ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1992

Seria: MECHANIKA z. 107 Nr kol. 1154

Piotr Adamiec, Jerzy Dziubiński
Instytut Transportu, Katedra Spawalnictwa
Politechnika Śląska

ZASTOSOWANIE MODELOWANIA MATEMATYCZNEGO DO OCENY SPAWALNOŚCI STALI

Streszczenie. Przedstawiono przykłady wykorzystania modelowania matematycznego do wstępnej oceny spawalności stali. Określono metodą elementów skończonych rozkłady naprężeń w rozciąganych złączach spawanych. Dokonano oceny warunków występowania pękania zimnego, kruchego oraz zmęczeniowego w spawanych połączeniach.

Резюме. Представлены примеры использования математического моделирования для вступительной оценки свариваемости стали . По методу конечных элементов определено распределение напряжений в растягиваемых сварных соединениях. Произведена оценка условий появления в сварных соединениях холодного и усталостного растрескивания.

Summary. Examples of the utilization of mathematical modelling for the estimation of steel weldability have been presented. The stress distribution in tensioned welded joints has been determined by finite element method. Conditions of the appearance of cold, brittle and fatigue cracks in welded joints have been estimated.

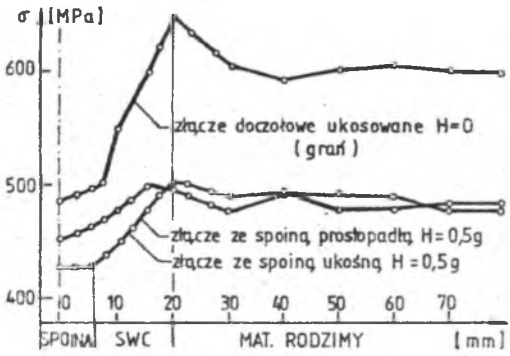
1. WPROWADZENIE

Badania spawalności stali oparte zwykle na analizie ich odporności na pękanie w procesie spawania są bardzo kosztowne i stąd zastosowanie badań modelowych do wstępnej oceny spawalności stali. Obok często stosowanych modeli fizycznych, problemy pękania połączeń spawanych można rozwiązać za pomocą modelowania matematycznego. Modelowanie to poprzez integrację i systematyzowanie informacji ułatwia i usprawnia działalność badawczą, prowadząc do minimalizacji czasu i badań kosztów spawalności.

Do oceny spawalności stali wykorzystuje się zachowanie złączy spawanych w obecności naprężeń spawalniczych i eksploatacyjnych, tzn. określa się warunki relaksacji lub pękania złączy. Modelowanie matematyczne pozwala na określenie wielkości naprężeń oraz obszarów ich spiętrzeń, np. za pomocą metody elementów skończonych (MES), oraz na wyznaczenie warunków pękania kruchego, zimnego i zmęczeniowego dla różnego typu połączeń spawanych.

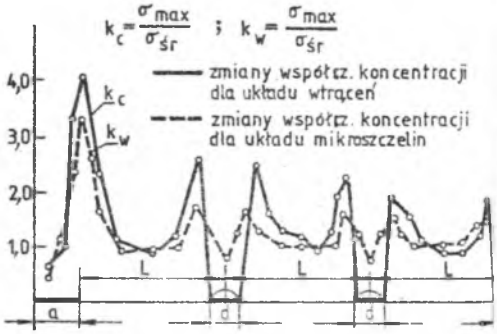
2. PRZYKŁADY WYZNACZANIA ROZKŁADU NAPRĘŻEŃ W POŁĄCZENIACH SPAWANYCH

W pracach [1,2] przedstawiono próby wykorzystania MESu do analizy stanu odkształceń i naprężeń w złączach spawanych. W pracy [1] analizowano zachowanie się rozciąganego złącza blach ze stali wysokowytrzymałych, spawanego elektrodami austenitycznymi. Przy założeniu, że własności strefy wpływu ciepła (SWC) są równe własnościom stali, wyznaczono rozkład naprężeń redukowanych w złączach ze spoiną prostopadłą (rys.1) i ze spoiną usytuowaną pod kątem 45° do osi rozciągania (rys.1).



Rys.1. Rozkład naprężeń wzdłuż złączy spawanych

Fig.1. Stress distribution along welded joints



Rys.2. Współczynnik koncentrcji naprężeń w pobliżu szczeliny głównej i nieciągłości

Fig.2. Stress concentration coefficients near main crack and discontinuity

Analizując wytężenie w złączach stwierdza się, że w przypadku spoiny prostopadłej intensywność naprężeń jest niższa od intensywności w spoinie ukośnej dla tych samych naprężeń w materiale rodzimym.

W przypadku rozciągania złącza doczołowego jednostronnie ukosowanego założono, że w SWC występują trzy warstwy o różnych własnościach wytrzymałościowych [1]. Analizując rozkład naprężeń (rys.1), stwierdza się, że najmniejsze naprężenia występują w SMC w okolicach grani spoiny, natomiast w samej grani naprężenia są najmniejsze.

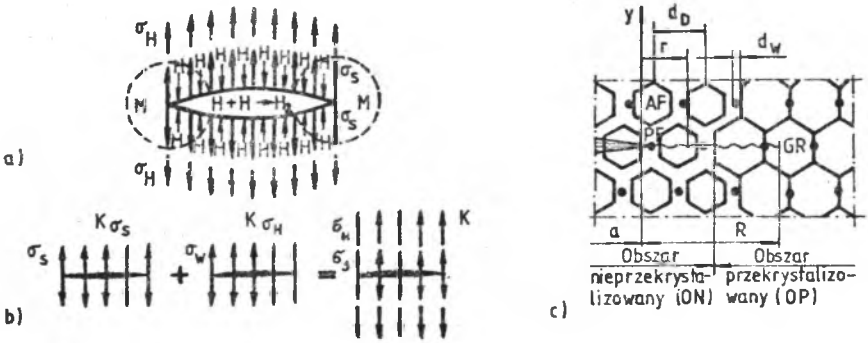
MES wykorzystano również do oceny rozkładu naprężeń w niejednorodnych układach symulujących spoinę zawierającą wtrącenia niemetaliczne i pęknięcia w procesie spawania [2]. Stwierdzono w przypadku rozciągania spiętrzenie naprężeń zarówno w pobliżu szczeliny głównej (pęknięcia), jak i w pobliżu zamodelowanych wtrąceń i mikroszczelin (rys.2). Największe wartości współczynników koncentracji występują przy szczelinie głównej, a najmniejsze przy wtrąceniach kulistych. Koncentracja naprężeń nie zależy praktycznie od wielkości d/L reprezentującej zawartość wtrąceń.

3. MODELE PĘKANIA SPOIN

Dokonano analizy pękania zimnego [3], kruchego i zmęczeniowego [4]. Przyjęto do oceny pękania zimnego model mikroszczeliny w SWC, w której występuje dyfundujący wodór, naprężenia spawalnicze i struktura martenzytyczna (rys.3a). Natomiast do pozostałych pęknięć przyjęto modele spoiny jedno i wielowarstwowej, w których można wyróżnić odpowiednią strukturę dwufazową ferrytu początkowego (PF) i drobnoziarnistego (AF) oraz obszar przekrystalizowany o strukturze ferrytycznej i obszar nieprzekrystalizowany o ww. strukturze dwufazowej (rys.3c).

W przypadku pękania zimnego naprężeniem zniszczenia jest suma naprężeń spawalniczych σ_s i naprężeń będących efektem dyfuzji wodoru atomowego σ_H i jego łączenia się w cząsteczki H_2.

Warunkiem pękania jest nierówność $K > K_c$, gdzie: K stanowi współczynnik intensywności naprężeń wynikających z obciążenia szczeliny, natomiast Kc stanowi krytyczny współczynnik intensywności wyznaczony zgodnie z ASTm E399-74. W modelu, korzystając z możliwości superpozycji naprężeń (rys.3b) można wyznaczyć współczynnik intensywności naprężeń K jako



Rys.3. Model pękania zimnego i model spoiny. Model pękania zimnego (a), σ_s - naprężenia spawalnicze, σ_H - naprężenia wywołane wodorem dyfundującym [H], M - martenzyt. Schemat określenia K w przyjętym modelu
(b). Model spoiny
(c); W spoinie jednowarstwowej znajduje się tylko struktura nieprzekrystalizowana, w spoinie wielowarstwowej znajduje się zarówno struktura nieprzekrystalizowana jak i przekrystalizowana

Fig.3. Cold cracking model and model of weld. Cold cracking model (a), σ_s - welding stresses. σ_H - stress induced by diffusion hydrogen [H], M - martensit. Scheme for determination of K value in assumed model
(b). Model of weld
(c); in a single-layer weld there is only as deposited microstructure while in a multi-layer weld there are both as deposited and grain refined microstructures

$$K = K_{\sigma_s} + K_{\sigma_H} \tag{1}$$

gdzie: $K_{\sigma_s} = \sigma_s\sqrt{\pi a}$,

$K_{\sigma_H} = A\,[H_o]^2\sqrt{\pi a}$ stanowią współczynniki intensywności będące efektem odpowiednio naprężeń spawalniczych i dyfuzji wodoru o koncentracji początkowej $[H_o]$,

A - stała uwzględniająca strukturę i własności stali.

Z warunku stabilności szczeliny $K < K_c$ można określić warunek odporności stali na pękanie zimne, stanowiące szczególny przypadek pękania kruchego.

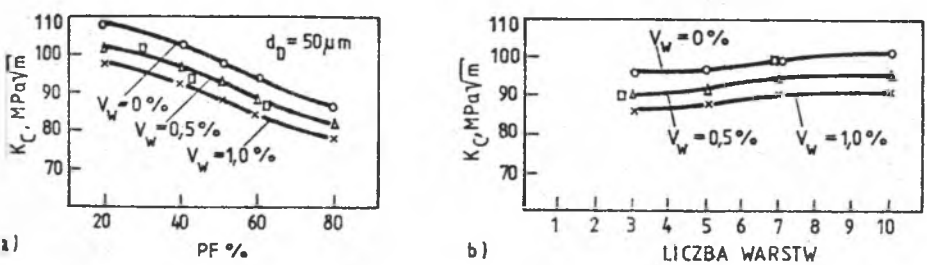
Do oceny pękania kruchego spoin wykorzystano zależność wielkości

strefy odkształconej plastycznie (R) w pobliżu szczeliny inicjującej pękanie kruche od struktury spoiny. W modelu spoiny jednowarstwowej przyjęto zmienną ilość ferrytu początkowego PF i drobnoziarnistego AF w granicach 20-80% oraz zmienną zawartość wtrąceń niemetalicznych V_w. W modelu spoiny wielowarstwowej założono obecność obszaru przekrystalizowanego o jednakowej strukturze ferrytycznej i obszaru nieprzekrystalizowanego o strukturze dwufazowej (rys.3c). Korzystając z rozważań i modeli spoin (rys.3c) obliczono wielkości krytycznego współczynnika intensywności naprężeń K_c przyjmując R jako wielkość strefy odkształconej plastycznie

$$K_c = \sqrt{2/\pi} \int_0^R \frac{\sigma_y(r)}{\sqrt{R - r}} dr \qquad (2)$$

gdzie: $\sigma_y(r)$ - oznacza granicę plastyczności dla poszczególnych składników strukturalnych.

Uzyskane zależności wpływu struktury na pękanie kruche spoin przedstawiono na rys 4. Modele spoiny jedno i wielowarstwowej (rys.3c)



Rys. 4. Wpływ zawartości ferrytu początkowego PF (a) w spoinie jednowarstwowej i liczby warstw (b) w spoinie wielowarstwowej na krytyczny współczynnik intensywności naprężeń K_c; o, x, Δ - dane obliczeniowe, □ - dane eksperymentalne

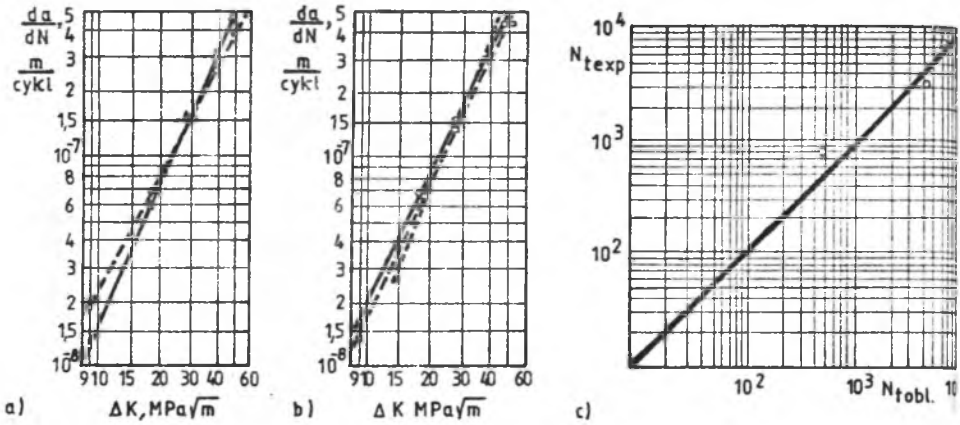
Fig. 4. Effect o primary ferrite PF contents (a) in single-layer welds and number of weld layers (b) in multi-layer welds on critical stress intensity factor K_c; o, x, Δ - calculation data, □ - experimental data

wykorzystano również do analizy pęknięć zmęczeniowych. Liczbę cykli N potrzebną do rozwoju pęknięcia zmęczeniowego określono na podstawie wyrażenia:

$$N = \frac{2}{(m-2)C\Delta\sigma^m}\left(\frac{1}{a_o^{(m-2)/2}} - \frac{1}{a_c^{(m-2)/2}}\right) \qquad (3)$$

przy czym stałe C i m wyznaczono na podstawie granicy plastyczności poszczególnych składników strukturalnych. Wyniki zestawiono na rys.5a,b [5].

W przypadku zmęczenia niskocyklowego do wyznaczenia przejściowej liczby cykli $2N_t$ wykorzystano zależność [6]:



Rys. 5. Wpływ zawartości ferrytu początkowego (o - 20% PF, Δ - 80% PF) w spoinach jednowarstwowych (a), liczby warstw (o - spoina 3 warstwowa, □ - 10 warstwowa - obliczenia, ----- - spoina 8 warstwowa - eksperyment) w spoinach wielowarstwowych (b) na da/dN oraz porównanie przejściowej liczby cykli N_{tobl} i N_{texp} podczas niskocyklowego zmęczenia złączy spawanych (c)

Fig. 5. Effect of primary ferrite volume fraction (o -20% PF, Δ - 80% PF) in single-layer welds (a), number of layer (o - 3 layers, □ -10 layers weld -calculation, ----- - 8 layers weld - - experiment in multi-layer welds (b) on da/dN and comparison of transition number of cycles N_{tcalc} and N_{texp} during low cycle fatigue of welds (c)

$$(2N_t)^{-0.4} = \frac{\sigma_{Fp} V_p + \sigma_{Fn} V_n}{0,35 \ln (\Pi/4V_w)E} \qquad (4)$$

gdzie: σ_{Fp}, σ_{Fn} - wytrzymałość doraźna spoiny o strukturze przekrystalizowanej i nieprzekrystalizowanej,

V_p, V_n - udziały tych struktur w spoinie,

V_w - udział wtrąceń niemetalicznych.

Uzyskane wyniki w porównaniu z wynikami rzeczywistymi przedstawiono na rys. 5c.

4. UWAGI DOTYCZĄCE MOŻLIWOŚCI OCENY SPAWALNOŚCI ZA POMOCĄ MODELOWANIA MATEMATYCZNEGO

Badanie modeli matematycznych złączy spawanych pozwala na analizę naprężeń w dowolnych makro- i mikroobszarach połączeń, m.in. w pobliżu karbów geometrycznych, pęknięć, mikroszczelin, wtrąceń itp.

Znajomość naprężeń i własności materiałowych elementów złącza pozwala ocenić miejsca i warunki pękania m.in. zimnego, kruchego i zmęczeniowego. Stwierdzono, że o pękaniu zimnym decydują podobne czynniki, jak w przypadku pękania kruchego. W celu analizy procesu pękania zimnego wykorzystano możliwość sumowania współczynników intensywności naprężeń spawalniczych i naprężeń będących wynikiem dyfuzji wodoru. Zależność $K<K_c$ można zastosować do oceny skłonności stali do pękania zimnego.

Największy wpływ na krytyczny współczynnik intensywności naprężeń spoin jednowarstwowych ma udział ferrytu początkowego. Liczba warstw w spoinach wielowarstwowych w niewielkim stopniu wpływa na ten współczynnik. Wpływ udziału ferrytu początkowego na prędkość pękania da/dN spoin jednowarstwowych jest pomijalny. Liczba warstw w spoinach wielowarstwowych również w niewielkim stopniu wpływa na prędkość pękania da/dN. Wpływ struktury na wytrzymałość niskocyklową spoin jest niewielki, natomiast znaczenie wtrąceń jest duże.

Ogólnie stwierdza się, że modelowanie matematyczne umożliwia ocenę wpływu naprężeń i struktury na pękanie złączy spawanych, przy czym wyniki wykazują zadowalającą zgodność z danymi eksperymentalnymi. Ocena ta umożliwia stawianie wstępnych wniosków o spawalności stali i jest mniej pracochłonna i kosztowna niż badania doświadczalne.

LITERATURA

[1] Adamiec P.i in.:Metoda elementów skończonych do oceny odkształceń złączy spawanych. Przegląd Spawalniczy 1987, nr 2, s.9.

[2] Adamiec P.:Metalurgiczne aspekty własności plastycznych spoin wykonanych łukiem krytym w złączach ze stali C-Mn. Zeszyty Naukowe Pol. Śl., ser. Mechanika, z.80, Gliwice 1984.

[3] Adamiec P.:K voprosu issledowanija chołodnych treszczyn, mat konf. Cracks in Welds. VUZ Bratislawa 1981, s.33.

[4] Dziubiński J., Adamiec P.:Modelowanie procesu pękania spoin. Inż. Materiałowa, 1986 nr 4-5, s.123.

[5] Wnuk M.: Podstawy mechaniki pękania. AGH, Kraków 1977.

[6] Dziubiński J., Adamiec P.:Określenie trwałości złączy przy zmęczeniu niskocyklowym. Arch. Tech. Budowy Maszyn, 1990 z.8.

APPLICATION OF MATHEMATICAL MODELLING FOR THE ESTIMATION OF STEEL WELDABILITY

Mathematical modelling for the determination of steel weldability enables us to estimate the microstructure effect on strees and strain distribution in welded joints, cold cracking, brittle and fatigue cracking.

Results of calculations reveal a satisfactory conformity with experimented data. Such an estimation is less expensive and labour--consuming than experimental investigations.

Algorithms of the numerical solution and of the finite element method (FEM) have been applied to welded joints. The stress and strain distribution for tensile test pieces and along the sheet thickeness for the weld axis (Fig.1,2,5a) have been calculated.

The distribution of stresses in welds with non-metallic inclusions and c racks has been estimated by FEM, as well (Fig.5).

It has been found out, that cold cracks formation is affected by the same conditions as the formation of brittle cracks. In order to analyse

the cracking process, the relation (1) was used, utilising the possibility to apply the principle of stress intensity coefficients addition (Fig.6). The relation $K<K_c$ can be applied to the evaluation of cold cracking susceptibility of steel.

Using models of single and multi-layer welds (Fig.7) and the relation (2), it has been found out that the greatest influence on K_c of single--layer welds is exerted by the ferrite volume fraction (Fig.8). The number of layers in multi-layerwelds has an inconsiderable effect on their K_c. The influence of primary ferrite contents and the number of weldlayers have an inconsiderable effect on da/dN (Fig.9).

The transition number of cycles, as a measure of cyclic strain resistance, depends on the microstructure and volume fraction on non--metallic inclusions, which considerable decreases the fatigue life (relation 4, Fig.10).