ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2003
Seria: TRANSPORT z. 48 Nr kol. 1604

Sylwester MARKUSIK, Tomasz ŁUKASIK, Damian GĄSKA

WPŁYW GEOMETRII ZŁĄCZA SPAWANEGO NA NAPRĘŻENIA POJAWIAJĄCE SIĘ W MIEJSCU SPODZIEWANEGO PĘKNIĘCIA ZMĘCZENIOWEGO

Streszczenie. Artykuł przedstawia wyniki badań tensometrycznych złączy spawanych poddanych obciążeniu rozciągającemu na maszynie wytrzymałościowej. Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów wyliczono naprężenia „hot spot" dla dwóch różnych typów złącz spawanych.

INFLUENCE OF WELDED JOINT GEOMETRY ON STRESSES ARISING IN THE PLACE OF ANTICIPATED CRACK INITIATION

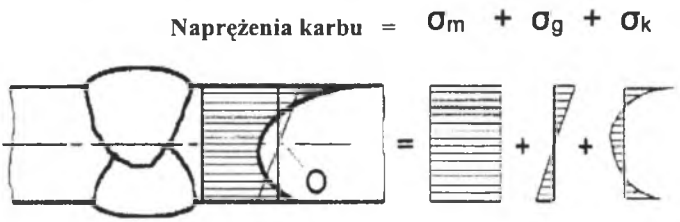
Summary. This paper presents results of static researches few samples of welded joints, statically loaded which have been made using strain gauges. The hot spot stress has been calculated based on the results receiving from researches.

1. WSTĘP

Tradycyjna metoda zmęczeniowa wyznaczania naprężeń w złączach spawanych oparta była w głównej mierze na naprężeniach nominalnych występujących w przekroju konstrukcji oraz na określaniu współczynników spiętrzenia naprężeń β i kształtu α_K. Takie podejście do obliczeń pomija rzeczywiste wpływy nieciągłości struktury w strefie wpływu ciepła połączenia spawanego na wzrost naprężeń spowodowany występowaniem karbu strukturalnego oraz geometrycznego. Rozróżnienie naprężeń nominalnych od naprężeń lokalnych wywołanych karbami strukturalnymi oraz geometrycznymi nie zawsze jest jednoznacznie interpretowane, ponadto forma komponentów spawanych jest często tak złożona, że określenie naprężeń nominalnych jest bardzo trudne lub niemożliwe [1]. Podejście lokalne „hot spot approach" idzie jeden krok dalej i bazuje na określaniu naprężeń uwzględniających również geometrię określonego elementu konstrukcyjnego.

2. OKREŚLANIE NAPRĘŻEŃ

Rozkład naprężeń normalnych wokół spoiny jest nieliniowy, tak jak pokazano na rys. 1



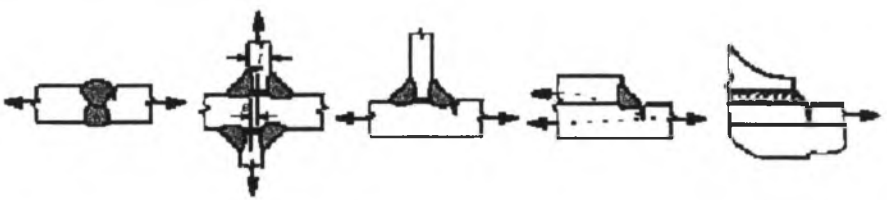
Rys. 1. Nieliniowy rozkład naprężeń wokół spoiny wraz z rozbiciem na poszczególne składowe
Fig. 1. Non-linear stress distribution separated to stress components

gdzie: σ_m – naprężenia wywołane rozciąganiem lub ściskaniem,
σ_g – naprężenie wywołane zginaniem,
σ_k – nieliniowe naprężenie karbu.

Naprężenie σ_m są równe średnim naprężeniom normalnym liczonym w poprzek grubości płyty, są one stałe na całej grubości spoiny. Naprężenia gnące σ_g są liniowo rozłożone w płycie w poprzek jej grubości. Nieliniowe naprężenie σ_k jest pozostałym składnikiem naprężeń karbu. Poszczególne składowe mogą być oddzielnie wyznaczone analitycznie dla danego rozkładu naprężeń $\sigma(x)$, $x=0$ na powierzchni $x=t$ liczone w poprzek grubości [2].

3. NAPRĘŻENIA GEOMETRYCZNE „HOT SPOT"

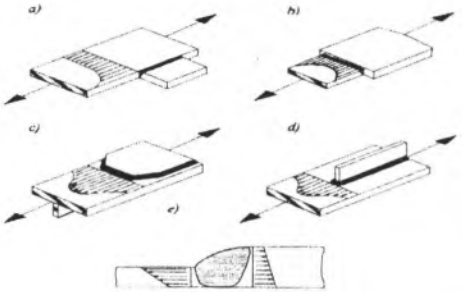
„Hot spot" (punkt gorący) to punkt na brzegu spoiny, gdzie przewiduje się wystąpienie pęknięcia zmęczeniowego (rys. 2).



Rys. 2. Przykłady pęknięć zmęczeniowych w punkcie „hot spot"
Fig. 2. Varuious locations of crack propagation in „hot spot"

Naprężenia konstrukcyjne lub geometryczne zwane z ang. „hot spot stress", „struktural stress" lub „geometrical stress" bazują na sumie wartości naprężeń σ_m i σ_g w tym punkcie (rys.1). Naprężenia konstrukcyjne uwzględniają efekt wzrostu naprężeń wywołanych geometrią złącza spawanego, wykluczając koncentracje naprężeń związanych z geometrią profilu samej spoiny, tak że nieliniowy skok naprężenia spowodowany lokalnym karbem na krawędzi spoiny jest pomijany przy ich wyznaczaniu [3]. Naprężenia konstrukcyjne zależą od wymiarów złącza oraz obciążeń, są wyznaczane na powierzchni lub krawędzi płyty w punkcie danego elementu branego pod uwagę (rys. 3). Zwykle naprężenia te napotykamy w płytach, powłokach i cienkościennych profilach drążonych. W przypadku „hot spot'u" na powierzchni

płyty naprężenie to może być podzielone na dwa składniki σ_m oraz σ_g, które mogą być wyznaczone analitycznie lub numerycznie (MES). Naprężenia konstrukcyjne są większe od naprężeń nominalnych. Metody „hot spot" nie stosuje się w przypadkach, kiedy pęknięcie zmęczeniowe powstaje wewnątrz spoiny i propaguje w kierunku wnętrza złącza oraz dla spoin ciągłych w przypadkach naprężeń wzdłużnych. Często elementy spawane występują w dwuosiowym stanie naprężeń; wtedy podejście „hot spot stress" stosowane jest dla głównego naprężenia działającego prostopadle (pomiędzy 45° i 90°) do brzegu spoiny [4].

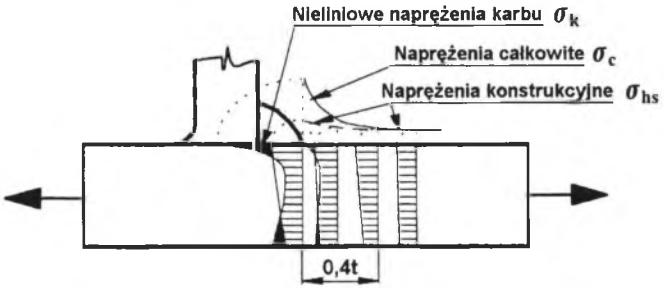


Rys. 3. Naprężenia konstrukcyjne w danych elementach spawanych konstrukcji
Fig. 3. Structural details and structural stress

4. WYZNACZANIE NAPRĘŻEŃ „HOT SPOT"

Wyznaczanie tych naprężeń może być przeprowadzone zarówno analitycznie, jak i eksperymentalnie. Do wyznaczania naprężeń można użyć ekstrapolacji liniowej lub kwadratowej [5]. Procedury ekstrapolacyjne są podobne dla obydwu metod.

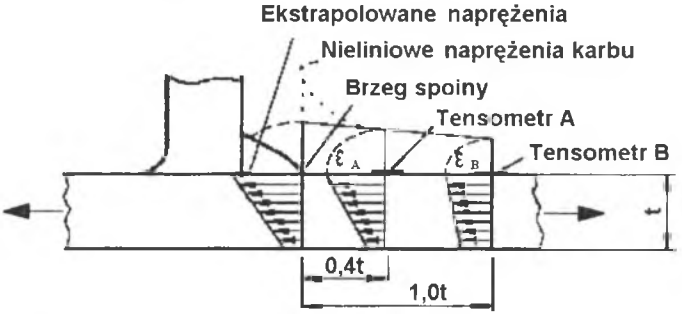
Ekstrapolacja musi być przeprowadzona poza obszarem wpływu ciepła, skutków związanych z geometrią samej spoiny oraz nieciągłości na jej brzegu, ale na tyle blisko, aby można było zaobserwować gradient wzrostu naprężenia konstrukcyjnego wywołanego globalnymi efektami geometrycznymi złącza [6]. Rys. 4 pokazuje, jak rozkład naprężeń na grubości blachy zmienia się w pobliżu „hot spotu" (punktu gorącego). W odległości 0,4t (t – grubość blachy) od brzegu spoiny składowa nieliniowa praktycznie zanika i rozkład jest prawie liniowy (rys. 4).



Rys. 4. Zmiany rozkładu naprężeń wraz z oddalaniem się od spoiny
Fig. 4. Development of stress distribution when the cross section approaches to the weld toe

Fakt ten wykorzystywany jest w technice ekstrapolacyjnej używanej do wyznaczania konstrukcyjnych naprężeń „hot spot" (rys. 5). Dwa tensometry, A i B, umieszcza się w odległości 0,4t oraz 1,0t od brzegu spoiny. Wyznaczone na nich odkształcenie podstawia się

do odpowiednich wzorów: (1), (2). Baza pomiarowa tensometru nie powinna przewyższać wartości 0,2t [4]. Jeżeli nie jest to możliwe, gdy badany materiał ma małą grubość, wtedy brzeg tensometru powinno się umieścić w odległości 0,3t od brzegu spoiny [7].



Rys. 5. Liniowa ekstrapolacja punktów pomiarowych
Fig. 5. Linear extrapolation of the measured strains to the weld toe

Gdy tensometry znajdują się w odległości 0,4t i 1,0t od brzegu spoiny, to strukturalne odkształcenia „hot spot" wyliczane są następująco [4]:

$$\varepsilon_{hs} = 1{,}67\varepsilon_A - 0{,}67\varepsilon_B \tag{1}$$

gdzie:

ε_{hs} – odkształcenia hot spot, ε_A – odkształcenia na tensometrze A, ε_B – odkształcenia na tensometrze B.

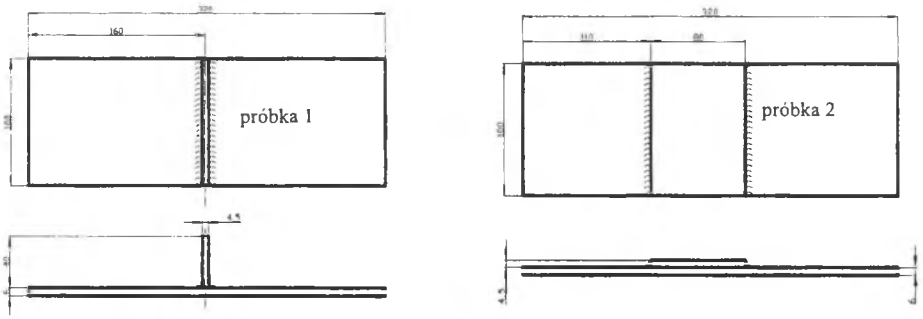
Wyniki otrzymane w ten sposób porównywalne są z wynikami obliczeń uzyskanymi przy użyciu metody elementów skończonych. Jeżeli występuje jednoosiowy stan naprężeń, to konstrukcyjne naprężenia uśrednione obliczane są wg wzoru (3) [4].

$$\sigma_{hs} = E \cdot \varepsilon_{hs} \tag{2}$$

E – moduł Younga (dla stali $E=2{,}1\cdot10^5$ [MPa]).

5. TENSOMETRYCZNE POMIARY NAPRĘŻEŃ

Do wykonania pomiarów naprężeń konstrukcyjnych użyto tensometrów oporowych TF-1/120 firmy TENMEX. Próbne złącza spawane, które posłużyły do badań, zostały wykonane ze stali St3S, a ich wymiary przedstawione są na rys. 6.



Rys. 6. Wymiary próbnych złącz poddanych badaniom
Fig. 6. Dimension of the welded joints samples which have been undergone the researches

Próbki były rozciągane w kierunku prostopadłym do brzegu spoiny. Na końcach blach wykonano napoiny zapobiegające wyślizgiwaniu się z uchwytów maszyny wytrzymałościowej.

Wykonanie układu pomiarowego polegało na połączeniu tensometrów czynnych i kompensacyjnego z urządzeniami służącymi do odczytu mierzonej wartości odkształcenia i symulującymi mostek Wheatstone'a. Urządzeniami tymi były:

- wzmacniacz tensometryczny,
- skrzynka rozdzielcza,
- miernik uniwersalny.

Wzmacniacz tensometryczny to wysokiej klasy, bardzo stabilny, tensometryczny wzmacniacz pomiarowy typu KWS 3082 firmy Hottinger Baldwin Messtechnik. Aparat ten może być stosowany zarówno w wymagających dużej precyzji i dokładności badaniach laboratoryjnych, jak i we wszelkich badaniach prowadzonych na obiektach przemysłowych. Ze względu na wielopunktowy pomiar zastosowano skrzynkę rozdzielczą firmy Bruel & Kjoer typu 1531. W skrzynce tej przewidziano specjalny układ, który eliminuje wpływ rezystancji przewodów pomiarowych, jak również połączeń między skrzynką rozdzielczą i wzmacniaczem KWS.

Maszyna wytrzymałościowa użyta do badań była maszyną typu ZD40 firmy VEB Werkstoffprufmaschinen Leipzig o zakresie działania od 0 do 400 [kN]. Działa ona na zasadzie układu hydrauliki siłowej. Dokładne sterowanie maszyną zapewnia panel sterowania, na którym umieszczony jest także, w postaci dużego zegara, wskaźnik wielkości siły działającej na próbkę. Uchwyty mocujące próbki miały wymiary 100x80 [mm].

Celem pomiarów było wyznaczenie wartości naprężeń występujących w punkcie przewidywanego pęknięcia zmęczeniowego metodą „hot spot".

Pomiary zostały wykonane w Laboratorium Mechaniki i Wytrzymałości Materiałów Politechniki Śląskiej, Wydziału Inżynierii Materiałowej i Metalurgii w Katowicach.

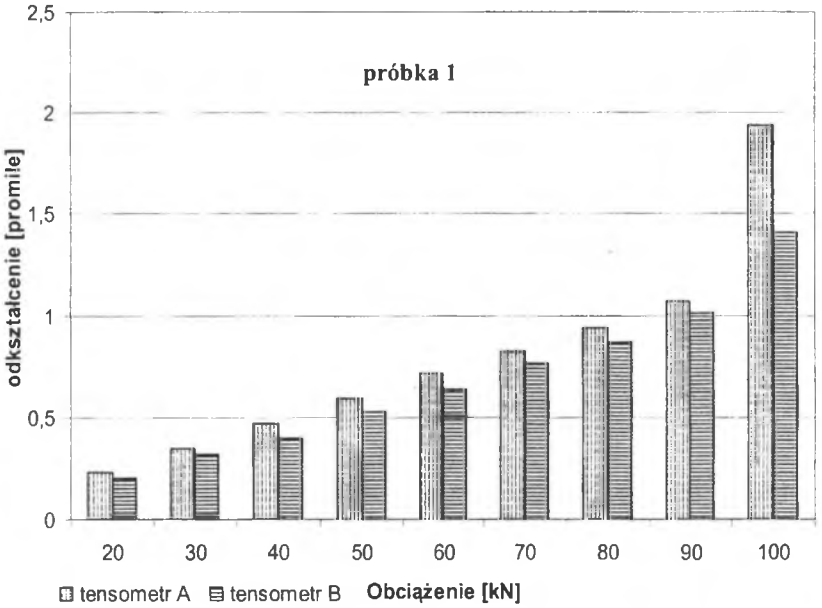
Wyniki pomiarów przedstawiono w tablicy 1. W zakresie stosowalności prawa Hooke'a możliwe było obliczenie naprężeń w miejscach, w których umieszczone były tensometry. Dla stali St3S wartość granicy plastyczności wynosi 235 [MPa]. Dlatego dla obciążenia o wartości 100 kN dla próbki nr 1 oraz obciążenia 60 kN i więcej dla próbki nr 2 (tablica 1) niemożliwe było obliczenie naprężeń wg wzoru (2). Przy założonych dla tych pomiarów wartościach sił rozciągających materiał przekroczył już granicę sprężystości. Wyraźnie przedstawiają to wykresy zależności wartości siły od mierzonych wartości odkształceń przedstawione na rys. 7.

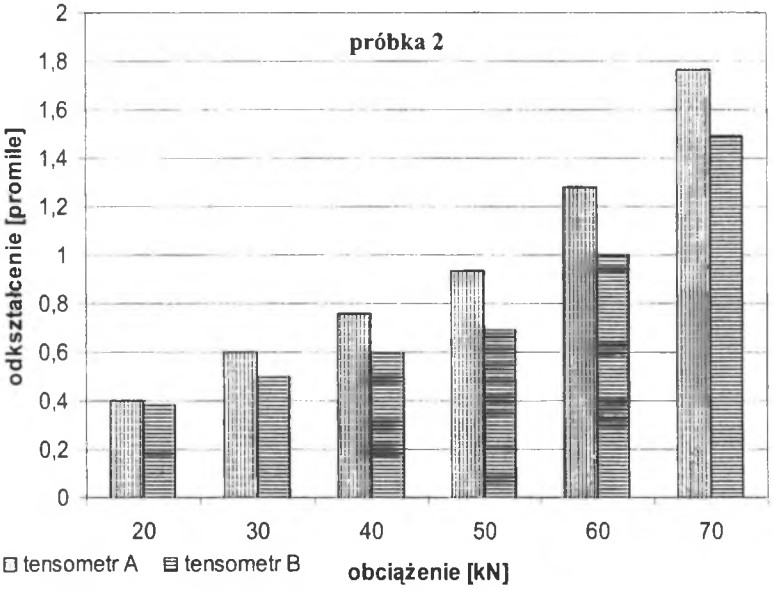
Tablica 1

	Próbka 1				Próbka 2			
F [kN]	ε_A [‰]	ε_B [‰]	ε_{hs} [‰]	σ_s [MPa]	ε_A [‰]	ε_B [‰]	ε_{hs} [‰]	σ_s [MPa]
20	0,230	0,205	0,247	51,8	0,402	0,381	0,416	87,4
30	0,348	0,315	0,370	77,7	0,600	0,494	0,671	140,9
40	0,472	0,401	0,520	109,1	0,760	0,596	0,870	182,7
50	0,596	0,525	0,644	135,1	0,933	0,690	1,096	230,1
60	0,712	0,636	0,763	160,2	1,280*	1,000	1,468	-
70	0,823	0,765	0,862	181,0	1,764*	1,490*	1,948	-
80	0,937	0,870	0,982	206,2	-	-	-	-
90	1,070	1,010	1,110	233,1	-	-	-	-
100	1,940*	1,406*	2,300	-	-	-	-	-

* - dla tych pomiarów niemożliwe było wyznaczenie naprężeń, ponieważ przekroczono granicę stosowalności prawa Hooke'a

Do obliczenia odkształceń „hot spot" ε_{hs} wykorzystano wzór (1), natomiast naprężenia konstrukcyjne σ_{hs} obliczono wg wzoru (2).





Rys. 7. Wykresy porównawcze wartości odkształceń otrzymanych na tensometrach w poszczególnych próbach

Fig. 7. Comparative graphs of values received from researches in particular tests

6. WNIOSKI

1) Przeprowadzone badania potwierdziły słuszność przyjętych założeń do wyznaczania naprężeń konstrukcyjnych metodą „hot spot". W każdym przypadku pomiarów odnotowano większe odkształcenie zarejestrowane przez tensometr A, który był umieszczony bliżej spoiny. Odkształcenia wykazane przez tensometry rosły proporcjonalnie w stosunku do odległości od spoiny zachowując liniowy charakter. W przypadku badania próbki pierwszej (przy obciążeniu 100 kN) i próbki drugiej (przy obciążeniu 60 kN i więcej) odnotowano duży wzrost odkształcenia tensometrów. Było to spowodowane przekroczeniem w tych próbach granicy sprężystości, co w rezultacie uniemożliwiło obliczenie rzeczywistego naprężenia. Badanie drugiej próbki wykazało ok. 70% wzrost naprężenia konstrukcyjnego w stosunku do pierwszej. Wynika stąd, że spawane złącze nakładkowe jest bardziej niekorzystne ze względu na wytrzymałość zmęczeniową w stosunku do złącza teowego.

2) Brzeg spoiny jest newralgicznym punktem złącza spawanego, ponieważ zazwyczaj tam pojawia się pierwsze pęknięcie zmęczeniowe. Jest to spowodowane koncentracją naprężeń w tym miejscu wywołane oddziaływaniem karbu geometrycznego i strukturalnego. Określenie naprężeń w tym miejscu pozwoli na dokładniejsze zaprojektowanie złącza spawanego w konstrukcji stalowej unikając jej przewymiarowania.

3) Celem obecnie prowadzonych badań nad metodą wyznaczania naprężeń na brzegu spoiny, zwaną „hot spot stress", jest określenie podstawowych parametrów wytrzymałości zmęczeniowej złączy spawanych na podstawie pomiarów ich geometrii oraz wyznaczenie kategorii zmęczeniowych dla konkretnych złączy. Efektem takich działań może być opracowanie procedur szybkiego szacowania trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych opartych jedynie na pomiarach geometrii gotowych złączy lub całych konstrukcji spawanych.

Literatura

1. Radaj D., Sonsino C.: Fatigue assessment of welded joints by local approaches. Abington Publishing 1998.
2. Szubryt M.: Analiza stanu naprężeń i ich wpływu na wytrzymałość zmęczeniową złączy spawanych w oparciu o tzw. podejście lokalne. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa nr 3/2002.
3. Markusik S., Łukasik T.: Metoda „Hot Spot" wyznaczania naprężeń w spoinach konstrukcji stalowych dźwignic. Maszyny Dźwigowo – Transportowe nr 4/2001.
4. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. Dok. MIS XIII-1539-96 wersja 2002.
5. Niemi E.: Structural stress approach to fatigue analysis of welded components. Dok. MIS XIII-1819-00.
6. Niemi E.: Designer's guide for hot spot fatigue analysis. Dok. MIS XIII-WG3-06-99.
7. Henry J., Huther M.: Recommendation for hot – spot stress definition in welded joints. Dok. MIS XIII-1416-91.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jerzy Antoniak

Abstract

Fatigue analysis of welded joints and components has usually been based on nominal stress range. The so–colled hot spot approach goes one step forward. Here the calculated stress takes the dimension of the detail better into account. This calculated stress at the anticipated crack initiation site is called the structural hot spot stress. Structural stress include the membrane stress concentration and shell bending stressed caused by the detail itself but not include the non – linear stress peak caused by the local notch at the weld toe. Hot spot stress might be resolved by analytical or numerical method or can by found by experimental method using a strain gauge.

Praca badawcza w ramach BW- 454/RT3-3/2003