

Robert SOŁTYSIAK, Dariusz BORÓŃSKI

ANALIZA NAPRĘŻEŃ GEOMETRYCZNYCH W LASEROWYM ZŁĄCZU SPAWANYM Z ZASTOSOWANIEM LOKALNYCH WŁASNOŚCI MATERIAŁOWYCH

W pracy przedstawiono wyniki analizy naprężeń geometrycznych (ang. structural hot-spot stress) w laserowym złączu teowym pobranym ze stalowej struktury panelowej typu sandwich. Analizę numeryczną naprężeń przeprowadzono za pomocą metody elementów skończonych z uwzględnieniem lokalnych własności materiałowych. W pracy wskazano również na możliwość szacowania trwałości zmęczeniowej struktur panelowych typu sandwich z wykorzystaniem analizy naprężeń geometrycznych przeprowadzonej dla zróżnicowanych własności materiałowych w strefie złącza.

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Mechaniczny,
Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, al. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz

1. WPROWADZENIE

Ze względu na zwiększające się wymagania stawiane konstrukcjom, ciągłe dążenie do zwiększania niezawodności i bezpieczeństwa eksploatacji przy jednoczesnym przyjmowaniu takich kryteriów optymalizacji, jak minimum kosztów, minimum ciężaru, minimum odkształceń czy przemieszczeń, istnieje konieczność uwzględnienia w procesie projektowo-konstrukcyjnym złożonego charakteru obciążeń elementów konstrukcyjnych, w tym bardzo często obciążeń powodujących występowanie pęknięć zmęczeniowych.

Globalne procesy zmęczeniowe swoją inicjację mają zazwyczaj w lokalnych obszarach narażonych na duże gradienty odkształceń i naprężeń. Jednak podczas procesu projektowo-konstrukcyjnego złączy spawanych poddanych obciążeniom zmęczeniowym stosuje się głównie procedury oparte na analizie naprężeń nominalnych. W obliczeniach trwałości zmęczeniowej stosowane są naprężeniowe wykresy zmęczeniowe oraz wykresy projektowe wyznaczane przede wszystkim dla typowych złączy elementarnych, co mocno ogranicza stosowanie takiego podejścia w przypadku złożonych struktur, jak również w przypadku struktur wykonanych z wykorzystaniem nowych technologii spajania.

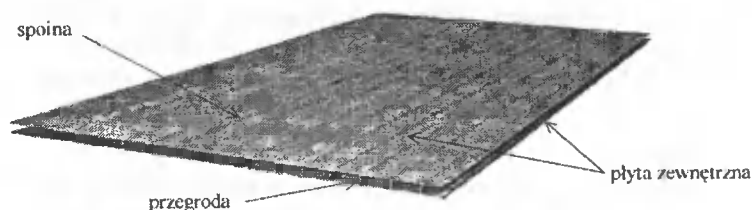
Alternatywnym rozwiązaniem jest stosowanie metod opartych na podejściu lokalnym, w tym naprężeń geometrycznych (ang. structural hot-spot stress) [9, 10, 11, 16, 19], w którym obliczenia trwałości zmęczeniowej wymagają wiedzy o lokalnym stanie naprężeń. Jednak zarówno metoda naprężeń nominalnych, jak i metody oparte na analizie lokalnego stanu naprężeń w złączach spawanych pomijają zróżnicowanie lokalnych własności materiałowych. Jak wskazują źródła literaturowe (np. [1, 21]), własności materiałowe poszczególnych stref złączy spawanych znacznie się od siebie różnią, co może w istotny sposób wpływać na lokalny stan odkształceń i naprężeń.

2. OBIEKT BADAŃ

Struktury typu sandwich do niedawna wytwarzano wyłącznie z kompozytów żywiczno-szklanych wykonanych z polimerów, których zewnętrzne powierzchnie niekiedy pokrywano płytami z aluminium lub tytanu [11]. Współczesne techniki spawania, w tym spawanie laserowe, umożliwiają wytwarzanie struktur tego typu ze stali. Wcześniej było to niemożliwe z powodu problemu z łączeniem wewnętrznych elementów.

W literaturze możemy znaleźć szereg praktycznych zastosowań stalowych paneli typu sandwich. Szybki rozwój ich zastosowań związany jest m.in. z tym, że pozwalają one na redukcję masy w granicach 30-50% oraz redukcję kosztów wytwarzania do 50%, w porównaniu z masą i kosztami rozwiązań tradycyjnych. Jednak opis ich własności ograniczony jest głównie do badań statycznych, chociaż ostatnio można zaobserwować wzrost zainteresowania również badaniami podczas obciążeń zmiennych w czasie [11].

Badania naprężeń geometrycznych przeprowadzono na stalowych strukturach panelowych typu sandwich (rys. 1), wykonanych w postaci dwóch równoległych do siebie płyt połączonych prostopadłymi do nich przegrodami.



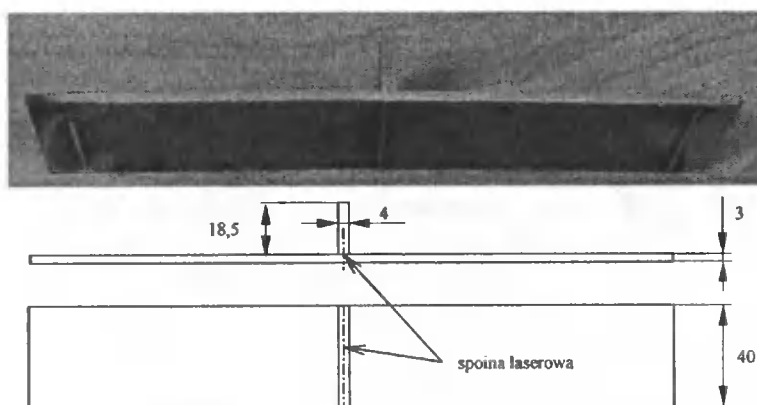
Rys. 1. Stalowa struktura panelowa typu „sandwich” (firmy MW Niemcy) [7]

Łączenia wykonane są techniką spawania laserowego od zewnętrznej strony płyty wzdłuż znajdującej się pod nią przegrody. Na tego typu połączenie zastosowana została stal okretowa o składzie chemicznym przedstawionym w tabeli 1.

Tabela 1. Skład chemiczny materiału płyty i przegrody (w % zawartości) [2]

Płyta	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr
	0,083	0,004	0,007	0,014	0,393	0,066	0,024
	Cu	Ti	Al	Sn	Zn	Mg	Mo
	0,021	0,004	0,036	0,004	0,019	0,044	0,000
Przegroda	C	Si	S	P	Mn	Ni	Cr
	0,033	0,000	0,014	0,010	0,207	0,052	0,021
	Cu	Ti	Al	Sn	Zn	Mg	Mo
	0,018	0,004	0,030	0,004	0,018	0,044	0,004

Podczas analizy naprężeń skupiono się na fragmencie płyty przygotowanym w postaci teowego złącza pokazanego na rysunku 2.

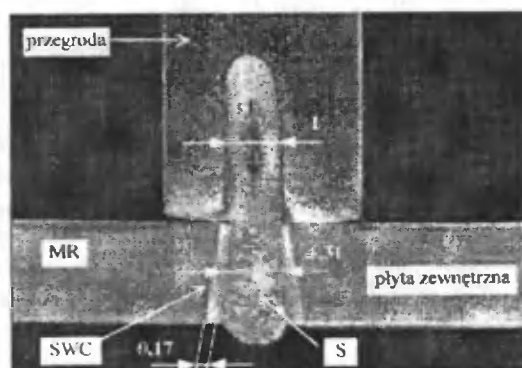


Rys. 2. Próbką do badań

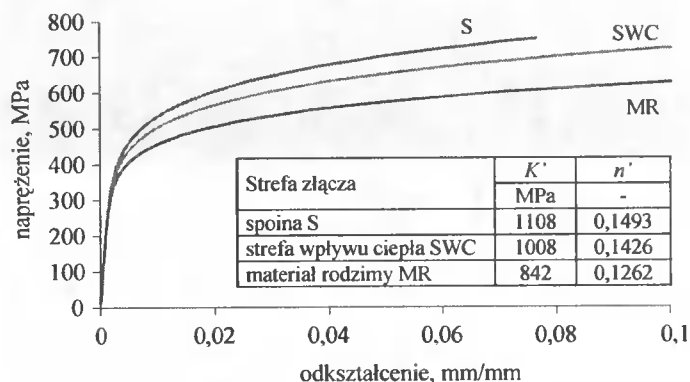
3. LOKALNE WŁASNOŚCI MATERIAŁOWE

Niezależnie od zastosowanej techniki spawania, praktycznie każdorazowo proces spawania powoduje w obiekcie konstrukcyjnym zróżnicowanie jego lokalnych własności materiałowych. Taka niejednorodność często może prowadzić, pod wpływem zmiennych obciążeń, do pęknięć zmęczeniowych, które wielokrotnie są przyczyną uszkodzeń całych struktur.

Na zdjęciu makrostruktury rozpatrywanego obiektu pokazanym na rysunku 3 można wyróżnić trzy strefy: materiału rodzimego – MR, wpływu ciepła – SWC oraz spoiny – S, charakteryzujące się odmiennymi lokalnymi własnościami materiałowymi (rys. 4). Własności te wyznaczono za pomocą laserowego ekstensometru siatkowego LES, metodą opisaną w pracy [1].



Rys. 3. Makrostruktura złącza w badanym obiekcie [2]

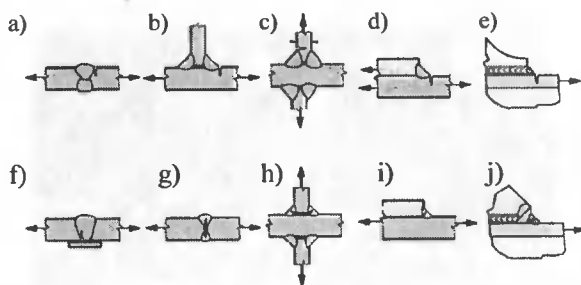


Rys. 4. Lokalne cykliczne własności materiałowe dla poszczególnych stref złącza

4. ANALIZA NAPRĘŻEŃ WEDŁUG METODY HOT-SPOT

Zakwalifikowanie złącza przedstawionego w punkcie 2 do analizy naprężeń geometrycznych, a następnie do obliczeń trwałości zmęczeniowej tą metodą może być kwestią dyskusyjną. Dokonując przeglądu literatury dotyczącej rodzajów połączeń, dla których rekomenduje się metodę naprężeń geometrycznych, nie spotkano się z kategorycznym odrzuceniem możliwości jej stosowania do stalowych paneli typu sandwich.

W pracach [13, 14] oraz w normie [17] przedstawiono kilka typów połączeń, dla których dopuszcza się stosowanie metody naprężeń geometrycznych. W przypadku połączeń teowych, w zależności od charakteru pęknięć, kwalifikowane mogą być one jednak zarówno do połączeń zalecanych dla metody naprężeń geometrycznych, jak i nie-wskazanych (rys. 5).



Rys. 5. Typy złączy odpowiednie dla metody naprężeń geometrycznych (a-e) oraz nieodpowiednie (f-j) [14]

Można stwierdzić, że przykłady literaturowe wskazują na brak jednoznacznie określonych zaleceń stosowania omawianej metody obliczeniowej do danego typu połączenia. Biorąc jednak pod uwagę istniejące wytyczne, analizowany w pracy obiekt badań przyrównano do przykładu z rysunku 5b i przeprowadzono dla niego analizę możliwości wyznaczenia w jego przypadku naprężeń geometrycznych.

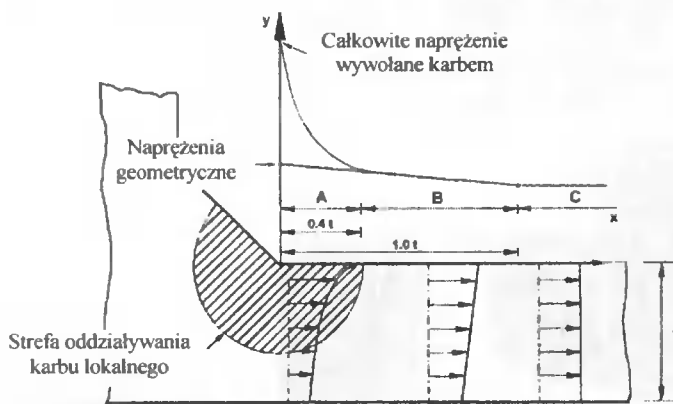
Najczęściej używanym sposobem wyznaczania naprężeń geometrycznych jest ekstrapolacja liniowa wyników pomiarów lub obliczeń we wskazanych punktach w oto-

czeniu spoiny. Można ją wykonać wykorzystując wyniki z analizy numerycznej, jak również wyniki otrzymane eksperymentalnie za pomocą tensometrów lub innej techniki pomiarowej, np. laserowego ekstensometru siatkowego – w przypadku, gdy miejsca pomiaru są blisko siebie.

Istnieje przynajmniej kilka definicji naprężeń geometrycznych. Jedną z nich i najczęściej używaną jest zalecenie Międzynarodowego Instytutu Spawalnictwa – IIW, który proponuje wyznaczenie naprężeń geometrycznych za pomocą liniowej ekstrapolacji punktów położonych w odległości $0,4 t$ i $1,0 t$ (t – grubość płyty) od punktu wejścia spoiny w materiał rodzimy. Yagi, w pracy [22], naprężenia geometryczne definiuje natomiast jako ekstrapolację liniową z punktów oddalonych o $1,57 \sqrt[4]{t^3}$ oraz $4,9 \sqrt[4]{t^3}$ od miejsca przejścia spoiny w materiał rodzimy.

Kolejną definicję proponuje Det Norske Veritas (Norweskie Towarzystwo Klasyfikacyjne) i Germanischer Lloyd (Niemieckie Towarzystwo Klasyfikacyjne), gdzie naprężenie geometryczne jest również wyznaczane za pomocą liniowej ekstrapolacji, lecz z punktów oddalonych od miejsca przejścia spoiny w materiał rodzimy o $0,5 t$ oraz o $1,5 t$ [20]. Natomiast w pracy [12] naprężenie geometryczne zdefiniowano jako naprężenie występujące w punkcie w odległości $0,3 t$ od miejsca przejścia spoiny w materiał rodzimy.

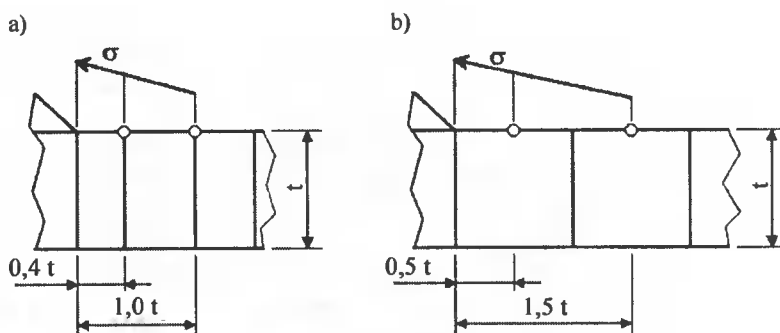
W omawianej pracy naprężenia geometryczne wyznaczono numerycznie i doświadczalnie zgodnie z definicją zaproponowaną przez IIW (rys. 6). Jako punkt odniesienia do wyznaczania naprężeń przyjęto miejsce przejścia spoiny w materiał rodzimy płyty zewnętrznej. Jest to miejsce, w którym najczęściej inicjują się pęknięcia [2, 11].



Rys. 6. Naprężenia geometryczne zgodnie z definicją IIW oraz rozkład naprężeń w wyszczególnionych trzech strefach: A – obszar wpływu karbu lokalnego, B – obszar wpływu geometrii spoiny, C – obszar naprężeń nominalnych

4.1. Analiza numeryczna

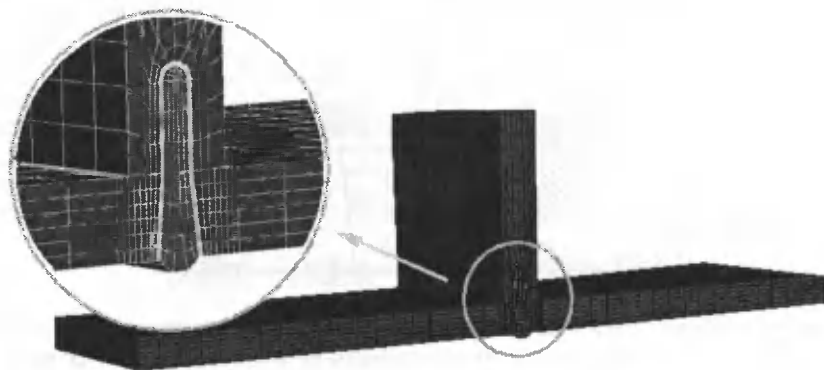
Zalecenia literaturowe dotyczące numerycznego modelowania złączy spawanych [3, 10, 15, 18] zwracają głównie uwagę na to, aby sposób podziału siatki obszaru położonego w pobliżu spoiny był przeprowadzony w sposób umożliwiający odczytanie naprężeń w punktach, dla których planowane jest przeprowadzenie ekstrapolacji liniowej. Zalecany sposób generowania siatki przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Sposoby generowania siatki elementów skończonych w obszarze ekstrapolacji:
a) o stosunkowo gęstym podziale, b) o podziale zgrubnym [15]

Przedstawione wyżej prace dotyczące analizy numerycznej nie uwzględniają zróżnicowania lokalnych własności materiałowych, które spowodowane są głównie procesami temperaturowymi występującymi podczas procesu spawania. Wcześniejsze badania [23] wykazują jednak, że ich uwzględnienie w obliczeniach daje znaczne różnice w wartościach odkształceń i naprężeń w porównaniu z metodami obliczeń opartymi na jednym modelu materiałowym, a naprężenia wyznaczone z uwzględnieniem lokalnych własności materiałowych pozwalają na znaczne poprawienie jakości szacowania trwałości zmęczeniowej w podejściu lokalnym.

Do analizy numerycznej naprężeń geometrycznych zastosowano metodę elementów skończonych oraz program ABAQUS. Badania przeprowadzono dla pięciu poziomów naprężenia nominalnego. Podczas analizy numerycznej w modelu geometrycznym uwzględniono lokalne własności materiałowe w strefach złącza spawanego (rys. 8).



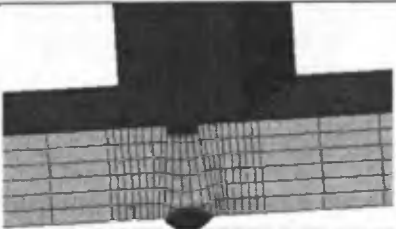
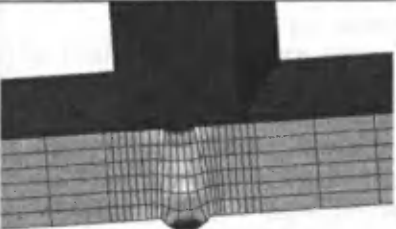
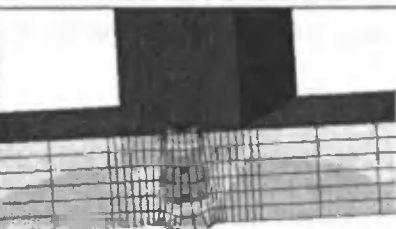
Rys. 8. Model numeryczny z lokalnymi własnościami materiałowymi

Wyniki obliczeń (ekstrapolowane wartości naprężeń geometrycznych) zestawiono w tabeli 2, natomiast przykładowe rozkłady naprężeń zamieszczono w tabeli 3.

Tabela 2. Wyniki analizy numerycznej

Napężenie [MPa]	Poziom				
	1	2	3	4	5
Nominalne	200	250	300	350	400
W punkcie A = 1 t	197,806	246,134	294,808	343,420	391,918
W punkcie B = 0,4 t	202,329	251,786	301,652	351,153	400,360
Geometryczne	205,340	255,550	306,310	356,310	405,990

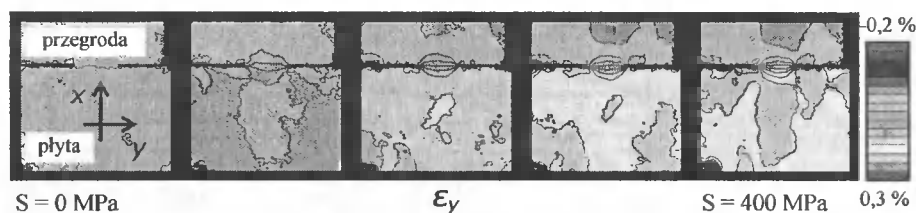
Tabela 3. Przykładowe rozkłady naprężeń

Napężenie [MPa]			Rozkład naprężeń
nominalne	w punkcie A = 1 t	w punkcie B = 0,4 t	
250	246,134	251,780	
300	294,808	301,652	
350	343,420	351,153	
			
			80,0 198,3 216,7 235,0 253,3 271,7 290,0 308,3 326,7 345,0 363,3 381,7 400,0 MPa

4.2. Weryfikacja doświadczalna

Niewielkie wymiary strefy pomiaru odkształceń wykorzystywanych do wyznaczenia ekstrapolowanej wartości naprężeń geometrycznych wymagają zastosowania precyzyjnych technik pomiarowych. W analizowanym przypadku pomiar ich wartości można przeprowadzić z zastosowaniem laserowego ekstensometru siatkowego.

Na rysunku 9 pokazano przykładowe wyniki pomiarów rozkładów odkształceń dla próbki o grubości płyty wynoszącej $t = 2$ mm.



Rys. 9. Przykładowe rozkłady odkształceń dla maksymalnej wartości naprężenia w cyklu dla wybranych cykli obciążenia dla naprężenia nominalnego $S_{max} = 300$ MPa

Szczegółowe porównanie wyników obliczeń i pomiaru odkształceń/naprężeń geometrycznych dla próbek o grubości płyty $t = 3$ mm przedstawione zostanie w trakcie XXIII Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania.

5. PODSUMOWANIE

Możliwość analizy naprężeń geometrycznych w złączu spawanym struktury typu sandwich umożliwia zastosowanie w szacowaniu ich trwałości zmęczeniowej metody hot-spot. Metoda ta głównie zastosowanie znajduje w przypadku, gdy niemożliwe jest wyznaczenie naprężeń nominalnych w rozpatrywanym obiekcie, skąd bierze się coraz większe nią zainteresowanie.

Do wyznaczenia trwałości zmęczeniowej metodą hot-spot, poza naprężeniami geometrycznymi wyznaczonymi w pracy, niezbędne są wykresy trwałości zmęczeniowej w układzie $\sigma_{HS} - N_c$ oraz przyjęcie metody sumowania uszkodzeń zmęczeniowych.

Zastosowanie naprężeń geometrycznych wyznaczanych z wykorzystaniem lokalnych własności materiałowych do obliczeń trwałości zmęczeniowej metodą hot-spot stanowi dalszy etap badań prezentowanych w pracy. Szczegółowe omówienie wyników obliczeń trwałości i ich porównanie z wynikami badań doświadczalnych przedstawione zostanie podczas XXII Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania.

LITERATURA

- [1] Boroński D., 2006. Cyclic Material Properties Distribution in Laser-Welded Joints. *International Journal of Fatigue* 28, 346-354.
- [2] Boroński D., 2005. Doświadczalna analiza rozkładów odkształceń w strefach zmęczeniowego pęknięcia. *Rozprawy 115*, Wyd. Uczeln. ATR w Bydgoszczy.
- [3] Doerk O., Fricke W., Weissenborn C., 2003. Comparison of different calculation methods for structural stresses at welded joints. *International Journal of Fatigue* 25, 359-369.
- [4] Dolby R.E., 2003. Trends in welding processes in engineering construction for infrastructure projects. 56th IIW Annual Assembly, Bucharest, Romania.
- [5] FITNET, 2006. European Fitness for service Network.
- [6] Fricke W., Kahl A., 2005. Comparison of different structural stress approaches for fatigue assessment of welded ship structures. *Marine Structures* 18, 473-488.
- [7] Kozak J., 2005. Problemy oceny wybranych własności wytrzymałościowych stalowych, dwupółkowych struktur okrętowych. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
- [8] Lotsberg I., 2001. Overview of the FPSO – Fatigue capacity JIP. *Proc. of OMAE'01*.
- [9] Maddox S.J., 2003. Recommended Hot-Spot Stress Design S-N Curves for Fatigue Assessment of FPSOs. *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, TWI Limited.

- [10] Morgenstern C., Sonsino C.M., Hobbacher A., Sorbo F., 2006. Fatigue design of aluminium welded joints by the local stress concept with the fictitious notch radius of $r_f = 1$ mm. *International Journal of Fatigue* 28, 881-890.
- [11] Niemi E., Fricke W., Maddox S., 2004. Structural stress approach to fatigue analysis of welded components – designer's guide. IIW-Doc. XIII-1819-00/XV-1090-01. International Institute of Welding. Final draft.
- [12] Niemi E., 1995. Recommendations concerning stress determination for fatigue analysis of welded components. Abington Publishing Cambridge, UK.
- [13] PN-EN 1993-1-9 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych. Część 1-9: Zmęczenie.
- [14] Poutiainen L., Tanskanen P., Marquis G., 2004. Finite element methods for structural hot spot stress determination – A comparison of procedures. *International Journal of Fatigue* 26, 1147-1157.
- [15] Radaj D., 1996. Review of fatigue strength assessment of nonwelded and welded structures based on local parameters. *International Journal of Fatigue* 18, 135-170.
- [16] Rules for classification and construction, Part 1. Seagoing ship, Chapter 1. Hull structure. Germanischer Lloyd, Edition 2002.
- [17] Socha G., Kujala P., 2002. Experimental investigations of laser stake welds in shipbuilding in gudtry. Proc. of the 8th International Fatigue Congress, EMAS, Stockholm, 453-460.
- [18] Yagi J. i inni, 1991. Definition of hot spot stress in welded plate type structure for fatigue assessment. IIW-XIII-1414-91.
- [19] Boroński D., Soltysiak R., 2007. Analiza trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych z zastosowaniem lokalnych własności materiałowych. XI Krajowa Konferencja Mechanika Pękania, Cędzyna, 16-17.