

## Niskocyklowa trwałość zmęczeniowa materiałów stosowanych na elementy sekcji obudowy zmechanizowanej

*W pracy postawiono wyniki badania trwałości zmęczeniowej niskocyklowej próbek wykonanych z trzech gatunków stali, najczęściej stosowanych na podstawowe elementy sekcji obudowy zmechanizowanej. Badania przeprowadzono dla stałych zakresów odkształcenia całkowitego na próbkach jednorodnych oraz próbkach zawierających połączenia spawane. Wyznaczono krzywe cyklicznego odkształcenia oraz wykresy trwałości zmęczeniowej. Na podstawie badań stwierdzono, że trwałość zmęczeniowa próbek wykonanych z materiału rodzimego jest istotnie wyższa w porównaniu z próbkami zawierającymi złącza spawane.*

### 1. WPROWADZENIE

---

Przemieszczanie sekcji obudowy zmechanizowanej za postępującym frontem ściany skutkuje cykliczną zmianą jej obciążenia. Podczas każdego cyklu technologicznego w ścianie możemy wyróżnić następujące etapy obciążenia sekcji obudowy: rozpieranie – podtrzymywanie stropu – rabowanie. W czasie wybierania jednego pola ścianowego cykl ten powtarza się do kilku tysięcy razy. Taki charakter pracy powoduje występowanie naprężeń zmiennych, a w konsekwencji zmęczeniowy charakter pracy sekcji obudowy. Podczas całego okresu użytkowania sekcji liczba cykli zmiany obciążenia dochodzi do kilkudziesięciu tysięcy.

Nowe unormowania dotyczące projektowania i badania sekcji obudowy zmechanizowanej (wynikające z Dyrektywy UE) kładą szczególny nacisk na zagadnienia związane z trwałością i niezawodnością funkcjonowania elementów sekcji obudowy [4]. Wytrzymałość zmęczeniowa podstawowych elementów sekcji obudowy zmechanizowanej, takich jak: stropnica, spąglica i osłona odzawałowa powinna być porównywalna i określona na etapie ich projektowania, gdyż nie przewiduje się ich wymiany na nowe w okresie użytkowania sekcji. Stąd też niezbędnym

etapem obliczeń wytrzymałościowych powinny być obliczenia zmęczeniowe [1, 2, 3], na podstawie których oszacować można liczbę cykli, po przekroczeniu których wystąpi zniszczenie danego elementu.

Podczas użytkowania sekcji obudowy zmechanizowanej występują przypadki trwałych odkształceń jej elementów, a w otoczeniu połączeń spawanych powstają pęknięcia. Biorąc pod uwagę cykliczny charakter i powtarzalność obciążenia w trakcie użytkowania można przyjąć, że na proces powstawania pęknięć główny wpływ wywierają procesy zmęczeniowe w zakresie małej liczby cykli. Procesy te są szczególnie istotne w niejednorodnej strukturze materiału w otoczeniu połączeń spawanych. Dążąc do określenia istotnych czynników decydujących o przyczynach powstawania pęknięć w elementach sekcji obudowy zmechanizowanej w pracy przedstawiono wyniki badania trwałości zmęczeniowej próbek wykonanych z różnych materiałów stosowanych na elementy sekcji.

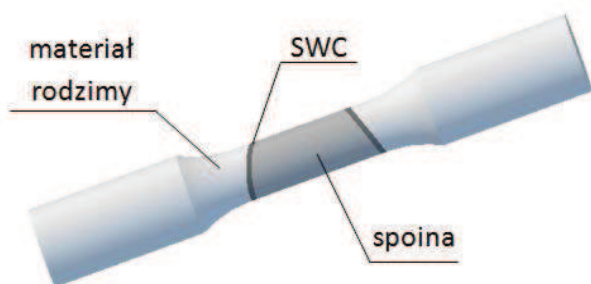
### 2. METODA BADANIA

---

Badania zmęczeniowe przeprowadzono stosując procedury zawarte w normie PN-84/H-04334, odpo-

wiednika amerykańskiej normy ASTM E 606-80. Oceniając własności materiałów, próby wykonywano z wykorzystaniem serwohydraulicznego systemu MTS-810 wyposażonego w cyfrowe sterowanie TestSTAR II i TestWare SX. Zastosowano sterowanie odkształceniem za pośrednictwem ekstensometrów firmy MTS typu 632.14c-20. Badania przeprowadzono w temperaturze pokojowej dla pięciu wybranych wartości odkształcenia całkowitego z zakresu  $\Delta\epsilon_c = 0,6 \div 1,2\%$ , przy częstotliwości 0,2 Hz. Dla każdego zakresu odkształcenia rejestrowano dane z kanałów odczytu bezpośredniego: siłę, przemieszczenie, odkształcenie w czasie.

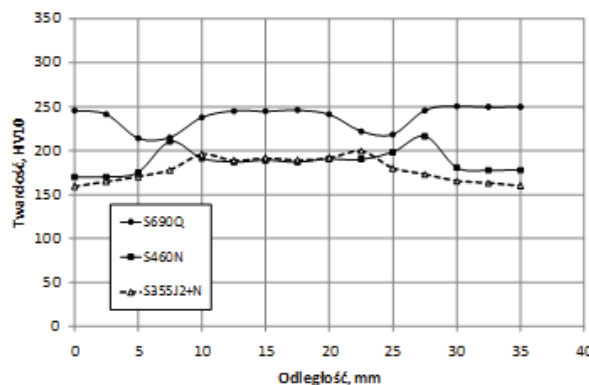
Badania przeprowadzono na próbkach jednorodnych wykonanych z trzech gatunków stali: S460N, S690QL, S355J2 oraz próbkach zawierających złącza spawane (rys. 1). W próbkach ze złączami spawanymi spoiny znajdowały się w środku długości pomiarowej próbki, a ich długość mierzona w kierunku osi próbki, na jej powierzchni zewnętrznej była zmienna i mieściła się w zakresie  $12 \div 22$  mm.



Rys. 1. Próbka do badań zmęczeniowych zawierająca złącze spawane

Celem identyfikacji obszarów: materiału rodzimego, strefy wpływu ciepła (SWC) oraz materiału spoiny wyznaczono również rozkłady twardości wzdłuż długości próbki. Rozkład twardości wzdłuż długości próbki dla złączy spawanych analizowanych gatunków stali przedstawiono na rys. 2. Stwierdzono, że dla próbek ze stali S355J2+N, S460N twardość w obszarze spoiny jest większa w porównaniu do twardości materiału rodzimego. Lokalny przyrost twardości w tych próbkach występuje również w obszarze strefy wpływu ciepła. Inny jest rozkład twardości w próbkach ze stali S690Q, gdzie twardość materiału rodzimego jest porównywalna do twardości materiału spoiny, natomiast w obszarze SWC następuje lokalnie spadek twardości próbki.

Przeprowadzono również statyczne próby rozciągania na standardowych próbkach jednorodnych wg PN-EN 10002-1. Podczas tych badań zastosowano sterowanie przemieszczeniem ze stałą prędkością 2 mm/min. Wyniki badania zestawiono w tabeli 1.



Rys. 2. Rozkład twardości wzdłuż długości próbki dla złączy spawanych ze stali S355J2+N, S460N i S690Q

Tabela 1

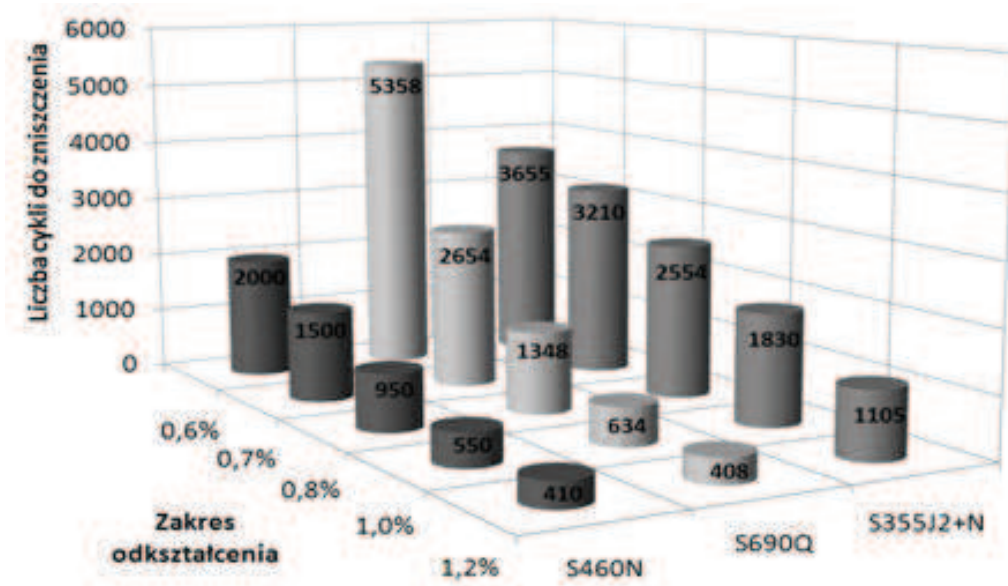
**Podstawowe właściwości mechaniczne stali stosowanych na elementy sekcji obudowy zmechanizowanej**

Właściwość mechaniczna	Gatunek stali		
	S355J2	S460N	S690Q
$R_m$ , MPa	558,0	576,0	785,0
$R_{0,2}$ , MPa	383,0	404,1	704,3
$A_5$ , %	18,0	29,8	16,3
$Z$ , %	64,4	75,2	70,9

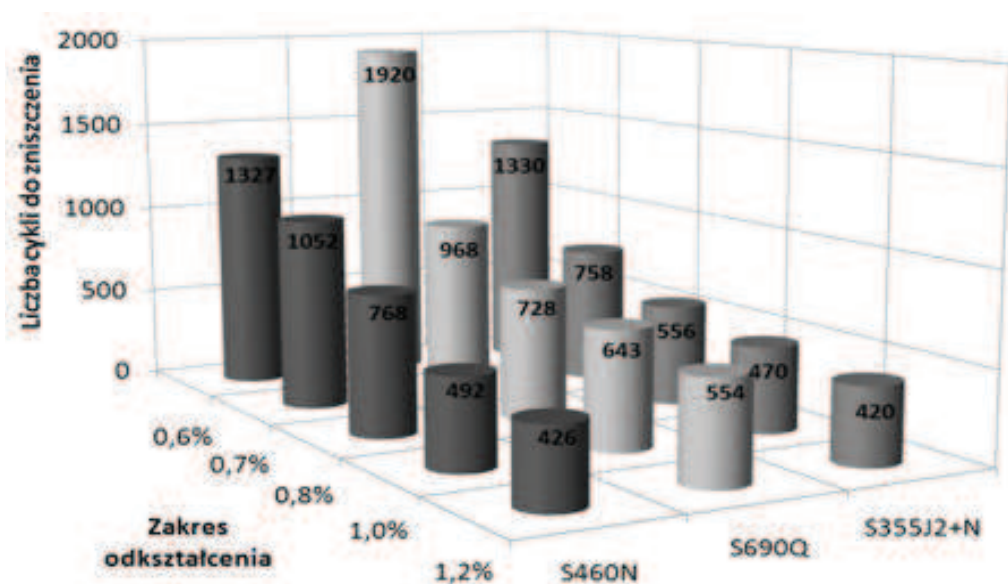
### 3. WYNIKI BADANIA

Badania trwałości zmęczeniowej przeprowadzono dla tych samych zakresów odkształcenia całkowitego, zarówno dla próbek jednorodnych oraz dla próbek zawierających połączenia spawane. Porównanie liczby cykli do zniszczenia próbek jednorodnych wykonanych z trzech badanych materiałów, przy tych samych zakresach odkształcenia, przedstawiono na rys. 3. Największy spadek trwałości zmęczeniowej przy wzroście odkształcenia całkowitego (ponad 13-krotny) stwierdzono dla próbek ze stali S690Q, natomiast najmniejszy dla S355J2+N (3,3-krotny).

Na rys. 4 przedstawiono porównanie liczby cykli do zniszczenia dla próbek ze złączami spawanymi. Zmniejszenie trwałości zmęczeniowej (przy wzroście odkształcenia całkowitego w zakresie od 0,6% do 1,2%) dla próbek ze złączami spawanymi, wykonanych z trzech analizowanych gatunków stali jest 3,11-krotne (dla stali S460N), 3,44-krotne (dla stali S690Q) oraz 3,16-krotne (dla stali S355J2+N).



Rys. 3. Porównanie trwałości zmęczeniowej próbek jednorodnych

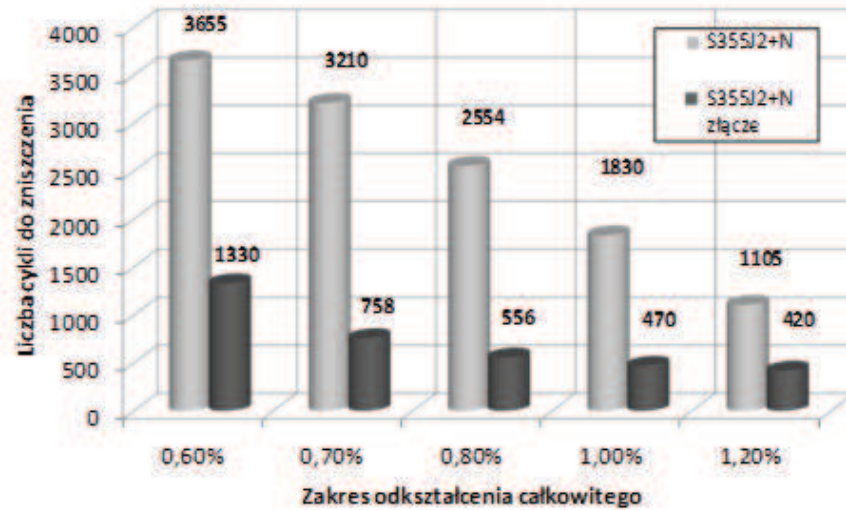


Rys. 4. Porównanie trwałości zmęczeniowej próbek ze złączami spawanymi

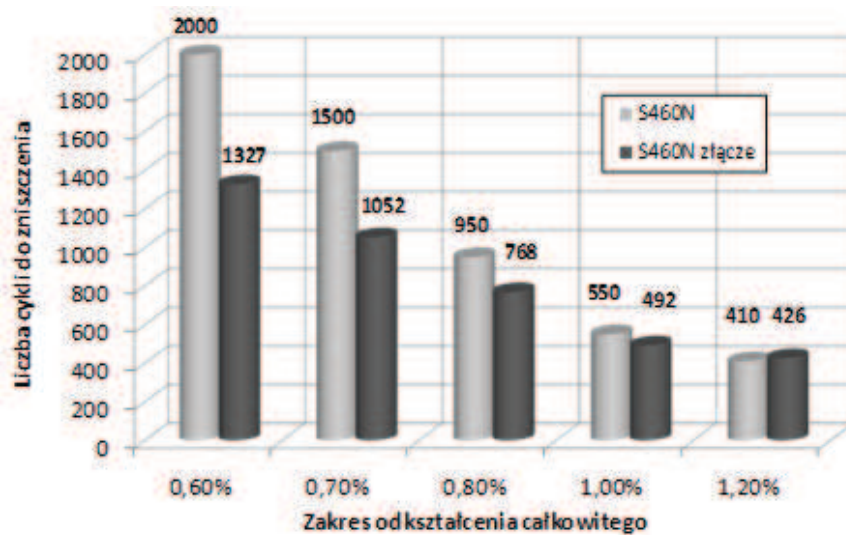
Porównanie trwałości zmęczeniowej próbek jednorodnych i próbek zawierających spoinę, wykonanych z trzech analizowanych gatunków stali – badanych przy zachowaniu stałych zakresów odkształcenia całkowitego – ilustrują rys. 5÷7. Z przedstawionego na wykresach porównania trwałości zmęczeniowej wynika, że połączenia spawane w istotny sposób wpływają na trwałość próbek w zakresie małej liczby cykli.

Zmianę właściwości materiału w warunkach działania cyklicznych zmian obciążenia przedstawia się najczęściej w postaci krzywych cyklicznego odkształcenia. Krzywe te dla próbek jednorodnych oraz

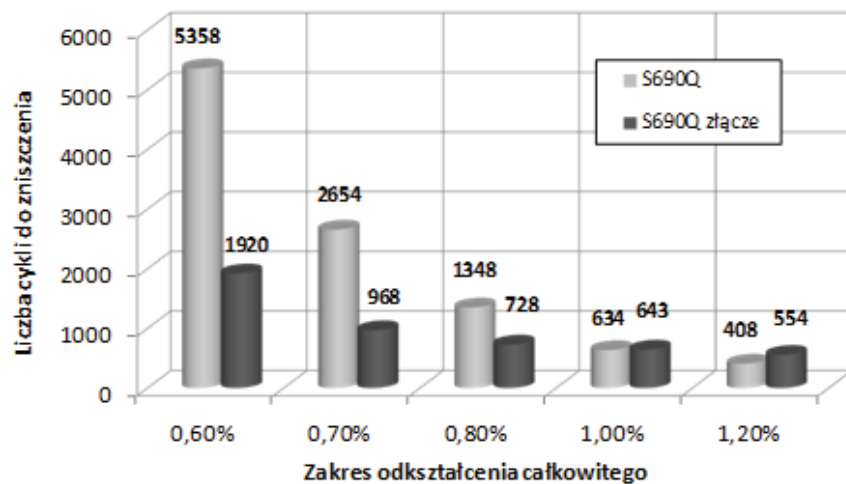
próbek ze spoiną pokazano na rys. 8÷10. Na rysunkach tych oprócz krzywych cyklicznego odkształcenia przedstawiono krzywe statycznego rozciągania dla próbek z materiałów jednorodnych oraz próbek ze złączami spawanymi. Porównując przebieg wykresów cyklicznego odkształcenia z wykresami otrzymanymi na podstawie próby statycznego rozciągania stwierdzono, że dla dwóch gatunków stali (S355J2+N i S460Q) wykonanie spoiny spowodowało istotne osłabienie materiału, natomiast w przypadku stali S690Q nie stwierdzono tak istotnego wpływu połączenia na przebieg charakterystyk odkształcenia w procesie zmęczenia niskocyklowego.



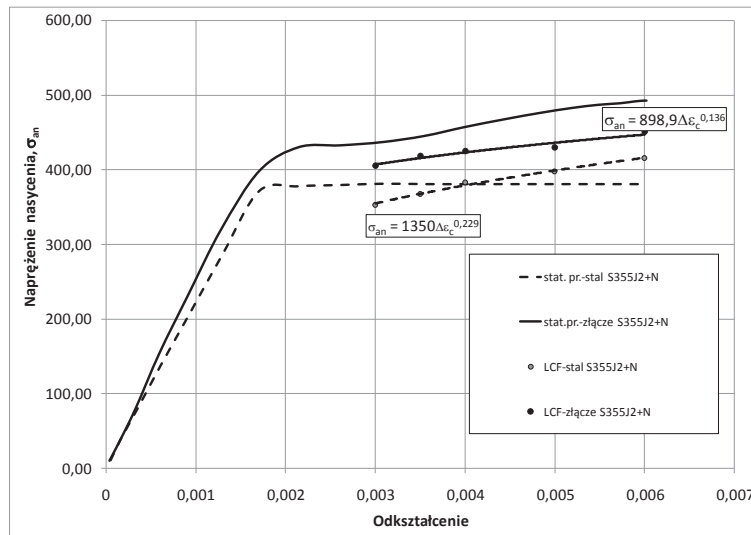
Rys. 5. Porównanie trwałości zmęczeniowej próbek jednorodnych i próbek ze złączami spawanymi – stal S355J2+N



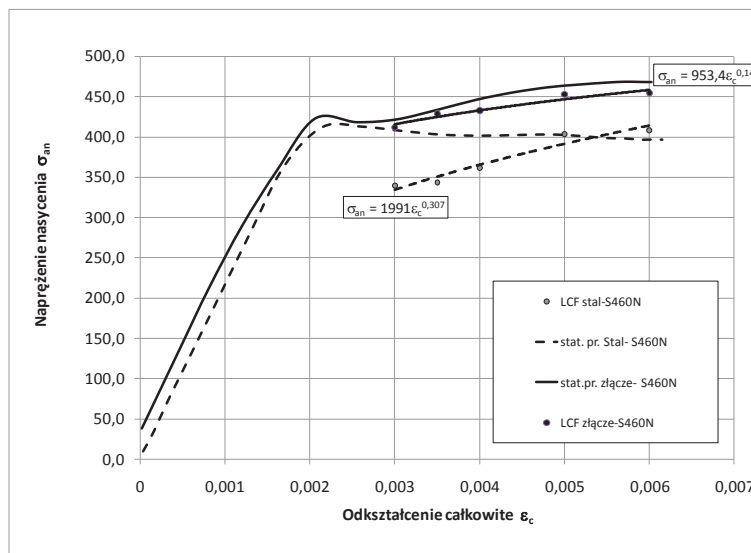
Rys. 6. Porównanie trwałości zmęczeniowej próbek jednorodnych i próbek ze złączami spawanymi – stal S460N



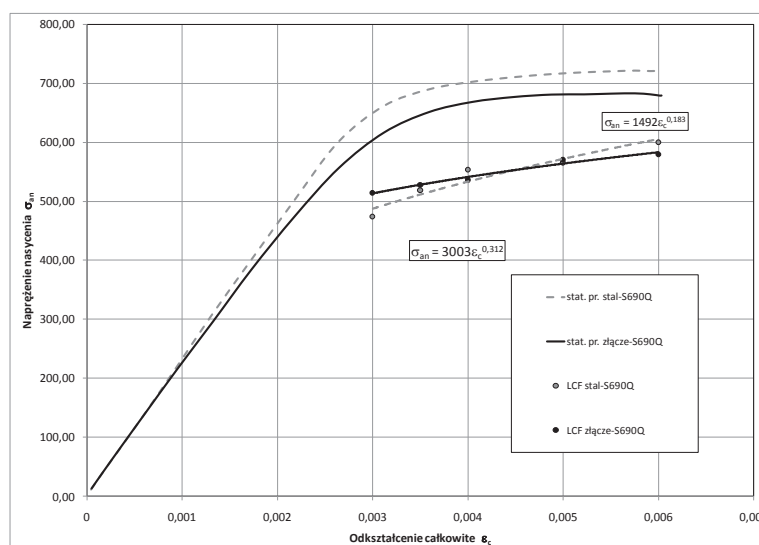
Rys. 7. Porównanie trwałości zmęczeniowej próbek jednorodnych i próbek ze złączami spawanymi – stal S690N



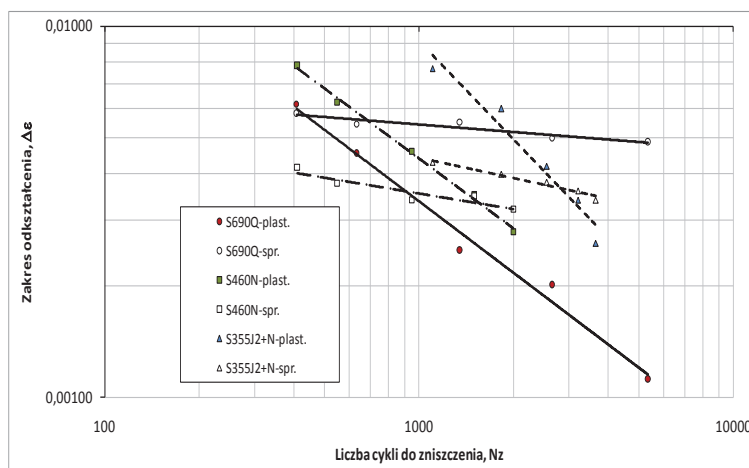
Rys. 8. Krzywe cyklicznego odkształcenia stali S355J2+N – dla próbek jednorodnych i próbek ze złączami spawanymi



Rys. 9. Krzywe cyklicznego odkształcenia stali S460N – dla próbek jednorodnych i próbek ze złączami spawanymi



Rys. 10. Krzywe cyklicznego odkształcenia stali S690Q – dla próbek jednorodnych i próbek ze złączami spawanymi



Rys. 11. Wykresy trwałości zmęczeniowej stali S355J2+N, S460N i S690Q

Analizując wykresy cyklicznego odkształcenia można zauważyć, że w przypadku stali S690Q krzywa cyklicznego odkształcania dla materiału rodzimego ma bardzo zbliżony przebieg w porównaniu do krzywej dla złączy spawanych. W pozostałych dwóch przypadkach (stale S355J2+N i S460N), w próbkach ze złączami spawanymi, naprężenie całkowite (dla tej samej wartości odkształcenia) ma wartość istotnie większą w porównaniu do próbek jednorodnych. Związane jest to z miejscem położenia pęknięcia zmęczeniowego w próbkach ze złączami spawanymi. Dla próbek ze stali S355J2+N i S460Q pęknięcia występowały w materiale rodzimym (poza spoiną i strefą wpływu ciepła). Dla gatunku S690Q pęknięcia występowały w strefie wpływu ciepła. O znacznym zróżnicowaniu trwałości zmęczeniowej próbek jednorodnych i ze złączami spawanymi świadczy wykres Mansona-Coffina (rys. 11), na podstawie którego wyznaczyć można liczbę cykli do pojawienia się pęknięcia.

## 5. PODSUMOWANIE

Badania zmęczeniowe w zakresie małej liczby cykli umożliwiły porównanie trwałości zmęczeniowej podstawowych gatunków stali stosowanych na elementy sekcji obudowy zmechanizowanej. Dla trzech gatunków stali, najczęściej stosowanych na podstawowe elementy sekcji, trwałość zmęczeniowa (rozumiana, jako liczba cykli do zniszczenia) próbek wykonanych z materiału rodzimego była wyższa w porównaniu z próbkami zawierającymi złącza spawane. Najmniejszy spadek trwałości próbek ze złączami spawanymi stwierdzono dla stali gatunku S460N. Dla próbek ze stali S355J2+N i S690Q spadek trwałości złączy spawanych w porównaniu z materiałem jednorodnym był znacznie większy.

Szczególnie uwidoczniło się to dla gatunku S355J2+N, dla którego niskocyklowa trwałość zmęczeniowa materiału rodzimego była trzykrotnie wyższa od trwałości złączy spawanych.

Na podstawie wykresów trwałości zmęczeniowej w układzie Mansona-Coffina stwierdzić możemy, że w przypadku stali S690Q o niskocyklowej trwałości zmęczeniowej w głównej mierze decydować będą własności wytrzymałościowe materiału. Dla stali S460N oraz S355J2+N niskocyklowa trwałość zmęczeniowa uzależniona jest od własności plastycznych.

Wykonane badania wykazały, że jedną z możliwych przyczyn powstawania pęknięć w elementach sekcji obudowy zmechanizowanej, w których poszczególne blachy łączone są technologiami spawalniczymi, może być efekt lokalizacji odkształceń spowodowany niejednorodnością rozkładu własności mechanicznych w otoczeniu spoiny. Zjawisko to wymaga dalszych badań obejmujących zarówno wyznaczenie charakterystyk mechanicznych, jak i komputerowe modelowanie w zakresie sprężysto-plastycznym.

Praca powstała w wyniku realizacji projektu rozwojowego o symbolu N R09001 04 finansowanego przez NCBiR.

### Literatura

1. Cieśla M., Junak G.: Charakterystyki w zakresie zmęczenia małowytrzymałych stali martenzytycznych i ich złączy spawanych. Wyd. SITPH, Katowice 2009.
2. Junak G., Hernas A.: Niskocyklowa trwałość zmęczeniowa złączy spawanych ze stali VM12. Energetyka 2008, zeszyt tematyczny nr XIX nt. "Projektowanie i Innowacje Remontowe w Energetyce".
3. Okrajni J., Junak G.: Low cycle fatigue of steels at high temperature under gradual loading. DMV – Deutscher Verband für Materialforschung und prüfung e.V Darmstadt, 2009
4. PN – EN 1804-1, Maszyny dla górnictwa podziemnego. Wymagania bezpieczeństwa dla obudowy zmechanizowanej.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Marek Jaszczuk