie średnich fluktuacji z punktów na krzywej i linii stycznych do niej.

Założono, że odcinki krzywych pomiędzy  $F_{gy}$  a  $F_{iu}$  prawdopodobnie przedstawiają sumy procesów łączenia wielu krótkich szczelin inicjatorów, w szczególności magistralne zdolne do dalszego spontanicznego pęknięcia. Kształt tego wyznika wykresu pęknięcia, w postaci krzywej siła–przemieszczenie był skutkiem procesów formujących pierwsze płaszczyzny łupliwości, inicjatory pęknięcia.

Ich ilość lawinowo wzrastała aż do osiągnięcia siły maksymalnej dla badanego przebiegu  $F_m$ , oznaczając liczne bifurkacje wraz z nieznaną i częściową tylko deformacją plastyczną fragmentów materiału połączonych z dwoma różnymi końcami próbki po rozdzieleniu mających status pęknięć odłamkowych, czego dowodzą fragmenty bloków struktury stykających się z przełomem, zawierające lekko zakrzywione ślady granic bliźniaków jak na schematycznie pokazanej idealizacji tego procesu – rysunek 3.



Rys. 3. Mikrostruktura strefy graniczącej z przełomem próbek o dużym ziarnie z widoczną krzywizną sekwencji bliźniaków odkształcenia, w żelazie czystym technicznym po próbie udarowości – a) schemat tworzenia na bazie sekwencji przedpęknięć – b) (badania własne).

## 2. Wyniki badań

Jak już stwierdzono, ugięcie  $V$  zmienia się w przedziale począwszy od warunków początkowych aż do złamania próbki, a jego liczbowa wartość zależy we wzorze (1) od siły  $F$  i długości karbu  $a$ . Na podstawie wzoru (1) dane z rysunku 2 można zapisać w postaci:

$$V_i = \frac{1.107 \times 10^{-14} F_i}{BH^2} f(a_i/H) \quad (4)$$

W przedstawionym równaniu przyjęto stałe materiałowe żelaza czystego technicznie [16] i rozstęp podpór młota tak, że  $E = 1,96 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ,  $\nu = 0,31$ ,  $l_p = 0,04 \text{ m}$ .



Traktując funkcję dopasowania (2) jak zależną od siły wymuszającej  $F_i$ , wyznaczano rzeczywisty związek długości karbu z krzywą ugięcia:

$$f_r(a_i/H) = \frac{V_i \Delta v}{F_i \Delta f} 9.035 \times 10^{13} (BH^2) \quad (5)$$

gdzie:  $i \Delta v$  i  $\Delta f$  oznaczają odpowiednio współczynniki skali dla osi  $V$  i  $F$ , natomiast  $f(a/H)$  jest funkcją dopasowania po uwzględnieniu wielkości z wykresu siła–przemieszczenie.

Ponieważ koncepcja funkcji dopasowania (2) przewidziana była dla warunków statycznych, gdy pozostałe wielkości są ustalone, warto się nią posłużyć jako krzywą wzorcową dla ustalonej wartości siły standardowych wymiarów próbki. Musimy jedynie dopasować tę krzywą wzorcową do skali, mnożąc ją przez stosunek współczynników skali dla obu osi (6).

$$f_s(a_i/H) = \frac{\Delta v}{\Delta F} f(a_i/H). \quad (6)$$

gdzie:  $f_s(a/H)$  – stanowi bieżącą wartość skalowaną do warunków pomiaru, funkcji ze wzoru (2).

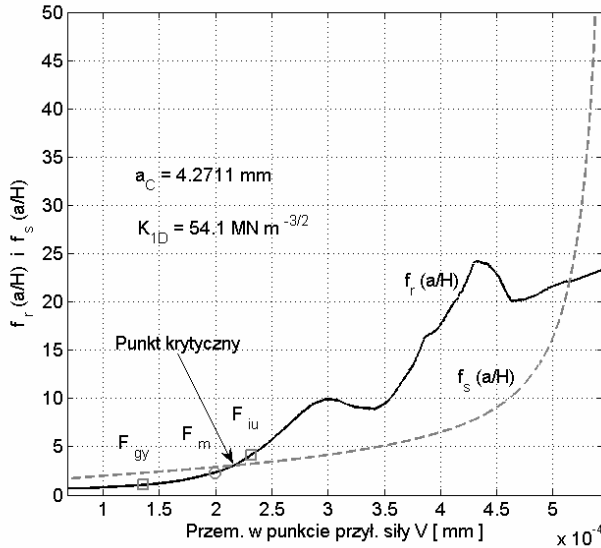
Wykonanie opisanych czynności wymagało dodatkowo znalezienia funkcji odwrotnej do równania (6) tak, by na podstawie danych z wykresu można było określić długość szczeliny  $a$ , konieczną do wyznaczenia Dynamicznego Współczynnika Intensywności Naprężeń  $K_{Id}$ . Wygodną i dokładną w badanym zakresie postacią równania było równanie (7).

$$a_i = \frac{(p_1 f(a_i/H)^2 + p_2 f(a_i/H) + p_3)}{(f(a_i/H)^2 + q_1 f(a_i/H) + q_2)} H \quad (7)$$

gdzie: wielkości  $p$  i  $q$  z indeksami stanowią współczynniki równania. Przykładowe wykresy nałożonych krzywych (5) i (6) pokazano na rysunku 4.

Istnieje potrzeba oceny wiarygodności dokonanego porównania, statycznych wielkości z równania (1) z dynamicznymi w istocie wielkościami występującymi w tym równaniu i w równaniu (5). Przyjmując rzetelność wyznaczonych wartości siły i przemieszczenia, należało wykonać obliczenia wartości poszukiwanego współczynnika  $K_{Id}$ , a także krytycznej długości szczeliny  $a_{kryt}$ . pod warunkiem wyznaczenia z wykresu odpowiedniego punktu. Do dalszych rozważań

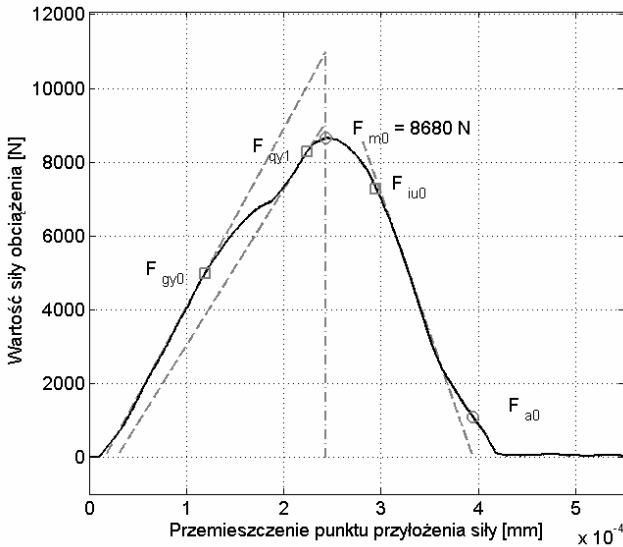
możemy wybrać punkty charakterystyczne ( $F_{gy}$ ,  $F_m$ ,  $F_{iu}$ ) opisane w normie przedmiotowej lub dowolny punkt leżący pomiędzy  $F_{gy}$  a  $F_{iu}$ . Można zauważyć, że krzywe rzeczywiste i krzywa teoretyczna przecinają się tylko w dwu punktach. Pierwszy punkt zlokalizowany jest w strefie nieliniowej, drugi w strefie dołomu. W pracy zaproponowano, aby pierwszy z punktów, leżący na przecięciu obu krzywych (badanej i wzorcowej), był punktem oznaczonym na rysunku jako „Punkt krytyczny”.



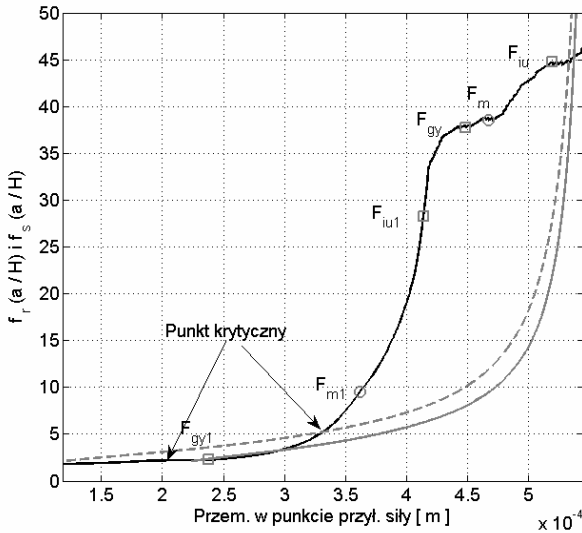
Rys. 4. Przykład krzywej dopasowania (rzeczywistej i wzorcowej) względem przemieszczenia próbki w punkcie przyłożenia siły

Niekiedy wyniki nie układają się tak pomyślnie, co można prześledzić na przykładzie jednej z badanych próbek w stanie 2. Wykres siła–przemieszczenie na rysunku 5 można zinterpretować dwojako ze względu na położenie stycznej do lewej gałęzi wykresu (punkty  $F_{gy0}$  i  $F_{gy1}$ ). Skutkuje to takim przemieszczeniem „punktu krytycznego”, że wyznaczone na jego podstawie wartości  $K_{Id}$  i  $a_{kryt.}$  różnią się znacznie ( $K_{Id}$  od 44 do 80  $\text{MN m}^{-3/2}$  a  $a_{kryt.}$  od 2 do ponad 6 mm), rysunek 6. Fakt ten skutkuje najczęściej odrzuceniem wyniku badania dla takiej lub podobnej próbki.

Zaznaczony punktami  $F_{gy}$  i  $F_{iu}$  nieliniowy przedział sił i odpowiadających im przemieszczeń dotyczy strefy zdarzeń decydujących o dalszym przebiegu pęknięcia, co wydaje się oczywiste. Jedynie zastanawiają ilościowe konsekwencje w procedurze wyznaczania wskaźników dynamicznej odporności na pęknięcie czy też umownej długości szczeliny krytycznej. Najprościej wyjaśnić to można okolicznością powodującą, że krytyczne dla przebiegu zjawiska zaczynają się przy niższych wartościach siły i mniejszym ugięciu próbki.

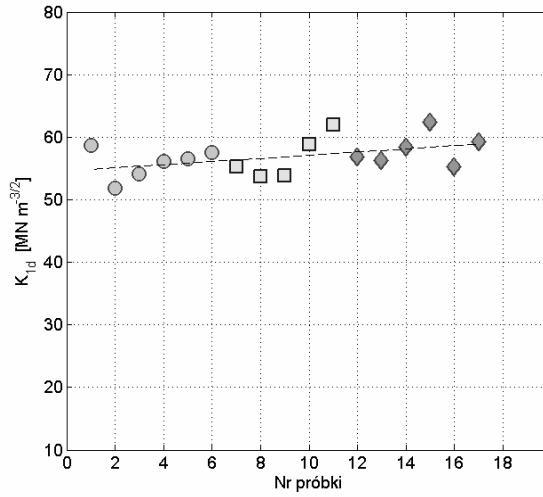


Rys. 5. Problem z wyborem punktu początku strefy wystąpienia zjawisk nieliniowych  $F_{gy}$  dla próbki ze stanu drugiego



Rys. 6. Konsekwencje dla wyboru punktu krytycznego w procedurze wyznaczania początku strefy nieliniowej na krzywej siła–przemieszczenie w punkcie przyłożenia siły (rysunek 5)

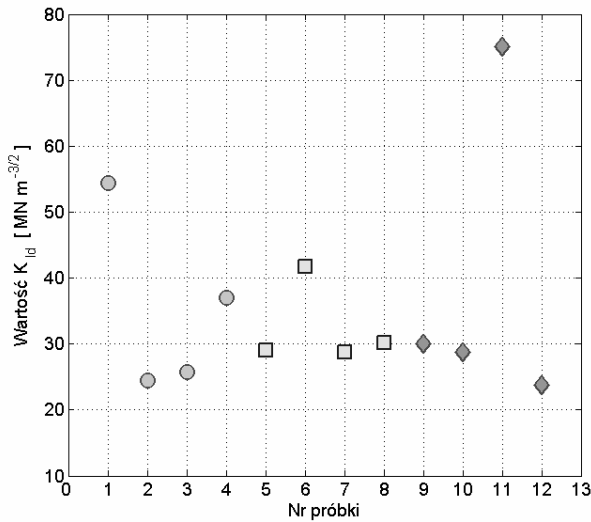
Jako podsumowanie można przedstawić wykresy wyznaczone z badań wartości dla trzech partii próbek różniących się warunkami zgniotu i rekryształacji, rysunek 7.



Rys. 7. Wartości współczynnika intensywności naprężeń dynamicznych  $K_{Id}$  (po lewej) oraz krytycznej długości szczeliny (po prawej), dla badanych próbek Charpy V

Małe nachylenie linii trendu odpowiada ilościowo wielkości zmiany średniego ziarna.

Dla porównania możemy posłużyć się wynikami badania próbek w tych samych stanach zgniotu i rekrytalizacji, badanych na tym samym urządzeniu i warunkach, różniących się jedynie rodzajem karbu w postaci przedpęknięcia zmęczeniowego, rysunek 8.



Rys. 8. Wyniki porównawcze dla próbek z przepęknięciem zmęczeniowym z długością karbu całkowitego porównywalną z długością jak dla próbek z karbem Charpy V (badania własne)

Jednakże, aby próba była uznana, próbki musiałyby bezwzględnie spełniać warunek stosunku długości karbu do wysokości ( $a/H \sim 0,45$ ), co należy wziąć pod uwagę przy porównaniu z danymi literaturowymi. Wszystkie obliczenia i wizualizacje wykonano w środowisku Matlab 2007a.

### 3. Dyskusja wyników

Należy zwrócić uwagę na niewielki rozrzut wyników badań na rysunku 7 względem linii trendu, co dla badań udarności i wskaźników kruchości jest zazwyczaj warunkiem trudnym do spełnienia. Zwraca także uwagę fakt dobrego skupienia wokół linii trendu dla długości karbu krytycznego. Współczynnik  $K_{Id}$  przy średniej dla wszystkich próbek równej  $56,87 \text{ MN m}^{-3/2}$  był wyznaczony z odchyleniem standardowym równym  $2,849 \text{ MN m}^{-3/2}$ . Krytyczna długość karbu w przeliczeniu na milimetry względem standardowej wysokości próbki 10 mm wynosiła 4,4 mm, a jej odchylenie standardowe 0,0905 mm.

Dla warunków próby Charpy, otrzymane w badaniach wartości Dynamicznego Współczynnika Intensywności Naprężeń  $K_{Id}$  są zawyżone o blisko 1/3 w stosunku do danych literaturowych, jak również względem próbek z karbem w postaci przedpęknięcia zmęczeniowego (rysunek 8).

Można przypuszczać, że przebieg łamania, w początkowych stadiach próby, w znacznej mierze polega na wykonaniu pracy przekształcającej karb technologiczny w karb strukturalny, dla którego promień zaokrąglenia w dnie jest rzędu atomowych odległości w sieci żelaza.

Wykonywana w początkowym stadium pękania praca istotnie zwiększa zarówno wartości sił potrzebnych do zainicjowania procesu, jak i przysposabia szczelinę do dalszej propagacji. Wiąże się to z wydłużeniem szczeliny i zmianą geometrii dna karbu. Pracę tę można także określić jako pracę zarodkowania i rozwoju pierwszych płaszczyzn łupliwości w ziarnach bezpośrednio przylegających do dna karbu technologicznego.

### Podsumowanie

Istotnymi czynnikami wpływającymi na procesy inicjacji płaszczyzn łupliwości w początkowym stadium pękania są niskotemperaturowe bliźniakowanie odkształceniowe i poślizg w korzystnie zorientowanych płaszczyznach.

Dynamiczne aspekty pękania nadal wymagają wielu badań zarówno w obszarze teorii, jak i w dziedzinie empirycznych badań materiałów o różnej strukturze i składzie chemicznym. W tym sensie przedstawiona praca jest poszukiwaniem możliwie tanich i skutecznych metod sprostania temu wyzwaniu.

## Bibliografia

1. Wert J.A., Huang X., Winter G., Pantleon W., Poulsen H.F.: Revealing Deformation Microstructures, *Materialstoday*, Elsevier Pub. Vol. 10, No 9, 2007, pp. 24–32.
2. Kumar S., Curtin W.A.: Crack Interaction with Microstructures, *Materialstoday*, Elsevier Pub. Vol. 10, No 9, 2007, pp. 34–44.
3. Wawszczak J.: Analiza mikrostruktury żelaza po procesie spęczania na zimno ze względu na równomierność rozkładu struktury. Praca złożona w redakcji Inżynierii Materiałowej.
4. Mott N.F.: Brittle Fracture in Mild – Steel Plates, Part II, *Engineer*. Vol. 165, 16, 1948.
5. Berry J.P.: Some Kinetic Consideration of Griffith Criterion for Fracture, Part I – Equations of Motion at Constant Force, Part II – Equation of Motion at Constant Deformation, *J. Mech. Phys. of Solids*, Vol. 8, pp. 194–216, 1960.
6. Yoffe E.H.: The Moving Griffith Crack, *Phil. Mag.* Vol. 42, pp. 739–750, 1951.
7. Craggs J. W.: *J. Mech Phys. of Solids*, Vol. 8, pp. 66–76, 1960.
8. Wnuk M. P.: Kinetics Energy and Equation of Motion of a Spreading Penny Sharpen Crack, *Proc. S. Dakota Academy of Science*, Vol. 46, pp. 232–236, 1967.
9. Roberts D.K., Wells A.A.: The Velocity of Brittle Fracture, *Engineer*, Vol. 178, p. 820, 1954.
10. Creager M., Paris P.C.: Elastic Field Equation for Blunt Cracks with Defense to Stress Corrosion Cracking, *Int. J. Fracture Mechanics*, Vol. 3, pp. 247–252, 1967.
11. Wnuk M.P.: *Podstawy Mechaniki Pękania*, Akademia Górniczo-Hutnicza, Skrypty Uczelniane, Nr 822, Kraków 1981.
12. Ravi-Chandar K., Yang B.: On the Role of Microcracks in the Dynamic Fracture of Brittle Materials, *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 45, No 4, pp. 535–563, 1997.
13. Clifton R.: Response of Materials under Dynamic Loading, *Int. J. of Solids and Structures*, 37, pp. 105–113, 2000.
14. Fineberg J., Marder M.: Instability in dynamic fracture, *Phys. Reports* 313, (1999).
15. PN-EN ISO 14556:2003/A1, Stal – Próba udarności Charpy V oprzyrzędownym młotem wahadłowym – Metoda badania, PKN – Warszawa 2006.
16. Ashby M.F., Jones D.R.H.: *Materiały Inżynierskie*, WNT – Warszawa 1995.

Recenzent:  
**Bogusław MAJOR**

## **Application of Force–Displacement diagram from Charpy V Impact Test analysis of the fracture resistance of the commercially pure iron samples at liquid nitrogen temperature**

### **Key words**

Impact resistance, dynamic load, brittle cracking, Force–Displacement diagram, crack resistance, critical gap, impact transition temperature.

### **Summary**

The method of the fracture resistance coefficient  $K_{Id}$ , determination was introduced in this paper. This idea is based on the curve's force-displacement, obtained during Charpy V impact tests. Displacement values at the point of the force application in relation to the time were measured during impact tests. The impact resistance of the commercially pure iron Charpy V samples were performed at the temperature of liquid nitrogen. The critical point initiation on the fit curve of displacement versus original deflection was indicated. The results of dynamic fracture resistance values were compared with the results of resistance coefficients from samples with initiative crack, performed with fatigue crack tips at the ends of technological notches.

