

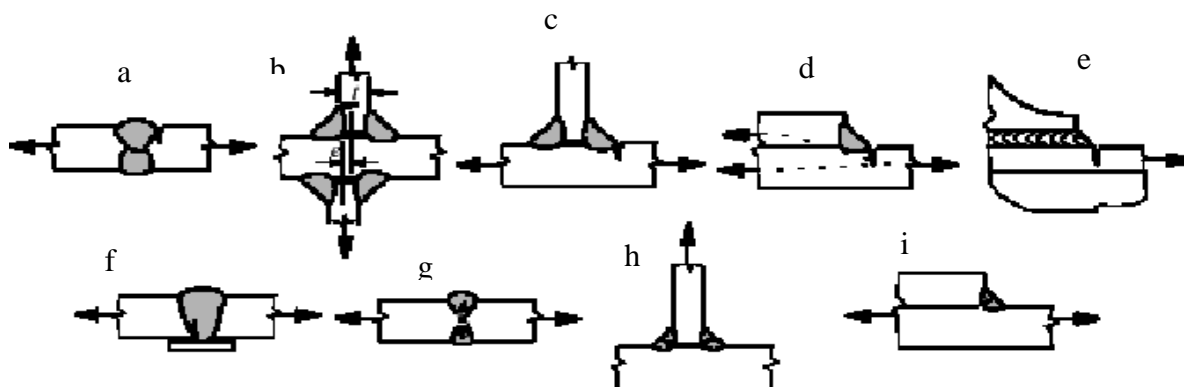
Sylwester MARKUSIK
Tomasz ŁUKASIK

NAPRĘŻENIA „HOT SPOT STRESS” W POŁĄCZENIACH SPAWANYCH KONSTRUKCJI STALOWYCH

Streszczenie: Połączenia spawane w konstrukcjach stalowych stanowią newralgiczne punkty pod względem obliczania ich wytrzymałości zmęczeniowej. Dotychczasowe metody obliczeń złączy spawanych uwzględniały tylko naprężenia występujące w przekrojach całych elementów i nie brały pod uwagę koncentracji naprężeń występujących w pobliżu spoiny spowodowanych geometrycznymi aspektami detalu. W niniejszym artykule przedstawiono podejście lokalne tzw. „hot spot approach” do wyznaczania obciążeń w połączeniach spawanych.

1. WSTĘP

Tradycyjna analiza zmęczeniowa elementów spawanych narażonych na obciążenia zmienne oparta była w głównej mierze na naprężeniach nominalnych występujących w przekroju konstrukcji oraz na wyznaczeniu współczynników spiętrzenia naprężeń β i kształtu α_K . Danej części konstrukcji przypisana była w normach konkretna klasa wytrzymałości na zmęczenie oraz odpowiednia krzywa zależności naprężeń od liczby cykli (krzywa Wohlera). Takie podejście do obliczeń pomija rzeczywiste wpływy nieciągłości struktury w strefie wpływu ciepła połączenia spawanego na jego wytrzymałość zmęczeniową. Rozróżnienie naprężeń nominalnych od naprężeń lokalnych wywołanych korbami strukturalnymi oraz geometrycznymi nie zawsze jest jednoznacznie interpretowane, ponadto forma komponentów spawanych jest często tak złożona, że określenie naprężeń nominalnych jest trudne lub niemożliwe. Podejście lokalne „hot spot approach” idzie jeden krok dalej i bazuje na określaniu naprężeń uwzględniających również geometrię określonego detalu.

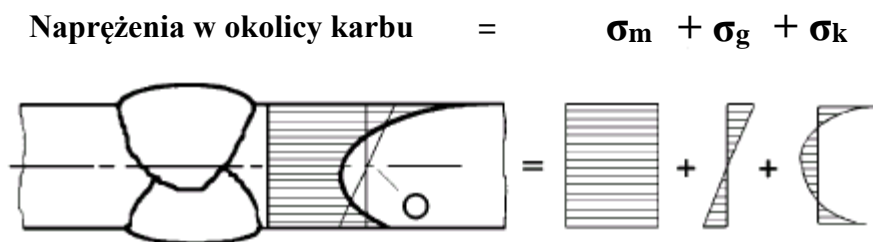


Rys.1. Przykłady powstawania pęknięć zmęczeniowych w spoinach konstrukcji stalowych

Naprężenia występujące w miejscu spodziewanego pęknięcia zmęczeniowego (punkt gorący z ang. hot spot) nazywane są naprężeniami konstrukcyjnymi „hot spot stress”. Naprężenia konstrukcyjne uwzględniają wpływ geometrii złącza oraz nieciągłości struktury danego detalu, pomijając nieliniowy skok naprężeń wywołany korbem spowodowanym przez profil samej spoiny. Naprężenia te są zwykle większe od naprężeń nominalnych. Zastosowanie metody elementów skończonych umożliwia również stworzenie równań parametrycznych ułatwiających wyznaczanie naprężeń strukturalnych dla różnych typów hot spot-u .

2. OKREŚLENIE NAPRĘŻEŃ

Rozkład naprężeń wokół spoiny jest nieliniowy tak jak pokazano na rysunku 2



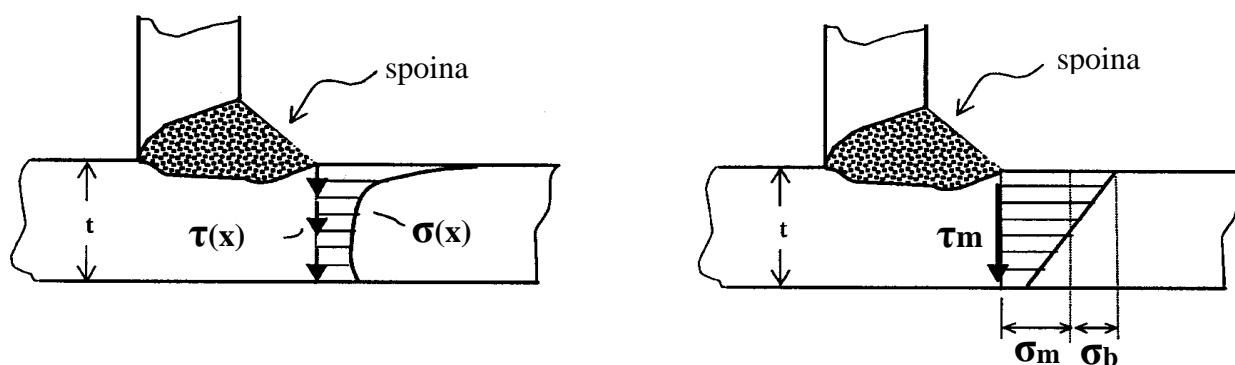
Rys.2. Rozkład naprężeń wokół spoiny

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

σ_m jest równe średnim naprężeniom normalnym liczonym w poprzek grubości płyty, są stałe na całej grubości. Naprężenie gnące σ_g jest liniowo rozłożone w płycie w poprzek 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[4]:

$$\sigma_m = \frac{1}{t} \cdot \int_{x=0}^{x=t} \sigma(x) \cdot dx \quad (1)$$

$$\sigma_b = \frac{6}{t^2} \cdot \int_{x=0}^{x=t} \sigma(x) \cdot \left(\frac{t}{2} - x\right) \cdot dx \quad (2)$$

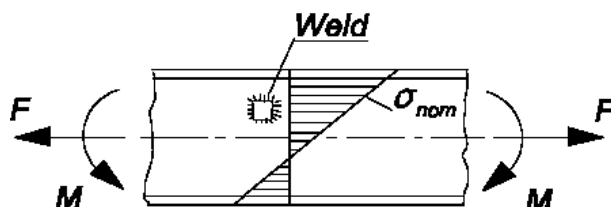


Rys.3. Rozkład naprężeń w przekroju w miejscu spodziewanego pęknięcia zmęczeniowego

- (a) lokalne naprężenia normalne i styczne na brzegu spoiny
 (b) zdefiniowane naprężenia konstrukcyjne na brzegu spoiny

3. NAPRĘŻENIA NOMINALNE

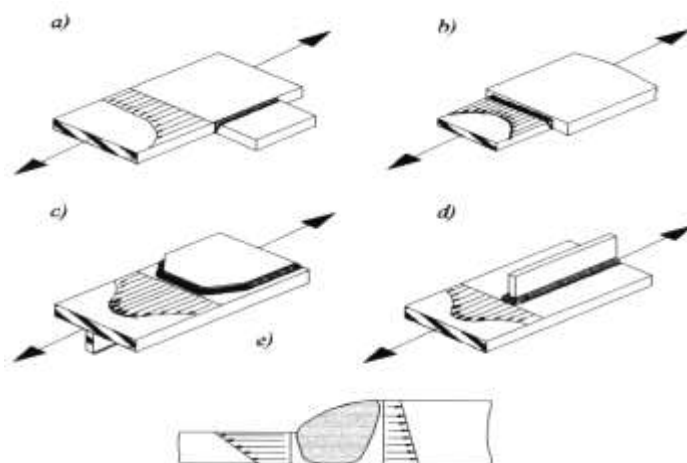
Naprężenia nominalne są liczone w przekroju danego elementu bez brania pod uwagę lokalnego wzrostu naprężeń spowodowanych spoiną(rys.4), ale uwzględniające wzrost naprężeń spowodowany przez zmianę kształtu całego elementu w pobliżu spoiny takich jak np. wycięcia. Naprężenia nominalne mogą się zmieniać w przekroju i są zwykle obliczane tradycyjnymi metodami korzystając z liniowej sprężystości ciał[2].



Rys.4. Rozkład naprężeń nominalnych w przekroju zginanego dźwigara

4. PODEJŚCIE LOKALNE „HOT SPOT APPROACH”

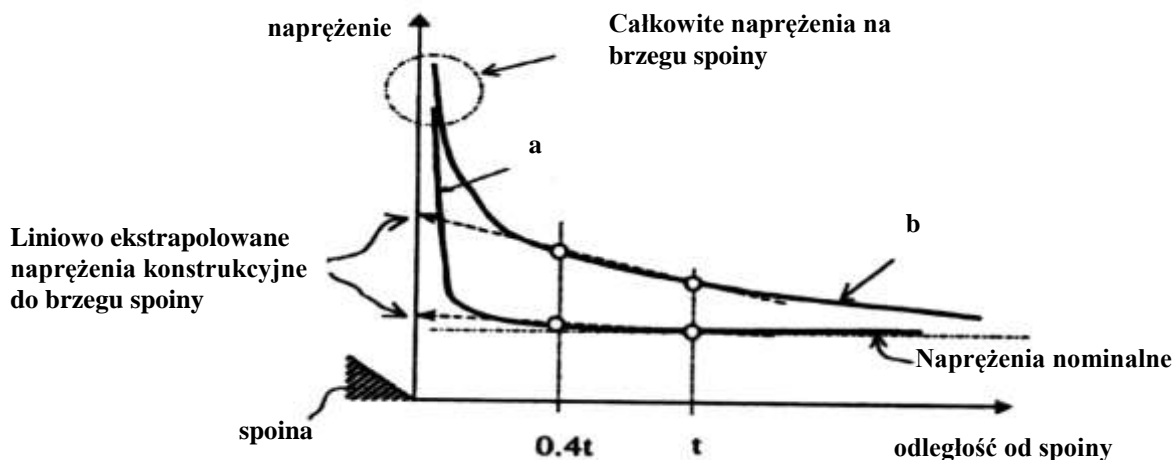
„Hot spot” (punkt gorący) to punkt na brzegu spoiny, gdzie przewiduje się wystąpienie pęknięcia zmęczeniowego. Naprężenia konstrukcyjne lub geometryczne zwane „hot spot stress”, „struktural stress” lub „geometrical stress” bazują na wielkości naprężeń konstrukcyjnych w tym punkcie. Naprężenia konstrukcyjne 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 wyznaczaniu naprężeń konstrukcyjnych[9]. Naprężenia konstrukcyjne zależą od całkowitych parametrów wymiarowych oraz obciążenia i są wyznaczane na powierzchni lub krawędzi płyty w punkcie danego elementu branego pod uwagę. (Rys.5)



Rys.5. Naprężenia konstrukcyjne w danych elementach spawanych konstrukcji

Zwykle naprężenia te napotykamy w płytach, powłokach i cienkościennych profilach drążonych. W przypadku „hot spotu” na powierzchni płyty naprężenie może być podzielone na dwa składniki σ_m oraz σ_g które mogą być wyznaczone analitycznie lub

numerycznie (MES) dla danego rozkładu naprężeń. Naprężenia konstrukcyjne są większe od naprężeń nominalnych.

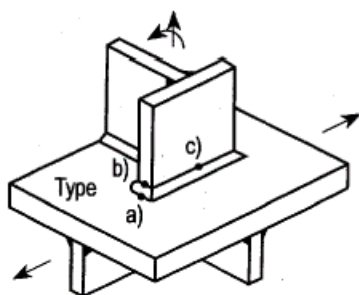


Rys.6. Koncentracja naprężeń na brzegu spoiny krzywe a i b reprezentują różne typy złączy spawanych, gdzie t oznacza grubość spawanego elementu

5. TYPY „HOT SPOT-u”

Hot spot możemy podzielić na dwa typy [4-6]:

- Typ „a” – spoina znajduje się na powierzchni płyty,
- Typ „b” – spoina znajduje się na krawędzi płyty,
- Typ „c” – spoina znajduje się na powierzchni płyty a naprężenie jest równoległe do brzegu spoiny.



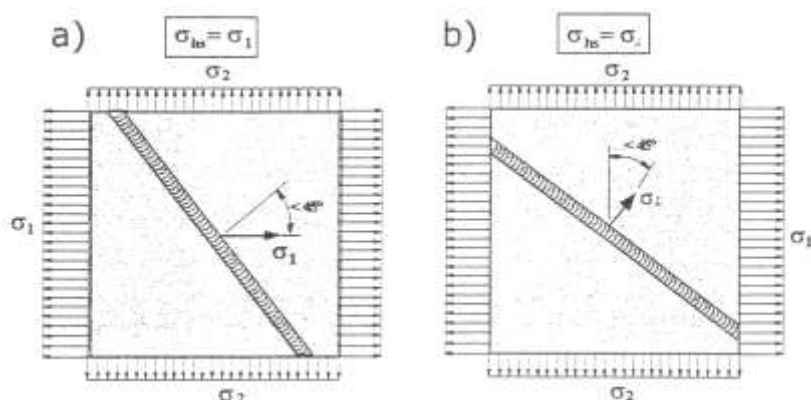
Rys.7. Typy hot spot-u

6. ZASTOSOWANIE PODEJŚCIA LOKALNEGO

Podejście lokalne „hot spot” można stosować do następujących złączy spawanych:

- występujące naprężenia działają przeważnie poprzecznie do brzegu spoiny (również w przypadku końców nieciągłości spoiny podłużnej),
- szczeliny uszkodzeń powstają na brzegu spoiny (rys.1 a-e),

- główne naprężenia powierzchniowe działające aproksymacyjnie prostopadle do spoiny, tj. w zakresie $\pm 45^\circ$ od normalnej do brzegu spoiny (rys.8a),
- naprężenia działające prostopadle do brzegu spoiny (rys.8b).



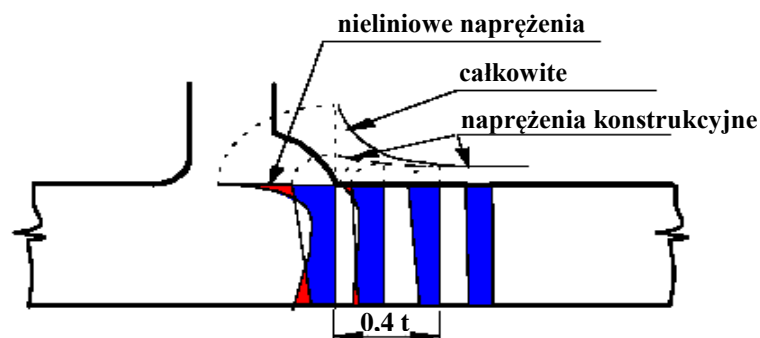
Rys.8. Możliwe odchylenia naprężenia głównego od osi prostopadłej do spoiny

Podjęcie lokalne (hot spot stress) nie jest stosowane w przypadkach kiedy pęknięcie zmęczeniowe powstaje wewnątrz spoiny i propaguje w kierunku wnętrza złącza (rys.1 f-i) oraz do spoin ciągłych w przypadkach naprężeń wzdłużnych. Często elementy spawane występują w dwuosiowym stanie naprężeń, wtedy podjęcie ‘hot spot stress’ stosowane jest dla głównego naprężenia działającego prostopadle (pomiędzy 45° i 90°) do brzegu spoiny.

7. WYZNACZANIE NAPRĘŻEŃ „HOT SPOT STRESS”

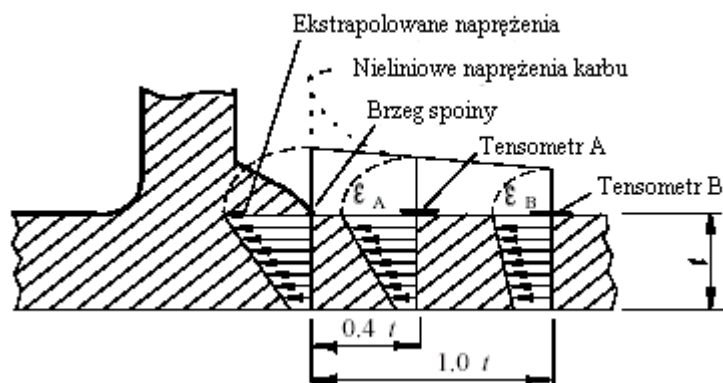
Wyznaczenie naprężeń „hot spot” może być przeprowadzone zarówno analitycznie jak i eksperymentalnie. Do wyznaczania tych naprężeń można użyć ekstrapolacji liniowej lub kwadratowej. Procedury ekstrapolacyjne są prawie takie same dla obydwu metod[7].

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 [10]. Rys.9 pokazuje jak rozkład naprężeń na grubości blachy zmienia się w pobliżu hot spotu (punktu gorącego) typu „a”. W odległości $0,4t$ (t – grubość blachy) od brzegu spoiny składowa nieliniowa praktycznie zanika i rozkład jest prawie liniowy (Rys.9).



Rys.9. Zmiany rozkładu naprężeń wraz z oddalaniem się od spoiny

Fakt ten wykorzystywany jest w technice ekstrapolacyjnej używanej do wyznaczania konstrukcyjnych naprężeń hot spot (rys.8). Dwa tensometry, A i B, umieszcza się w odległości $0,4t$ oraz $1,0t$ od brzegu spoiny. Wyznaczone odkształcenie podstawia się do odpowiednich wzorów. Baza pomiarowa tensometru nie powinna przewyższać wartości $0,2t$ [4]. Jeżeli nie jest to możliwe, na niewielką grubość badanego materiału, wtedy brzeg tensometru powinno się umieścić w odległości $0,3t$ od brzegu spoiny (rys.10) [11].



Rys.10. Liniowa ekstrapolacja z punktów pomiarowych tak aby nieliniowy składnik naprężeń zaniknął

Gdy tensometry znajdują się w odległości $0,4t$ i $1,0t$ od brzegu spoiny to strukturalne odkształcenia „hot spot” wyliczane są następująco [3-6]:

$$\varepsilon_{hs} = 1,67\varepsilon_A - 0,67\varepsilon_B \quad (3)$$

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 uzyskanymi przy użyciu metody elementów skończonych. Niekiedy zachodzi również konieczność zastosowania trzech tensometrów. Stosuje się je wtedy, gdy naprężenia zginające wywoływane są np. przez specjalne usztywnienia w rurach o dużej średnicy lub płatach samolotu. Wtedy tensometry umieszczone są odpowiednio w odległościach $0,4t$, $0,9t$ i $1,4t$ od brzegu spoiny, a odkształcenia „hot spot” wyliczane za pomocą ekstrapolacji kwadratowej następująco:

$$\varepsilon_{hs} = 2,52\varepsilon_A - 2,24\varepsilon_B + 0,72\varepsilon_C \quad (4)$$

gdzie: ε_{hs} – odkształcenia hot spot, ε_A – odkształcenia na tensometrze A,

ε_B – odkształcenia na tensometrze B, ε_C – odkształcenia na tensometrze C.

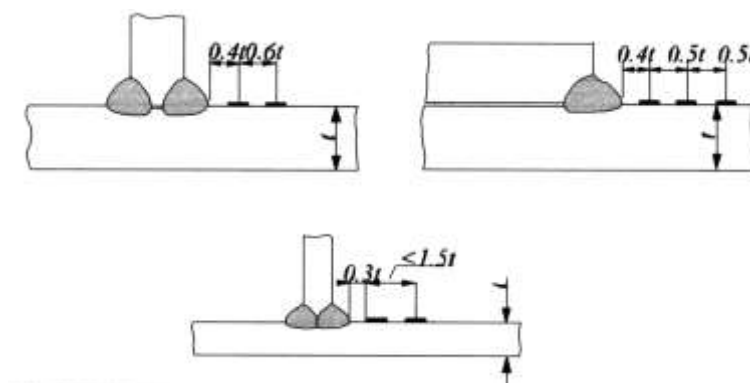
Jeżeli występuje jednoosiowy stan naprężeń to konstrukcyjne naprężenia uśrednione obliczane są następująco [3-6]:

$$\sigma_{hs} = E \cdot \varepsilon_{hs} \quad (5)$$

gdzie: ε_{hs} – odkształcenia hot spot, σ_{hs} – naprężenia konstrukcyjne, E – moduł Younga.

Obliczanie naprężeń konstrukcyjnych byłoby oczywiście bardziej dogodnie, gdyby można było uzyskać je za pomocą tylko jednego punktu pomiarowego, np.: w odległości $0,4t$ od brzegu spoiny. Wymaga to jednak bardzo dużej wiedzy o stanie naprężenia. Wg [8] odległość $0,5t$ od spoiny może być odpowiednią do tego typu pomiaru. W przypadku „hot spot-u typu” „b” rozkład naprężeń w kierunku brzegu spoiny nie zależy od grubości blachy. Dlatego odległości między tensometrami nie mogą być funkcją grubości. W związku z tymi ograniczeniami zaproponowano następujące odległości tensometrów pomiarowych od brzegu spoiny: 4, 8 i 12mm. Konstrukcyjne naprężenia „hot spot” są wtedy określane przez ekstrapolację kwadratową w następujący sposób:

$$\sigma_{hs} = 3\sigma(4\text{mm}) - 3\sigma(8\text{mm}) + \sigma(12\text{mm}) \quad (6)$$



Rys.11. Miejsca naklejenia tensometrów

8. ZASTOSOWANIE WSPÓLCZYNNIKÓW KONCENTRACJI NAPRĘŻEŃ

Obliczenia naprężeń u wierzchołka karbu opierają się również na wyliczeniu współczynnika koncentracji naprężeń K_s . Współczynnik ten jest miarą naprężeń w charakterystycznych punktach geometrycznych konstrukcji spawanych i wyznaczany jest jako stosunek lokalnych naprężeń strukturalnych do zmodyfikowanych naprężeń nominalnych działających na konstrukcję. Konstrukcyjne naprężenia „hot spot” są wtedy obliczane z zależności:

$$\sigma_{hs} = K_s \cdot \sigma_n \quad (7)$$

Współczynnik ten może być obliczany przez zastosowanie odpowiednich wzorów empirycznych lub przy pomocy MES. W chwili obecnej istnieje kilka propozycji obliczania współczynnika koncentracji naprężeń. Jest to związane z indywidualnym podejściem ośrodka badawczego

Przykładowy wzór na obliczenie współczynnika K_s wg Lawrence’a [1], zaproponowany również w [2] ze względu na niewielką różnicę wyników obliczeń praktycznych w porównaniu z obliczeniami MES przedstawiony został w równaniu (6).

$$K_s = 1 + \alpha \cdot \sqrt{\frac{t}{\rho}} \quad (8)$$

gdzie:

K_s – współczynnik koncentracji naprężeń, α – współczynnik zależny od kształtu lica spoiny, t – grubość elementu, ρ – promień przejścia lica spoiny do materiału rodzimego.

W wielu przypadkach rozsądnie jest stosować oddzielne współczynniki koncentracji naprężeń dla obciążenia osiowego i momentu zginającego. Naprężenia strukturalne obliczane są wtedy z zależności [4-6]:

$$\sigma_{hs} = K_{S,a} \cdot \sigma_{n,a} + K_{S,b} \cdot \sigma_{n,b} \quad (9)$$

gdzie:

$\sigma_{n,b}$ – naprężenia nominalne wywołane momentem gnącym, $\sigma_{n,a}$ – naprężenia nominalne wywołane siłą osiową, $K_{S,a}$ – wsp. koncentracji naprężeń dla obciążenia osiowego, $K_{S,b}$ – wsp. koncentracji naprężeń dla momentu gnącego.

9. PODSUMOWANIE

Brzeg spoiny jest newralgicznym punktem złącza spawanego, ponieważ zazwyczaj tam pojawia się pęknięcie zmęczeniowe. Jest to spowodowane koncentracją naprężeń w tym miejscu będącą rezultatem oddziaływania karbu geometrycznego i strukturalnego. Określenie naprężeń w tym miejscu pozwoli dokładniejsze zaprojektowanie złącza spawanego w konstrukcji stalowej przy uniknięciu jej przewymiarowania.

Celem obecnie prowadzonych badań nad metodą „hot spot stress” jest wyznaczenie podstawowych parametrów określających wytrzymałość zmęczeniową złączy spawanych na podstawie pomiarów ich geometrii oraz wyznaczenie kategorii zmęczeniowych dla konkretnych złączy. Efektem takich działań może być opracowanie procedury szybkiego szacowania żywotności zmęczeniowej połączeń spawanych jedynie dzięki pomiarom geometrii gotowych złączy lub całych konstrukcji [2].

10. LITERATURA

- [1] RADAJ D., SONSINO C.: Fatigue assessment of welded joints by local approaches. Abington Publishing 1998.
- [2] SZUBYRT 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.
- [8] MADDOX S. J.: Hot spot fatigue data for welded steel and aluminium as a basis for design. Dok. MIS XIII-1900a-01.
- [9] ROMEIJN A.: The fatigue behaviour of multiplanar tubular joints. HERON nr 3/1994.
- [10] Recommended Fatigue Design Procedure for Welded Hollow Section Joints;
- [11] Part1 – Recommendations; Part2 – Commentary. Dok. MIS XIII-1772-99.
- [12] Fatigue assessment based on the geometric stress ranges (Hot Spot stresses) – Annex E. Dok. CEN/TC147/462.

HOT SPOT STRESSES IN WELDED JOINTS OF STEEL STRUCTURES

Abstract: Fatigue analysis of welded joints and components has usually been based on nominal stress range. The so-called 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 methods or can be determined by experimental methods using a strain gauge. This article focuses on stress distribution at the weld toe through the thickness of welded detail and method of evaluating structural stress.

Recenzent: dr inż. Roman BOGUCKI