

3.2.2.2. Odporność na pękanie materiałów kruchych

- **Metoda największego prawdopodobieństwa (MML). Przypadek próbek badanych w tej samej temperaturze**

Używając metody MML (od *Maximum Likelihood Method*) wszystkie parametry materiałowe winny być najpierw przeliczone do jednostek WIN i po wykonaniu analizy z powrotem przetransponowane do pierwotnych wielkości wg wzorów (3.5) i (3.6)

$$K = \sqrt{JE/(1-\nu^2)}, \quad (3.5)$$

$$K = \sqrt{mR_e\delta E/(1-\nu^2)}, \quad (3.6)$$

gdzie: E , ν są kolejno modułem Younga i współczynnikiem Poissona, $m=1.5$, J , δ są całką J oraz rozwarciem wierzchołkowym pęknięcia, R_e jest granicą plastyczności. Wartość m może nie być właściwa dla stali o niskim umocnieniu, $n>20$ lub dla metali innych niż stale. W takich przypadkach można wykorzystać inną wartość m .

Wartości krytyczne WIN, całki J lub rozwarcia wierzchołkowego pęknięcia δ należy wyznaczyć posługując się aktualnymi normami, np. ASTM E 1820 [1], BS 7448 [2] lub ESIS P2 (1992) [3]. W przypadku stali ferrytycznych polecana jest też metoda Master Curve zawarta w normie ASTM E 1921-05 [4].

Badania należy wykonywać na próbkach pobranych z analizowanego obiektu, wg wskazań normatywnych. Jeśli nie jest to możliwe to próbki można pobrać z innych odcinków wykonanych z tej samej stali i pracujących w podobnych warunkach. Jeśli próbki pobierane są z odcinków próbnych, które mają symulować spawane fragmenty konstrukcji, to proces spawania winien wiernie odzwierciedlać technologię spawania rzeczywistych obiektów.

Wyniki uzyskane z próbek, których grubość nie wynosi 25mm (na ogół jest mniejsza) należy dopasować do tych, które byłyby uzyskane dla grubości 25mm. Do tego celu służy równanie (3.7).

$$K_i = K_{25} = K_{\min} + (K_B - K_{\min})(B/25)^{0.25}, \quad (3.7)$$

gdzie K_B oznacza odporność na pękanie uzyskaną na próbce o grubości B , $K_{\min}=20 \text{ MPa}\sqrt{m}$ dla stali ferrytycznych.

Ponieważ analizujemy obecnie odporność na pękanie materiałów kruchych należy podczas badań uważnie obserwować charakter przełomu próbek. Jeśli stwierdzimy, że proces pęknięcia nie był idealnie kruchy i był poprzedzony okresem pęknięcia ciągliwego to próbkę zaliczamy jako nieważną i przypisujemy jej symbol $\delta_t=0$ (wykorzystywany później we wzorach). Próbkę tej przypisujemy odporność na pękanie oznaczoną symbolem $K_{JC(cen)}$ i obliczoną ze wzoru (3.8)

$$K_{JC(cen)} = (Eb_o R_e / 30)^{0.5} \quad (3.8)$$

gdzie b_0 jest długością niepękniętego odcinka przed frontem pęknięcia. Wszystkie inne wartości traktować należy jako dopuszczone (ocenzurowane pozytywnie) i oznaczone symbolem $\delta_i=1$, z wyjątkiem gdy $K_i > K_{JC(cen)}$. Dla tego przypadku postępujemy podobnie jak dla próbek wykazujących ślady przełomu ciągłego.

✓ *MML – etap pierwszy analizy. Określenie wartości K_0 .*

Oblicz K_0 zgodnie z równaniem (3.9). (K_0 odpowiada skumulowanemu prawdopodobieństwu zniszczenia 63.2%).

$$K_0 = K_{\min} + \left(\frac{\sum_{i=1}^n (K_i - K_{\min})^4}{\sum_{i=1}^n \delta_i} \right)^{1/4} \quad (3.9)$$

$K_{\min}=20 \text{ MPa}\sqrt{m}$ dla stali ferrytycznych. Zauważ, że K_i w powyższym wzorze jest odpornością na pękanie pojedynczej próbki, dopasowaną do wymiaru grubości próbki 25mm zgodnie z równaniem (3.7) i obejmuje również każdą wartość $K_{JC(cen)}$, $\delta_i=1$ lub 0. Należy wykonać sumowanie od $i=1$ do $i=n$, gdzie n jest całkowitą liczbą danych w zbiorze (włączając próbki, które są „ocenzurowane” pozytywnie i negatywnie).

✓ *MML - drugi etap analizy. Oszacowanie na podstawie dolnej gałęzi MML (Lower tail MML Estimation)*

a) Sprawdź, które z wartości zmierzonych odporności na pękanie są większe od obliczonej za pomocą wzoru (3.10). Tym większym przypisz $\delta_i=0$ oraz zmierzoną odporność na pękanie zastąp wartością obliczoną ze wzoru (3.10). Pozostałym wartościom przypisz $\delta_i=1$.

$$K_{CENS}(K_0) = K_{\min} + (K_0 - K_{\min}) \cdot (\ln 2)^{1/4} \quad (3.10)$$

b) Użyj otrzymanego skorygowanego zbioru wartości odporności na pękanie aby obliczyć ponownie wartość K_0 wg wzoru (3.9)

c) Porównaj dwie wartości K_0 (tą pierwszą i tą skorygowaną). Jeśli ta nowa jest mniejsza niż ta poprzednia powtórz procedurę, wykorzystując wzór (3.10) jednak z nowym zbiorem danych. Powtarzaj iterację aż otrzymana wartość będzie mniejsza od poprzedniej. Oznacz tę wartość jako $K_{0(etap2)}$.

✓ *MML-, Etap trzeci analizy – Oszacowanie z wartości minimalnej*

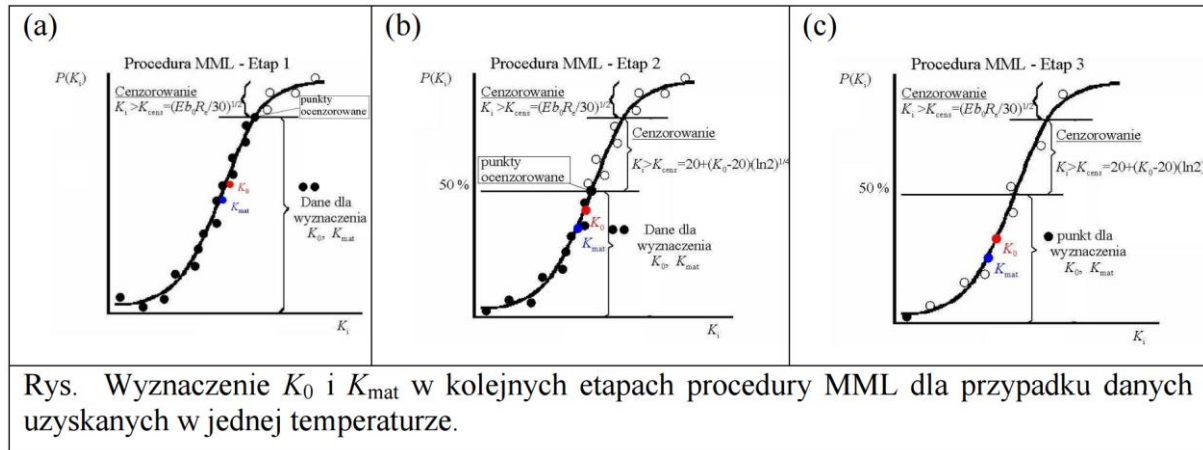
Jeśli ilość próbek, na podstawie których mierzono odporność na pękanie jest mniejsza niż 10 to należy wykonać trzeci etap analizy.

- Ustal $K_{0(min)}$ tj. najmniejszą wartość ze zbioru wartości K_i , którym przypisano $\delta_i=1$.
- Porównaj $K_{0(min)}$ i $K_{0(etap2)}$ ustalone w etapie drugim. Jeśli $K_{0(min)} < 0.9K_{0(etap2)}$ wskazuje to, że dane nie są jednorodne i $K_{0(min)}$ powinno być przyjęte jako reprezentatywna wartość K_0 . W drugim przypadku $K_{0(etap2)}$ winno być uznane za reprezentatywną wartość K_0 .
- Określ ostateczną wartość $K_{0(etap3)}$ wg wzoru (3.12) włączając do obliczeń poprawkę na małą liczbę próbek. Oznacz otrzymaną wartość jako $K_{0(etap3)}$

$$K_{0(etap3)} = K_{min} + \frac{K_{0(min)} - 20}{1 + \frac{0.25}{\sqrt{r}}} \quad (3.12)$$

gdzie r jest liczbą próbek, które pękły wyłącznie w sposób kruchy.

W dalszej części paragrafu wzory na $K_{0(etap2)}$ lub $K_{0(etap3)}$ zostaną wykorzystane do obliczenia K_{mat} .



- Metoda MML. Określanie odporności na pękanie dla próbek badanych w różnych temperaturach**

Istnieje podobna procedura do opisanej powyżej, która pozwala wyznaczyć odporność materiału na pękanie kruche na podstawie wyników uzyskanych w różnych temperaturach, jednak nie będzie ona omawiana jako wykraczająca poza zakres tego ćwiczenia.

- Ostateczne rezultaty analizy dotyczące zarówno badań w jednej jak i kilku temperaturach.**

- Obliczenie projektowej odporności na pękanie K_{mat} (wzór 3.19).

$$K_{mat} = K_{min} + (K_{0m} - 20) [-\ln(1 - P_f)]^{0.25} \quad (3.19a)$$

lub

$$K_{mat} = K_{min} + (\overline{K_m(K_0)} - 20) [-\ln(1 - P_f)]^{0.25}, \quad (3.19b)$$

gdzie P_f jest liczbą np. 0.05 lub 0.2 gdy reprezentuje kolejno skumulowane prawdopodobieństwo zniszczenia 5% lub 20%.

b) Obliczanie rozkładu statystycznego

$$P\{K_{mat}\} = 1 - \exp - \left[\frac{K_{mat} - K_{min}}{K_{0m} - K_{min}} \right]^4. \quad (3.20)$$

- **Master curve**

Na podstawie uzyskanych rezultatów można narysować krzywą wzorcową, czyli zależność między odpornością na pękanie a temperaturą przy założonym prawdopodobieństwie zniszczenia.

$$K_{mat} = K_{min} + \left\{ 11 + 77 \exp(0.019[T - T_{K100}]) \right\} \left(\frac{25}{B} \right)^{0.25} \left[\ln \left(\frac{1}{1 - P_f} \right) \right]^{0.25}$$

gdzie T_{K100} jest temperaturą przejścia krucho-plastycznego odpowiadającą odporności na pękanie 100Mpa√m. Temperaturę tą wyznaczamy za pomocą wzoru:

$$T_{K100} = T_{bad} - \left(\frac{1}{0.019} \right) \ln \left(\frac{K_{mat(etap-i)} - 30}{70} \right)$$

