

PROBLEMY OCENY TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ OKRĘTOWYCH, STALOWYCH STRUKTUR DWUPOWŁOKOWYCH TYPU SANDWICH

Janusz KOZAK

Politechnika Gdańska, Wydział Oceanotechniki i Okrętownictwa, ul. Narutowicza 11/12,
80-952 Gdańsk, kozak@pg.gda.pl

Streszczenie

Przedstawiono ważniejsze problemy związane z realizacją cyklu badań mającego na celu określenie własności wytrzymałościowych stalowych dwupowłokowych paneli typu sandwich spawanych laserowo. Zaprezentowano założenia programu badawczego, pokazano wybrane problemy związane z realizacją tego programu, przedstawiono wyniki badań zmęczeniowych konstrukcji.

Słowa kluczowe: spawanie laserowe, badania zmęczeniowe, konstrukcje dwupowłokowe.

FATIGUE DURABILITY ESTIMATION PROBLEMS OF ALL STEEL SANDWICH PANELS

Summary

Paper presents idea of the all steel SANDWICH panels as well as the laboratory fatigue tests results of such panels tested in natural scale.

Keywords: laser weld, fatigue tests, steel sandwich panels.

1. WPROWADZENIE

Gwałtowny rozwój technik wytwarzania obserwowany w ostatnich kilkudziesięciu latach nie ominął i konstrukcji statków. Pojawiły się nowe materiały, pojawiły się także nowe techniki i metody łączenia elementów konstrukcji. Wśród tych nowych metod coraz szersze zastosowanie w skali przemysłowej znajduje spawanie laserowe. Stosowanie tej techniki łączenia otwiera zupełnie nowe możliwości dla kształtowania konstrukcji metalowych ponieważ - między innymi - pozwala na wykonywanie połączeń w miejscach dotąd niedostępnych dla spawacza. Stąd można pokusić się o radykalną zmianę standardowego sposobu kształtowania konstrukcji kadłuba składającej się jak dotąd z systemu wiązań tworzących dwukierunkowy ruszt podpierający warstwę poszycia zapewniającą szczelność. Zamiast takiej struktury można proponować rozwiązania już stosowane w konstrukcjach z tworzyw sztucznych – dwie cienkie warstwy poszycia powiązane systemem wewnętrznych przewiązek umiejscowionych pomiędzy tymi powłokami. Tak wygląda idea konstrukcji typu SANDWICH. Ponieważ taka struktura odbiega dość mocno swymi własnościami od konstrukcji klasycznych – choćby z uwagi na anizotropię sztywności – toteż narzędzia analizy wytrzymałości sprawdzone dla używanych rozwiązań tu nie zawsze muszą dawać poprawne wyniki a zatem należy je zweryfikować i ewentualnie ulepszyć albo zaproponować nowe.

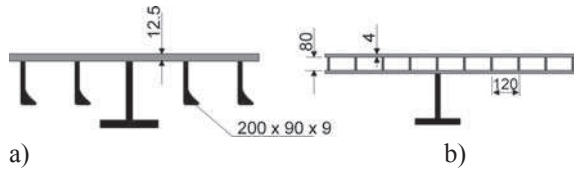
2. IDEA STRUKTURY TYPU SANDWICH

Idea zastąpienia klasycznej – ukształtowanej przez wieki – konstrukcji kadłuba statku nową cienką dwupowłokową strukturą z większością wiązań przebiegającą w jej wnętrzu pojawiła się na początku lat pięćdziesiątych ubiegłego wieku i była rozwijana przez NASA – co zaowocowało szeregiem rozważań teoretycznych na temat metodologii określania wskaźników sztywności takiej struktury [1],[2],[3]. Poważne zainteresowanie tą ideą wykazała dopiero marynarka Stanów Zjednoczonych w końcu lat 80-tych wprowadzając panel typu LASCOR i stosując go do konstrukcji ścianek a przede wszystkim wysoko położonych platform. Najbardziej spektakularnym przykładem tej aplikacji było wykonanie platformy anteny na USS „Mt. Whitney” co pozwoliło zaoszczędzić 9 ton wagi wysoko położonej konstrukcji [4].

Kolejnym przykładem realizacji idei laserowo spawanych paneli są panele produkowane i oferowane przez stocznię Meyer Werft w Papenburgu. Panele te są już obecnie wytwarzane i stosowane na skalę przemysłową m.in. na pokłady unoszone statków do przewozu ładunków wtocznych (Ro-Ro), na wysoko położone pokłady morskich statków pasażerskich (sundecks), na wewnętrzne ścianki nadbudówek a także na duże fragmenty konstrukcji pokładów wycieczkowych statków rzecznych na Dunaj.

Zastosowana tu idea konstrukcji SANDWICH polega na stosowaniu stalowych bądź aluminiowych paneli wykonanych z dwóch płyt

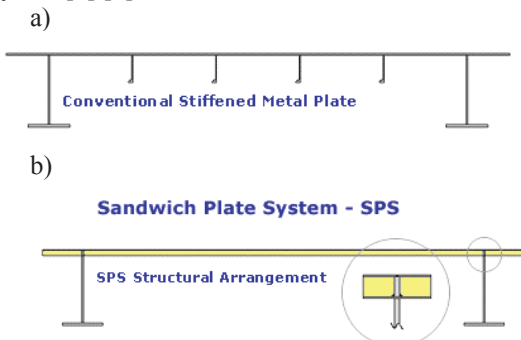
blach o grubości rzędu 1-4 mm każdy, oddalonych od siebie o 40-120 mm i połączonych pomiędzy sobą systemem jednokierunkowych wiązań wewnętrznych prowadzonych w odstępnie 40-120 mm – rys.1 – połączonych z poszyciem za pomocą spawania laserowego wykonywanego przez grubość poszycia.



Rys. 1. Konstrukcja pokładu statku typu Ro-Ro: klasyczna (a), wykonana z paneli Meyera (b).

Dla równoważnej wytrzymałościowo geometrii jak na rys.1 uzyskuje się około 34% redukcji ciężaru i 50% redukcji kosztów wykonania w stosunku do układu tradycyjnego [5].

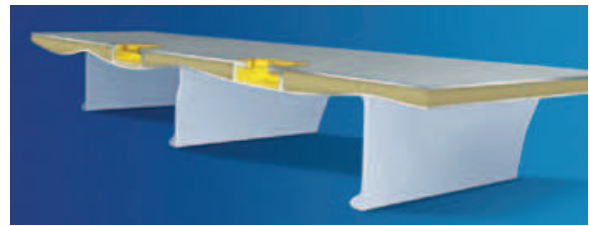
Innym sposobem realizacji stalowej struktury typu SANDWICH jest system SPS (sandwich plate system) wynaleziony w Uniwersytecie w Ontario przez prof. S.Kennedy. Idea panelu SPS polega na połączeniu dwóch powłok stalowych elastomerowym wypełniaczem (BASF Inoac) – rys. 2, [6],[7].



Rys. 2. Konstrukcja pokładu promy : klasyczna (a) oraz wykonana z paneli SPS (b) [8].

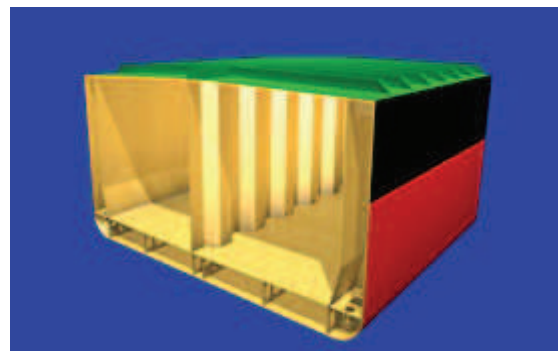
Oprócz korzyści wynikających z zastosowania tego typu rozwiązań w zupełnie nowych konstrukcjach, otwiera on też duże możliwości w technice remontu statków. System ten zastosowano między innymi do modernizacji pokładu promu „Pride of Cherbourg” – rys. 3.

Niezależnie od zastosowanej konstrukcji obszaru pomiędzy poszyciami panele mogą służyć jako podstawowe elementy konstrukcyjne pokładów, grodzi czy ścianek a stosowanie takiej struktury przynosi określone korzyści w postaci oszczędności ciężaru, prędkości wykonania czy wzrostu objętości pomieszczeń a także poprawienia bezpieczeństwa.



Rys. 3. Idea renowacji pokładu promu wykonana techniką SPS [8].

Na rys. 4 przedstawiono za [7] sposób uproszczenia konstrukcji tankowca poprzez zastosowanie struktury typu SPS i całkowitą eliminację niskich wiązań wzdłużnych.



Rys. 4. Przykład uproszczenia konstrukcji tankowca poprzez zastosowanie struktur panelowych [7]

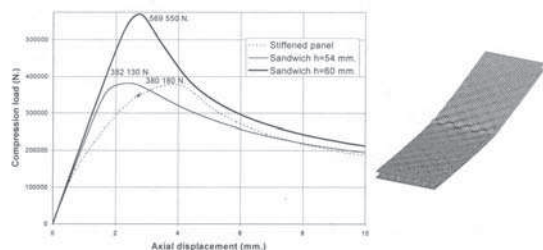
Szacuje się że zastosowanie takiego uproszczenia konstrukcji w obszarze 10.130 m³ przestrzeni ładunkowej producenta pozwoli wyeliminować 9000 m płaskownika łebkowego i około 3700 detali konstrukcyjnych (źródeł pęknięć zmęczeniowych i korozji), co w efekcie przyniesie 40% redukcję objętości spoin na tym obszarze [7, 8].

Jednakże na to, aby nowe elementy konstrukcyjne mogły zostać zastosowane w strukturze kadłuba statku, należy posiadać informacje na temat ich odporności korozyjnej, ogniowej a przede wszystkim własności technologiczno-wytrzymałościowych w takim zakresie aby proponowane rozwiązania mogły uzyskać aprobatę Towarzystw Klasyfikacyjnych.

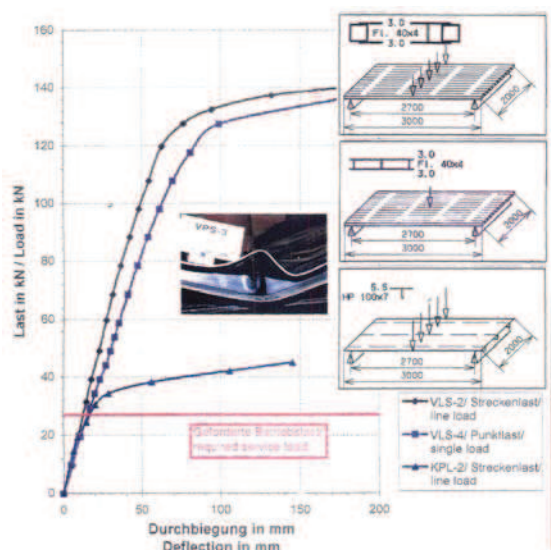
3. PRZYKŁADOWE WŁASNOŚCI PANELI TYPU SANDWICH

Stalowa struktura typu SANDWICH na skalę przemysłową w okrętownictwie zaczyna dopiero znajdować sobie miejsce, toteż nie ma systematycznych informacji na temat zachowania tych struktur w różnych warunkach eksploatacyjnych. Można jedynie znaleźć publikowane fragmentaryczne dane na temat wybranych własności takiej struktury. Na rys. 5 przedstawiono porównanie własności paneli SPS i klasycznej płyty usztywnionej ściskanych osiowo [4], zaś na rys. 6 przedstawiono za [5] wyniki badań statycznie zginanych paneli Meyera porównane z

wynikami badań panelu usztywnionego w sposób klasyczny



Rys. 5. Własności statecznościowe paneli stalowych typu SANDWICH pod obciążeniem osiowo - ściskającym w porównaniu do konstrukcji klasycznej [4].



Rys. 6. Sztywność modeli typu SANDWICH w trakcie zginania statycznego w porównaniu z konstrukcją klasyczną [5].

4. BADANIA WŁASNOŚCI STALOWYCH PANELI TYPU SANDWICH

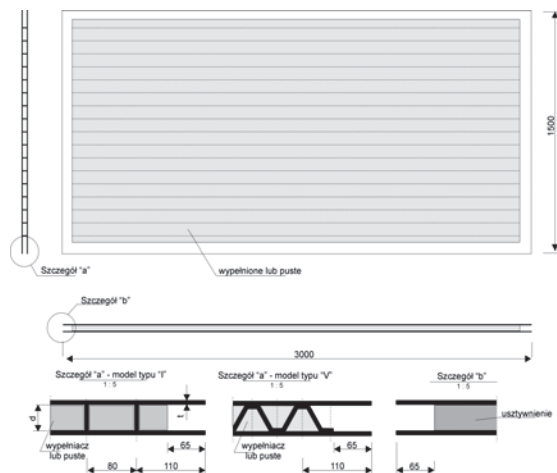
Na to, aby móc na skalę przemysłową stosować nowe rozwiązania konstrukcyjne potrzebne jest posiadanie narzędzi obliczeniowych - z jednej strony wystarczająco dokładnych, - z drugiej - na tyle mało skomplikowanych, aby można je było aplikować na poziomie przemysłowego biura projektowego. Takim narzędziem niewątpliwie jest metoda elementów skończonych (MES), jednakże typowe programy obliczeniowe MES stosowane w okrętownictwie z ich bibliotekami standardowych elementów nie nadają się do modelowania zachowania paneli typu SANDWICH spawanych laserowo, ponieważ nie pozwalają uwzględnić zjawisk typu kontaktowego, a takie pojawiają się w trakcie pracy paneli pod obciążeniem (w miejscu styku płyty poszycia z żebrami usztywniającymi) i mają znaczący wpływ na ich charakterystyki wytrzymałościowe.

Na to aby stosować do obliczeń projektowych formuły półempiryczne oparte o rozważania

teoretyczne albo poszerzać biblioteki elementów skończonych o nowe typy elementów oddających lepiej zachowanie struktur dwupowłokowych trzeba wcześniej dokonać ich weryfikacji na podstawie wyników badań konstrukcji rzeczywistej. Stąd podjęto realizację programu badawczego którego celem jest określenie zachowania pod obciążeniem stalowych, dwupowłokowych, wielkowymiarowych paneli spawanych laserowo. Ponieważ z oczywistych powodów nie ma żadnych wcześniejszych danych na temat własności takich struktur należało odpowiedzieć jednocześnie na szereg – nierzadko- wzajemnie powiązanych pytań. I tak należało dokonać pewnej optymalizacji geometrii elementów stalowych oraz dobrać odpowiedni rodzaj wypełniacza biorąc pod uwagę własności wytrzymałościowe, korozyjne, przeciwpożarowe i względy ekonomiczne. Dla tak wstępnie zawężonej geometrii należało dokonać weryfikacji podstawowych własności wytrzymałościowych w sensie jakościowym, dokonać weryfikacji odporności przeciwpożarowej i określenia charakterystyk tłumienia wibracji i w efekcie zawęzić ilość wariantów geometrii i rodzajów wypełniacza. Równocześnie należało prowadzić prace studialne związane z problematyką łączenia elementów typu „Sandwich” z typowymi „klasycznymi” elementami konstrukcyjnymi. I niejako na końcu procesu należało określić własności wytrzymałościowe - już w dużej mierze zoptymalizowanej geometrii – na podstawie badań paneli w skali naturalnej.

Tak sformułowany problem stał się przedmiotem programu badawczego „SANDWICH”, realizowanego w ramach V Programu Ramowego dofinansowanego z funduszy Unii Europejskiej w którym Wydział Budowy Okrętów Politechniki Gdańskiej jest jednym z uczestników, przeprowadzającym weryfikację własności wytrzymałościowych pełnowymiarowych paneli dwupowłokowych z realnymi układami usztywnień wewnętrznych i różnego typu wypełniaczami. Biorąc za punkt wyjścia geometrię rusztu typowego statku, możliwości wytwórcze największej przemysłowej linii spawania laserowego w Stoczni Meyer Werft w Papenburgu – wykonawcy modeli - oraz ograniczenia stanowiska badawczego w Laboratorium Technologii Okrętów i Obiektów Oceanotechnicznych Politechniki Gdańskiej jako obiekt do badań w skali naturalnej wybrano panel o wymiarach 3000 x 1500 mm w dwóch wariantach geometrii wnętrza – usztywnieniach prostokątnych do poszycia (I-core) oraz usztywnieniach skośnych do poszycia (V-core)

Trzy parametry wykonania modelu przyjęto jako zmienne niezależne: wysokość usztywnień, grubość poszycia oraz gęstość materiału wypełniającego - rys.7.



Rys. 7. Geometria modelu badawczego

Program badań obejmuje badania własności zarówno statycznych jak i zachowania zmęczeniowego. Aby maksymalnie wykorzystać przyjętą do badań liczbę modeli założono, że testowane one będą początkowo statycznie w sposób nieniszczący w różnych wariantach podparcia i obciążenia, a po zakończeniu takiego pełnego cyklu statycznego zostaną zniszczone statycznie bądź zmęczeniowo w wybranej konfiguracji warunków brzegowych i obciążenia.

Dla potrzeb weryfikacji rozwijanych wcześniej formuł obliczeniowych wybrano do programu badań kilka wariantów warunków brzegowych: swobodne podparcie dwóch brzegów (możliwość obrotu i przesunięcia podpory) z pozostawieniem pozostałych dwóch krawędzi swobodnych, podparcie obrotowe dwóch bądź wszystkich krawędzi modelu bez możliwości przesuwania oraz sztywno utwierdzenie wszystkich krawędzi. Do tego założono realizację kilku wariantów obciążenia: punktowe przyłożenie siły, obciążenie liniowe prostopadłe do osi modelu, obciążenie w postaci dwóch linii równoległych do osi wzdłużnej modelu, dyskretne obciążenie jednorodne w postaci ośmiopunktowej siły skupionej i wreszcie obciążenie równo rozłożone po całej powierzchni pochodzące od ciśnienia wody.

Przyjęcie w programie badań relatywnie dużej ilości wariantów obciążenia i podparcia stosunkowo dużego modelu a także zakładana liczba około pięćdziesięciu modeli w programie badawczym spowodowały konieczność poszukiwania takiego rozwiązania stanowiska badawczego, aby zmiana warunków brzegowych i sposobu obciążenia nie wymagała znaczących nakładów pracy i czasu. W efekcie poszukiwań zdecydowano się na budowę dwóch stanowisk: pierwszego do prowadzenia wariantu badań modelu z krawędziami sztywno utwierdzonymi obciążanego ciśnieniem hydrostatycznym, oraz drugiego – do realizacji pozostałych opcji programu badań.

5. WYNIKI BADAŃ ZMĘCZENIOWYCH

Badania zmęczeniowe prowadzone były dla punktowego przyłożenia siły w środku modelu, przy wszystkich brzegach sztywno utwierdzonych. Model w trakcie badań pokazano na rys. 8.

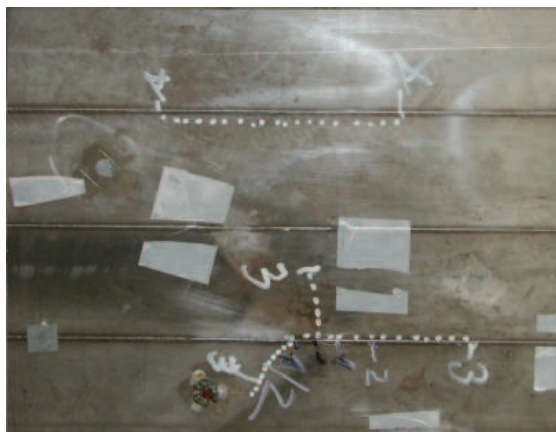
Poziom obciążenia dla badań zmęczeniowych dobierano na podstawie kalibracji kolejnymi statycznymi cyklami obciążenia w trakcie których rejestrowano wskazania czujników tensometrycznych umieszczonych na obu powłokach poszycia.

W trakcie badań modele były obciążane stałoamplitudowym cyklem obciążenia o częstotliwości około 4 Hz i współczynniku asymetrii cyklu R około 0,1.

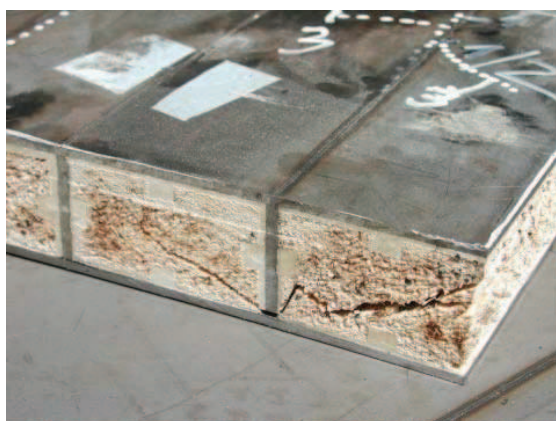


Rys. 8. Model w trakcie badań zmęczeniowych

Pęknięcia zmęczeniowe pojawiały się w strefie przejścia lica spoiny w materiał rodzimy w blasze poszycia rozciąganego. Pęknięcia generalnie występowały pod środkowym zębem, jednakże w dwóch wypadkach pęknięcia o podobnym charakterze pojawiły się również pod zębem trzecim licząc od środka rozpiętości modelu. W każdym wypadku ich przyczyną była obecność naprężeń rozciągających w płycie poszycia, działających w kierunku prostopadłym do przebiegu spoiny. Na rys. 9 pokazano rejon występowania pęknięć a na rys. 10 sposób niszczenia modelu.



Rys. 9. Pęknięcia zmęczeniowe na modelu



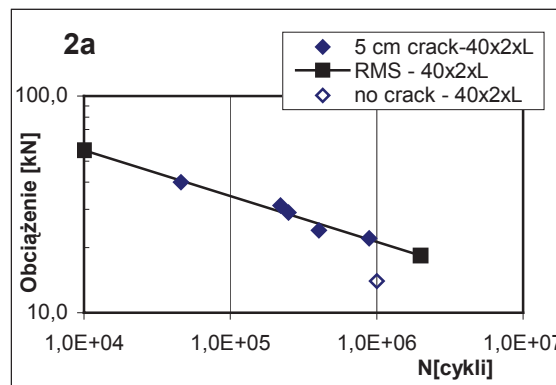
Rys. 10. Sposób niszczenia modelu

Analiza makrofraktograficzna wykazała obecność łańcucha drobnych ognisk zmęczeniowych na powierzchni pęknięcia. Dowodzi to jednorodnego charakteru struktury i braku zdecydowanego słabego miejsca typu wada spawalnicza. Na rys. 11 pokazano fragment powierzchni pęknięcia.



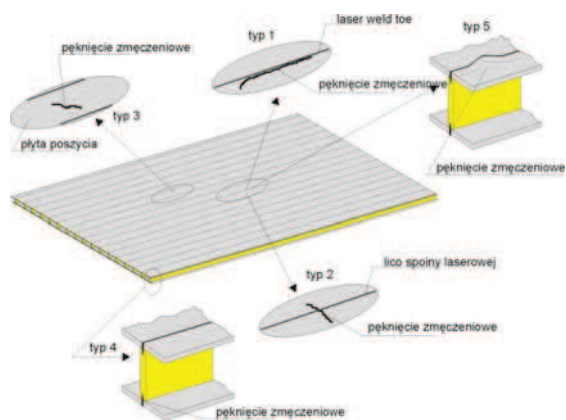
Rys. 11. Powierzchnia pęknięcia zmęczeniowego

Na rys. 12 przedstawiono wyniki trwałości modeli zestawione w układzie porównawczym „P - obciążenie – N - liczba cykli dla pęknięcia o długości 50 mm przyjmowanej w okrętownictwie jako długość wykrywalna w trakcie standardowej inspekcji statku – i definiowanego jako ‘visible crack’. Na wykresie dodatkowo naniesiono liniową aproksymację wyników badań, wykonaną metodą najmniejszych kwadratów.



Rys. 12. Trwałości modeli dla fazy „visible crack”

Współczynnik nachylenia krzywej aproksymującej wynosi około 4,25. Jeżeli przywołać tu wymagania Przepisów Klasyfikacyjnych Germanischer Lloyd [9] które zalecają dla klasycznych rozwiązań konstrukcyjnych stosowanie krzywych projektowych - dla połączeń spawanych – gdzie współczynnik nachylenia $m=3$, zaś dla wolnych krawędzi blach ciętych płomieniowo $m=5$ to widać iż własności zmęczeniowe spoiny laserowej obciążonej zmiennie obciążeniem prostopadłym do osi spoiny nie odbiegają od pęknięć rejestrowanych w warunkach rzeczywistych dla klasycznej konstrukcji okrętowej. Biorąc pod uwagę wyniki badań innych geometrii można powiedzieć ogólniej, że w konstrukcji dwupowłokowej spawanej laserowo może wystąpić jeden z pięciu modeli pęknięcia, w zależności od geometrii konstrukcji, przyjętego modelu obciążenia i podparcia. Pokazano to na rys. 13.



Rys. 13. Modele niszczenia stalowej konstrukcji „SANDWICH”

Na podstawie przedstawionych możliwych modeli niszczenia tego typu konstrukcji można pokusić się o wstępne sformułowanie zarysu metodyki projektowania wytrzymałości zmęczeniowej laserowo spawanych struktur dwupowłokowych typu SANDWICH: należy w pierwszej kolejności stworzyć populację projektowych krzywych zmęczeniowych dla każdego prezentowanych modeli niszczenia.

Wyników takich systematycznych badań jak dotąd nie opublikowano. Być może po przeprowadzeniu systematycznych badań elementarnych własności zmęczeniowych połączeń blach spawanych laserowo w konfiguracjach obciążenia wynikających z zaobserwowanych modeli pęknięcia - Rys.9 – okaże się że zachowanie części z tych modeli da się opisać krzywymi projektowymi dla konstrukcji spawanej w sposób klasyczny – wymaga to udowodnienia.

W dalszej części procedura weryfikacji trwałości zmęczeniowej powinna polegać na określeniu pola rozkładu odkształceń i naprężeń a na podstawie tych danych na wyborze spodziewanego modelu niszczenia. Pozwoli to na zastosowanie właściwej krzywej projektowej w celu określenia trwałości zmęczeniowej.

6. WNIOSKI

- Dokonano przeglądu stanu wiedzy na temat własności wytrzymałościowych stalowych struktur wielopowłokowych. Stalowe panele wielopowłokowe wnoszą duży potencjał możliwości dla konstrukcji cienkościennych jakimi są konstrukcje statków z uwagi na korzystne wskaźniki objętościowo-ciężarowe.
- Własności zmęczeniowe paneli wielopowłokowych na poziomie wytrzymałości strefowej mogą odbiegać od własności klasycznej konstrukcji w podobnych warunkach obciążenia i utwierdzenia gdyż wielkości naprężeń rzeczywistych mogą tu znacznie odbiegać od obliczanych teoretycznie z uwagi na bardziej złożony mechanizm pracy złącza spawanego laserowo.
- Dodatkowo oprócz problemów wynikających z poprzedniego wniosku, panele z racji obecności w ich konstrukcji cienkich powłok są znacznie bardziej wrażliwe na niedoskonałość wykonania. Obecność nawet nieznacznych deformacji montażowych w poszyciu znacząco zmienia rzeczywiste rozkłady naprężeń a stąd może utrudniać proces obliczeń trwałości zmęczeniowej.
- Projekt SANDWICH realizowany w ramach V-go Programu Ramowego Unii Europejskiej znacząco poszerzył wiedzę na temat podstawowych własności stalowych struktur dwupowłokowych.

- [1] Tat-Ching Fung, Shear Stiffness for C-core Sandwich Panels, *Journal of Structural Engineering*, August 1996, pp.958-966
- [2] T.S.Lok, Q.H.Cheng, Elastic Stiffness Properties and Behaviour of Truss-core Sandwich Panels, *Journal of Structural Engineering*, May 2000, pp.552-559
- [3] T.S.Lok, Q.H.Cheng, Elastic deflection of Thin-Walled Sandwich Panel, *Journal of Sandwich Structures and Materials*, October 1999, pp.279-298.
- [4] Tanguy Quesnel, Preliminary Study on Steel Composite Sandwich Panels: Shipbuilding Application, IRCN papers, Nantes, France.
- [5] Roland F., Metschko B., Laser Welded Sandwich Panels for Shipbuilding and Structural Steel Engineering, materials from Meyer Werft.
- [6] A tasty steel-polymer sandwich, *Fairplay Solution*, October 2000, pp. 20-21
- [7] *Marine Bulletin*, Lloyds Register, September 2000.
- [8] www.ie-sps.com
- [9] Germanischer Lloyd Rules.



Dr inż. Janusz Kozak jest adiunktem w Katedrze Technologii Okrętów, Systemów Jakości i Materiałoznawstwa Wydziału Oceanotechniki i Okrętownictwa Politechniki Gdańskiej. W pracy zawodowej zajmuje się problemami

wytrzymałości zmęczeniowej konstrukcji okrętowych.

7. LITERATURA