

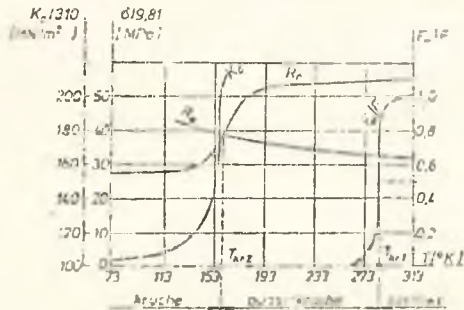
Sławomir Matyaszewski
 Politechnika Lubelska

WYZNACZANIE KRYTYCZNYCH TEMPERATUR PĘKANIA
 STALOWEGO ELEMENTU KONSTRUKCYJNEGO, PROGNO-
 ZOWANIE TYPU PĘKNIĘCIA W ZAŁOŻONEJ TEMPERA-
 TURZE EKSPLOATACJI ELEMENTU.

Zależność charakteru pęknięcia stali od temperatury stosunkowo łatwo jest określić w oparciu o badania próbki gładkiej. Za miarodajną przyjmuje się próbę rozciągania (a: do zrywania) gładkiej próbki znormalizowanej, dokonywaną w różnych temperaturach, a ściślej - charakteryzującą ją parametry, takie jak: R_e - granica plastyczności stali, R_r - wytrzymałość rozdzielcza stali (w danej temperaturze badania), F_w - pole powierzchni strefy włóknistej w złomie [4][5]. Na podstawie tych wielkości określa się tzw. krytyczne temperatury pęknięcia zwane też inaczej krytycznymi temperaturami kruchości, tj. temperatury rozgraniczające podatkawne rodzaje pęknięcia stali. Temperaturę, w której powstały słom charakteryzuje 50 procentowy udział strefy włóknistej w całkowitym polu powierzchni przekroju, tj. gdy $F_w/F = 0,5$, definiuje się jako pierwszą temperaturę krytyczną pęknięcia $T_{1,0}$. Natomiast drugą temperaturę krytyczną pęknięcia $T_{1,2}$ stanowi temperatura, w której granica plastyczności osiąga wartość równą wytrzymałości rozdzielczej, tj. gdy $R_e = R_r$, natomiast wydłużenie materiału spada do zera [3], [4]. W zależności od temperatury, w której nastąpi pęknięcie, nazywamy je kruchym, quasi-kruchym lub ciągliwym.

Na podstawie badań próbki gładkiej można przyjąć, że niebezpieczeństwo kruchego pęknięcia materiału, z którego jest ona wykonana, istnieje w temperaturze eksploatacji $T_e \leq T_{kr2}$, zaś quasi-kruchego w $T_e \leq T_{kr1}$. Zależność typu pęknięcia od temperatury eksploatacji, dla stali niskowęglowej, przedstawia rys. 1.

Biorąc pod uwagę tylko realne temperatury, w jakich



Rys. 1. Wykres charakteryzujący pierwszą i drugą temperaturę krytyczną dla stali niskowęglowej

mogą pracować budowlane konstrukcje stalowe można przyjąć, że będą one pękać jedynie w sposób quasi-kruchy. Nie jest to oczywiście prawdą, bowiem przypadki pęknięć kruchych w konstrukcjach stalowych, nawet w temperaturach dodatnich (powyżej 0°C), są powszechnie znane. Przyczyną tego jest przesunięcie temperatur krytycznych w kierunku dodatnim, wywołane oddziaływaniem na materiał różnych czynników, determinujących jego pracę w elemencie konstrukcyjnym lub też w całej konstrukcji.

Do najważniejszych czynników wywołujących przesunięcie temperatur krytycznych pękania stali, określających rzeczywiste zachowanie się materiału w konstrukcji, należy zaliczyć:

1. Czynniki konstrukcyjne:

- wielosiowy stan naprężenia (związany głównie z działaniem korbów)
- efekt skali (wpływ rozmiarów elementu konstr.)

2. Czynniki technologiczne:

- obecność koncentratorów naprężeń (wady spawalnicze oraz wady w materiale rdziny)
- naprężenia pozostające (naprężenia spawalnicze, walcownicze oraz powstałe w wyniku procesów obróbki cieplnej)
- starzenie stali (wywołane procesami technologicznymi: zgniot na zimno, spawanie)

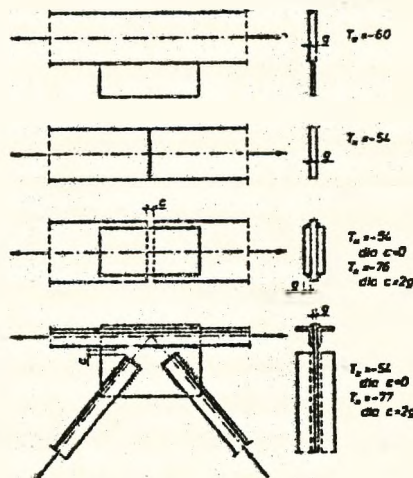
3. Czynniki eksploatacyjne:

- szybkość odkształcania (dynamiczny charakter obciążenia).
- poziom naprężeń nominalnych (w powiązaniu ze stopniem objętościowego stanu naprężenia)

Prognozowanie typu pęknięcia stalowego elementu konstrukcyjnego, staje się zatem możliwe dopiero po rozpoznaniu w/w czynników oraz ilościowym uwzględnieniu ich wpływu na przesunięcie temperatur krytycznych pracującego materiału.

I Badania wybranych elementów konstrukcyjnych:

Najbardziej miarodajne wyniki pomiarów krytycznych temperatur pęknięcia elementów konstrukcji stalowych można uzyskać w oparciu o badania prowadzone bezpośrednio na wybranych elementach. Wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych stają się szczególnie użyteczne wówczas, jeżeli odnoszą się do szeregu elementów konstrukcyjnych określonego typu. Pozwala to bowiem na ustalenie metody obliczeniowego oszacowania temperatur krytycznych, wspólnej dla pewnego typu elementów bądź też całych konstrukcji. Próbę taką podjął Silwestrow[7], badając drugie temperatury krytyczne T_{kr2} wybranych 12 węzłów spawanych, dla różnych grubości blach ulegających pękaniu.



Rys. 2. Wybrane węzły spawane oraz ich temperatury charakterystyczne

Na podstawie wyników badań ustalił on następujący wzór temperatury krytycznej:

$$T_{kr2} = \frac{T_x + (20^\circ + 1/\psi)(K_g - 1)}{K_g} \quad [^\circ\text{C}]$$

gdzie: T_x - temperatura charakterystyczna, wyznaczona dla danego typu węgla $[^\circ\text{C}]$

$K_g = 1 + 0,1g \leq 1,40$, g - grubość elementu $[\text{cm}]$

ψ - współczynnik przyjmowany w granicach od 0,0047 do 0,0054 $[1/^\circ\text{C}]$ (wartości mniejsze odnoszą się do stali uspokojonej i półuspokojonej, a większe - do nieuspokojonej)

Na rys. 2 pokazano kilka ważnych praktycznie węzłów, podając odpowiadające im wartości temperatur charakterystycznych T_x .

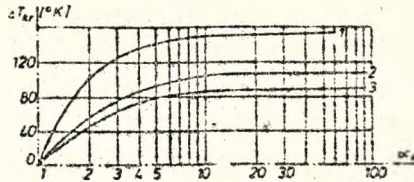
II Wykorzystanie pomiarów temperatur krytycznych próbki gładkiej znormalizowanej (zasada addytywności):

Temperatury krytyczne dla dowolnego elementu konstrukcyjnego ze stali, o wiele praktyczniej jest określać wykorzystując pomiary temperatur krytycznych próbki standardowej. Znając bowiem temperatury krytyczne próbki gładkiej znormalizowanej oraz przesunięcia tych temperatur od poszczególnych wpływów o ΔT_{kr} , temperatury krytyczne elementu konstrukcyjnego można wyznaczyć korzystając z zasady addytywności [3], [4]. W pierwszej kolejności zakłada się, że poszczególne czynniki wpływają na przesunięcie temperatur krytycznych niezależnie od siebie. Dzięki temu można przyjąć, że ich łączny wpływ na przesunięcie temperatur krytycznych, odzwierciedlający rzeczywistą pracę materiału w konstrukcji, będzie sumą przesunięć tych temperatur od poszczególnych czynników. Zatem:

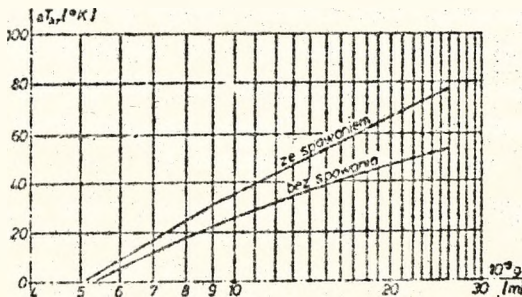
$$T_{kr1}^s = T_{kr1}^p + \sum \Delta T_{kr1} \quad , \quad T_{kr2}^s = T_{kr2}^p + \sum \Delta T_{kr2}$$

Do praktycznego oszacowania przesunięć ΔT_{kr} od poszczególnych czynników, mogą być wykorzystane wyniki badań doświadczalnych Machutowa i Serensena [3], [5], [6], przeprowadzonych na próbkach gładkich i udarnościowych ze stali niskowęglowych oraz niskostopowych.

Na rys. 3-4 przedstawiono wpływ podstawowych czynników na przesunięcie krytycznych temperatur pęknięcia, pracującej w konstrukcji stali.



Rys. 3 Wpływ współczynnika koncentracji naprężeń na przesunięcie temperatur krytycznych: 1 - podczas zginania udarowego, 2 - podczas osiowego i mimośrodowego statycznego rozciągania, 3 - podczas zginania statycznego



Rys. 4 Wpływ pozostających naprężeń spawalniczych (zależnych od grubości elementu) na przesunięcie temperatur krytycznych: dla elementu płaskiego z podłużną spoiną czołową, rozciąganego osiowo

III Badania dużych próbek (szeroka próbka Wellsa):

Próg kruchości oraz poziom naprężeń inicjujących kruche pękanie w danym elemencie konstrukcyjnym, w sposób przybliżony, określić można na podstawie badań dużych próbek. Do tej grupy badań zaliczyć można m.in. próbę Robertsona, ESSO oraz szeroką próbkę Wellsa, w których badane próbki odzwierciedlają pracę określonych konstrukcji [1].

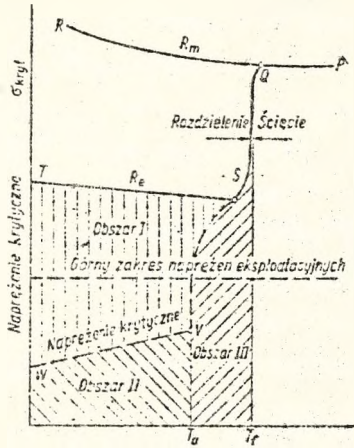
Próbka Wellsa, o szerokości 1m, przy rozciąganiu stwarza warunki odkształcenia materiału zbliżone do tych, jakie występują w elementach konstrukcyjnych przy statycznym obciążeniu. Właściwość ta pozwoliła Kiharze i Masobushi'emu [2] na wykorzystanie próbek Wellsa do oceny zachowania się stalowych konstrukcji spawanych (ze stali niskowęglowych) w obniżonych temperaturach. Ocena ta, przedstawiona w formie tabelarycznej na rys. 5, dokonana została na podstawie badań Wellsa i Kihary [1], dla trzech serii rozciąganych szerokich próbek. Serię I

stanowiły próbki materiału bez karbu, II serię - próbki z materiału z wewnętrznym karbem, III serię - próbki ze wzdłużną spoiną i z wewnętrznym ostrym karbem. Wyniki badań, przedstawione na rys. 6, pozwoliły określić dwie charakterystyczne temperatury kruchości stali, w warunkach zdeterminowanych przez pracę konstrukcji spawanej. Pierwsza z nich (T_f), odnosząca się do próbek z karbem, jest temperaturą, w której następuje gwałtowny spadek obciążenia niszczącego materiał ($\sigma_{kr} = R_e$). Drugą temperaturą graniczną (T_a) jest temperatura, w której próbki spawane z wewnętrznym karbem w strefie wpływu ciepła, pękają w sposób kruchy przy naprężeniach niższych od R_e i od naprężeń dopuszczalnych dla danego typu konstrukcji.

Temperatury T_f i T_a uznano za graniczne temperatury eksploatacji konstrukcji spawanych [2].

Temperatura eksploatacji konstrukcji	Karby	Naprężenia wewnętrzne	Naprężenia rebochi	Naprężenia wywołujące pęknięcie	Zachowanie się konstrukcji podczas eksploatacji	Charakter przełomu
dowolna	brak	ustąpięte przez wyżarzanie	—	powyżej P_{QR}	pęknięcie nie występuje	włóknisty
$t_e > T_f$	występują	ustąpięte przez wyżarzanie	—	powyżej P_{QR}	pęknięcie nie występuje	włóknisty
$t_e > T_f$	występują	ustąpięte przez wyżarzanie	—	powyżej krzywej ST	pęknięcie nie występuje	ziarnisty
$t_e > T_f$	występują	występują	—	powyżej krzywej PQ	pęknięcie nie występuje	włóknisty
$T_f > t_e > T_a$	występują	występują	—	obszar III	pęknięcie cząstowe	ziarnisty
$t_e < T_a$	występują	występują	krytyczne	obszar II	pęknięcie cząstowe	ziarnisty
$t_e < T_a$	występują	występują	krytyczne	obszar I	pęknięcie cząstowe	ziarnisty

Rys. 5 Zachowanie się konstrukcji spawanych w zależności od stanu naprężeń oraz temperatury eksploatacji



Rys. 6 Obszary naprężeń zrywających próbki Wellsa (schematycznie) w sposób plastyczny lub kruchy: obszar I — pęknięcie przebiega przez całą szerokość próbki bez zatrzymania się, obszar II — pęknięcie jest zapoczątkowane, lecz nie rozwija się, obszar III — pęknięcie częściowe zostaje zapoczątkowane, lecz nie rozwija się; T_1 — graniczna temperatura pracy bez ryzyka kruchych pęknięć o ograniczonym zasięgu, T_2 — graniczna temperatura kruchego pęknięcia przy małych obciążeniach

Literatura:

- [1] Butnicki S. - Spawalność i kruchość stali, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1979
- [2] Kihara H., Masobushi K. - "Effect of residual stress on brittle fracture.", Brit. Weld. J., 1959, No 4
- [3] Machutow N.A. - Soprotiwlenie elementow konstrukcij chрупkomu razruszeniju, Maszynostroenie, Moskwa, 1973
- [4] Rykaluk K. - Pozostające naprężenia spawalnicze w wybranych stanach granicznych nośności, Prace Naukowe Instytutu Budownictwa Politechniki Wrocławskiej, Nr 29, seria: Monografie, Nr 11, Wrocław, 1984
- [5] Serensen S.W., Machutow N.A. - "Mecchaniczieskije zakonomiernosti chрупkogo razruszenia", Awtomatizieskaja swarka, 1967, No 8
- [6] Serensen S.W., Machutow N.A. - "Opredelenie kriticzieskich temperatur chрупkosti izdelij iz malouglerodistoj stali", Problemy prochnosti, 1969, No 4, s. 29-39
- [7] Silwestrow A.W. - "O rasczetoj ocenke kriticzieskich temperatur chłodnokosti elementow stalnych konstrukcij Referaty V Konferenciji Naukowo-Techniczej "Konstrukcje metalowe" - "Nowoczesne konstrukcje metalowe w budownictwie", t. III, s. 281-291, Warszawa, maj 1974