



Problemy trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych wykonanych ze stali S890QL

CZESŁAW GOSS, PAWEŁ MARECKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Katedra Budowy Maszyn,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2, cgoss@wat.edu.pl, pmarecki@wat.edu.pl

Streszczenie. W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań statycznych i zmęczeniowych próbek ze stali S890QL. Zaprezentowano także wyniki przeprowadzonych prób statycznych i zmęczeniowych próbek połączeń spawanych z tej samej stali, a także wyniki pomiarów naprężeń własnych spawanego połączenia czołowego. Dokonano porównania wartości współczynnika spiętrzenia naprężeń α_k wyznaczonych na drodze obliczeniowej i za pomocą modelowania numerycznego.

Słowa kluczowe: niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa

1. Wstęp

Przeprowadzone w Katedrze Budowy Maszyn badania mostu towarzyszącego skonstruowanego z przeznaczeniem dla pododdziałów inżynierskich [1] wykazały konieczność głębszego poznania zachowania się stali S890QL w warunkach obciążenia cyklicznego. W artykule zaprezentowano wyniki prób statycznego rozciągania oraz wyniki badań zmęczeniowych materiału rodzimego i płaskich próbek spawanych. Przedstawiono również wyniki pomiarów naprężeń własnych w połączeniu spawanym czołowym. Dokonano zestawienia porównawczego wartości współczynnika spiętrzenia naprężeń α_k wyznaczonych metodą elementów skończonych i metodami Jewdokimowa oraz Lawrance'a.

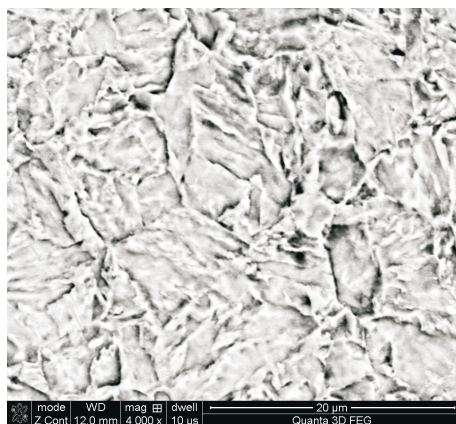
2. Wyniki badań statycznych stali S890QL

W pierwszej kolejności przeprowadzono próby statycznego rozciągania. Przedmiotem badań były próbki płaskie wykonane ze stali S890QL o składzie chemicznym przedstawionym w tabeli 1, podanym przez producenta. Na rysunku 1 przedstawiono zdjęcie struktury badanej stali z wyraźnie widocznymi ziarnami ferrytu. Próbki zostały wykonane z blachy o grubości 6 mm zgodnie z rysunkiem 2a. Wartości średnie uzyskanych wyników z próby statycznego rozciągania zamieszczono w tabeli 2. Przykładowy wykres statycznego rozciągania przedstawiono na rysunku 3, a widok próbki po zerwaniu na rysunku 4.

TABELA 1

Skład chemiczny (analiza wytopu) stali S890QL (XABO890)

C max	Si max.	Mn max.	P max.	S max.	Cr max.	Mo max	Ni max	V max.
0,18	0,50	1,60	0,02	0,01	0,80	0,60	2,00	0,10



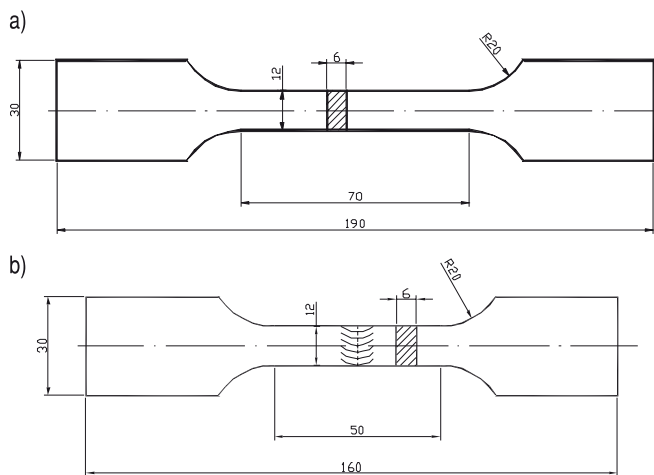
Rys. 1. Struktura badanej stali

TABELA 2

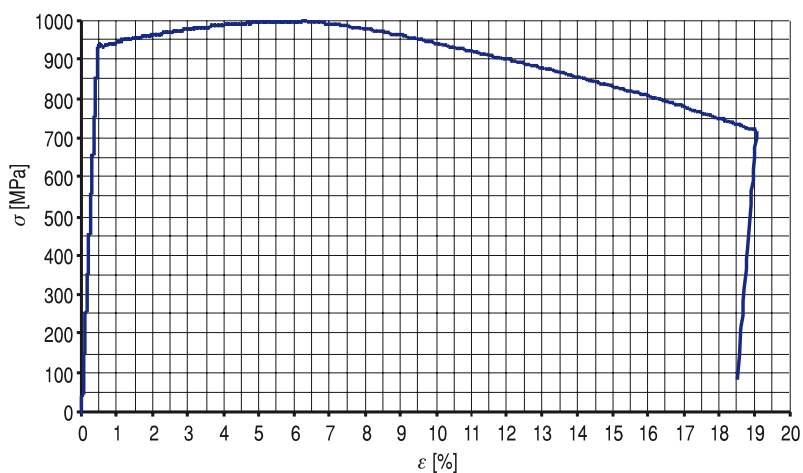
Wartości średnie uzyskanych wyników prób statycznego rozciągania

$R_{0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	R_u [MPa]	A [%]	Z [%]
988	1008	1596	11	47

Dla tej stali stwierdzono małą różnicę między granicą plastyczności $R_{0,2}$ i wytrzymałością doraźną R_m (rys. 3).



Rys. 2. Próbkę płaskie stosowane do badań statycznego rozciągania: a) materiał rodzimy; b) spoina czołowa



Rys. 3. Wykres statycznego rozciągania dla stali S890QL



Rys. 4. Widok próbki płaskiej po zerwaniu

Na podstawie wyników statycznego rozciągania określono moduł Younga oraz wykładnik statycznego umocnienia n , zgodnie z zależnością (1) za [2]:

$$n = \frac{\lg \frac{R_u}{R_{0,2}}}{\frac{\ln \frac{100}{100-Z}}{\lg \frac{R_{0,2}}{E}}}, \quad (1)$$

gdzie: R_u — naprężenie rozrywające;
 $R_{0,2}$ — granica plastyczności;
 Z — przewężenie;
 E — moduł Younga (dla stali S890QL określono $E = 190$ GPa).

Dla badanej stali uzyskano $n = 0,09$.

Na podstawie przeprowadzonej próby statycznego rozciągania określono wartość współczynnika C występującego we wzorze Mansona-Coffina — $N_f^k \Delta \varepsilon_{pl} = C$, z zależności (2) [2, 3]

$$C = \frac{1}{2} \ln \frac{F_0}{F_u}, \quad (2)$$

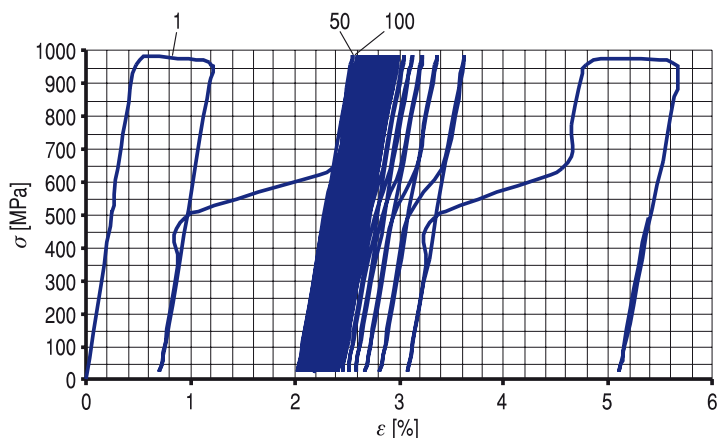
gdzie: F_0 — pole przekroju początkowego próbki;
 F_u — pole przekroju po zerwaniu.

Dla badanej stali uzyskano $C = 0,41$. Współczynnik k przyjęto wstępnie $k = 0,5$.

3. Wyniki badań niskocyklowej wytrzymałości zmęczeniowej stali S890QL

Po przeprowadzeniu prób statycznego rozciągania wykonano badania niskocyklowej wytrzymałości zmęczeniowej próbek płaskich ze stali S890QL. Badania przeprowadzono dla próbek płaskich, jak dla próby statycznej (rys. 2a), przy obciążeniu odzerowo-tętniącym o stałej wartości naprężenia maksymalnego (co jest zgodne z warunkami pracy konstrukcji mostu MS-20 [1]).

Wyniki badań zmęczeniowych przy stałej wartości naprężenia σ_{\max} i obciążeniu odzerowo-tętniącym wskazują, że stal S890QL wykazuje cykliczne umocnienie (rys. 5). Trwałość zmęczeniowa badanych próbek zawierała się w zakresie od około 6000 do około 9000 cykli. Amplituda odkształceń plastycznych szybko maleje, utrzymując prawie stałą wartość aż do chwili zmęczeniowego zniszczenia próbki.



Rys. 5. Przykładowy wykres zmian naprężeń i odkształceń w funkcji liczby cykli przy stałej wartości naprężeń $\sigma_{\max} = 990$ MPa

4. Wyniki badań statycznych oraz niskocyklowej wytrzymałości zmęczeniowej połączenia spawanego ze stali S890QL

Następnym etapem badań było przeprowadzenie prób statycznej i niskocyklowej wytrzymałości zmęczeniowej połączenia spawanego [5]. Przedmiotem badań były próbki ze spoiną czołową V, wykonane metodą TIG, spoiwo X90-IG, zgodnie z wymaganiami normy [6] (rys. 2b).

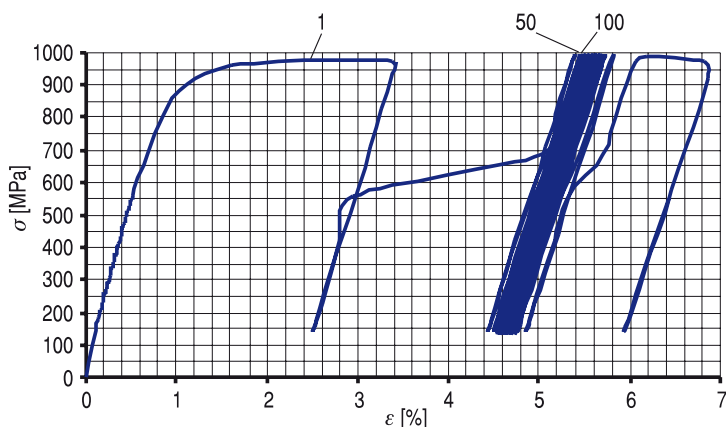
Próba statycznego rozciągania pokazała, że przegrzanie materiału w strefie wpływu ciepła, jak i sama spoina, nie pogarszają właściwości wytrzymałościowych. Zarówno granica plastyczności $R_{0,2}$ jak i wytrzymałość na rozciąganie R_m nie zmieniły swoich wartości.

Przeprowadzone badania niskocyklowej wytrzymałości zmęczeniowej próbek ze spoiną czołową wykazały znaczny spadek trwałości badanych próbek (około 60%) w stosunku do próbek wykonanych z materiału rodzimego poddanych naprężeniom o zbliżonych wartościach. Trwałość badanych połączeń zawierała się w zakresie od około 2500 do około 4000 cykli (rys. 6).

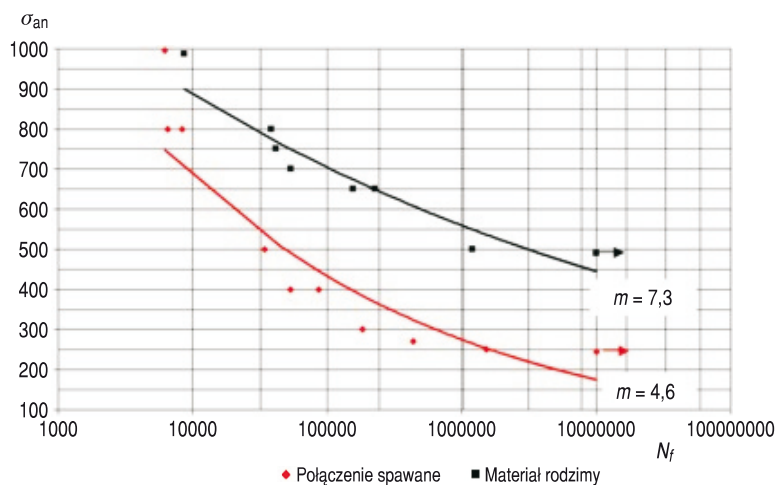
W wyniku przeprowadzonych badań wykreślony został także wykres Wöhlera obejmujący również zakres wysokocyklowy (rys. 7).

Współczynnik kierunkowy m określony został z zależności

$$m = \frac{\log \frac{N_0}{N}}{\log \frac{\sigma_{an}}{Z_G}} \quad (3)$$



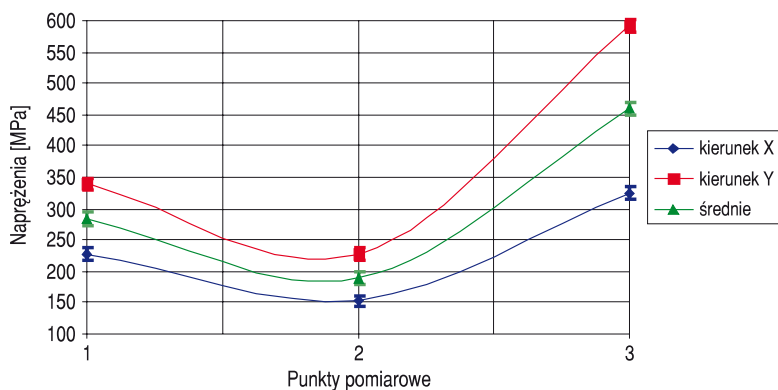
Rys. 6. Przykładowy wykres zmian naprężeń i odkształceń w funkcji liczby cykli przy stałej wartości naprężeń $\sigma_{\max} = 990$ MPa



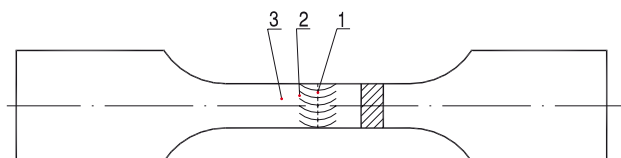
Rys. 7. Wykres Wöhlera dla próbek z materiału rodzimego i połączenia spawanego

Szczególnie w zakresie wysokiej liczby cykli widoczne jest wyraźne zmniejszenie trwałości zmęczeniowej połączenia spawanego w stosunku do próbek wykonanych z materiału rodzimego.

Wykonano również pomiary naprężeń własnych w spoinach [9]. Pomiary przeprowadzono metodą rentgenograficzną na dyfraktometrze STRAINFLEX PSF-2M firmy Rigaku. Średnica wiązki promieni x padających na powierzchnię równa była 1,5 mm. Rozkłady naprężeń przedstawiono na rysunku 8. Wykazują one znaczne wartości dodatnie, co powoduje powiększanie naprężeń wypadkowych przy rozciąganiu, a więc zmniejszenie trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych. Zaobserwowano to w czasie badań zmęczeniowych.



Rys. 8. Rozkład naprężeń własnych w spoinie czołowej



Rys. 9. Rozmieszczenie punktów pomiarowych naprężeń własnych w spoinie czołowej

Na wykresie zobrazowano naprężenia na kierunkach: x — wzdłuż osi podłużnej próbki, y — poprzecznie do osi podłużnej próbki oraz naprężenia średnie z tych kierunków. Punkty pomiarowe umieszczone były w środku spoiny (pkt 1), na linii wtopu (pkt 2) oraz na granicy strefy wpływu ciepła (pkt 3) (rys. 9).

5. Określenie współczynnika spiętrzenia naprężeń α_k

5.1. Określenie współczynnika kształtu metodą obliczeń

Do określenia współczynnika kształtu na drodze obliczeń posłużono się metodą Lawrance'a oraz metodą Jewdokimowa [2]

5.1.1. Metoda Lawrance'a

W celu określenia współczynnika kształtu α_k dokonano pomiarów geometrii badanego połączenia spawanego, podczas których określono kąt wzniosu θ oraz promień przejścia spoiny w materiał rodzimy ρ (rys. 10). Pomiarów dokonano od strony lica i od strony grani spoiny. Uzyskane wartości zamieszczono w tabeli 3.

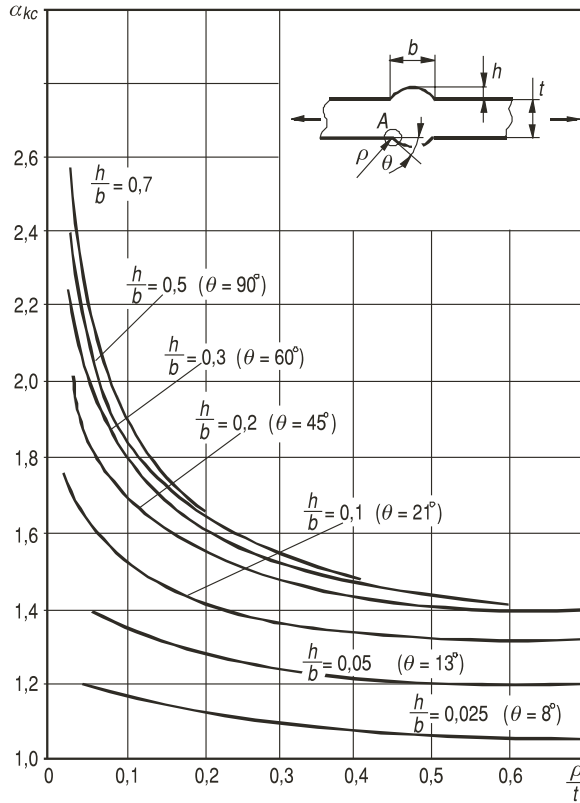
Rys. 10. Współczynnik kształtu α_{kc} w połączeniu doczołowym o $b/t = 1$ [2]

TABELA 3
Wartości kąta wzniosu θ i promienia przejścia ρ

Parametr		Wartość
lico spoiny	θ	26-27°
	ρ	4,8-7,5°
grań spoiny	θ	32-35°
	ρ	2,3-3°

Ogólna zależność wykorzystywana w metodzie Lawrance'a przyjmuje postać:

$$\alpha_k = B \cdot \left[1 + A \cdot \left(\frac{t}{\rho} \right)^C \right], \quad (4)$$

gdzie: A, B, C — wielkości zależne od rodzaju złącza spawanego, sposobu jego obciążenia oraz lokalnej formy geometrycznej;

- t — grubość elementów łączonych ($t = 6$ mm);
 ρ — promień przejścia spoiny w materiał rodzimy;
 θ — kąt wzniosu spoiny.

Wartości współczynników A, B, C zamieszczono w tabeli poniżej (tab. 4).

TABELA 4

Wartości współczynników A, B, C

Współczynnik	Wartość
A (lico)	$A = 0,27(\text{tg}\theta)^{0,25} = 0,226-0,228$
A (grani)	$A = 0,27(\text{tg}\theta)^{0,25} = 0,240-0,247$
B	1
C	0,5

Po podstawieniu odpowiednich wartości do wzoru (4) uzyskano współczynnik kształtu:

- od strony lica — $\alpha_k = 1,202-1,255$;
- od strony grani — $\alpha_k = 1,339-1,399$.

Do dalszych obliczeń zastosowano wartość maksymalną z podanego przedziału.

5.1.2. Metoda Jewdokimowa

Współczynnik kształtu α_k wg metody Jewdokimowa określono z zależności (5):

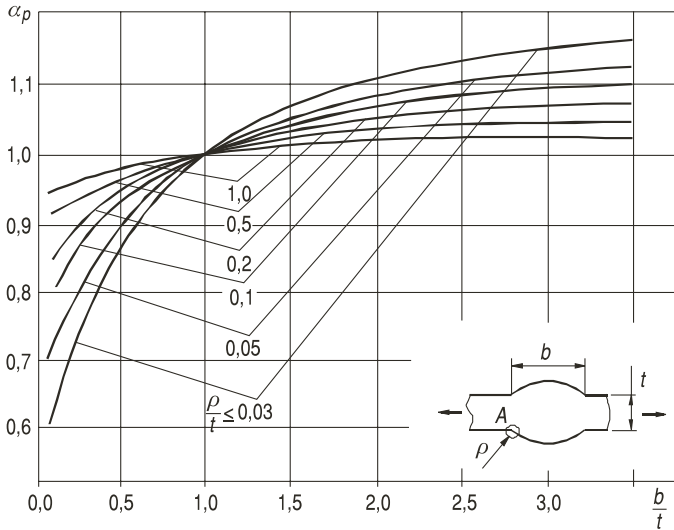
$$\alpha_k = \alpha_{kc} \cdot \alpha_p, \quad (5)$$

gdzie: α_k — całkowity współczynnik kształtu;
 α_{kc} — współczynnik kształtu przy rozciąganiu i zginaniu spoiny czołowej o obrysie lica zbliżonym do okręgu, o szerokości równej grubości łączonych elementów określony według rysunku 10;
 α_p — współczynnik poprawkowy uwzględniający rzeczywistą szerokość spoiny określony na podstawie rysunku 11.

$$\alpha_k = 1,35 \cdot 1,03 = 1,39 \text{ — strona lica,}$$

$$\alpha_k = 1,46 \cdot 0,98 = \mathbf{1,53} \text{ — strona grani.}$$

Do dalszych obliczeń przyjęto wartość $\alpha_k = 1,53$.



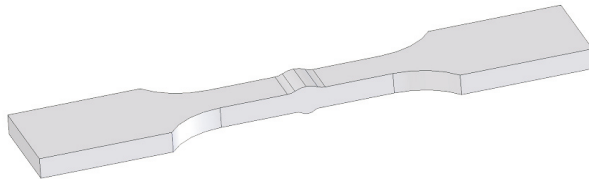
Rys. 11. Współczynnik poprawkowy α_p uwzględniający rzeczywistą szerokość spoiny [2]

5.2. Określenie współczynnika spiętrzenia naprężeń na drodze analizy numerycznej

Obliczenia dotyczą rozkładów naprężeń i odkształceń w próbkach spawanych ze stali S890QL podczas statycznego rozciągania.

5.2.1. Obiekt analizy

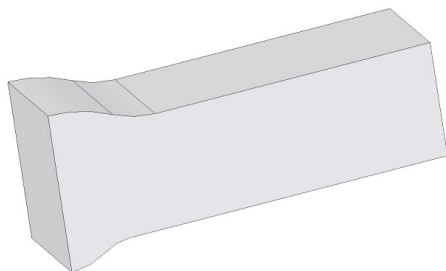
Obiektem analizy była płaska próbka wioselkowa z czołową spoiną w środku.



Rys. 12. Próбка wioselkowa

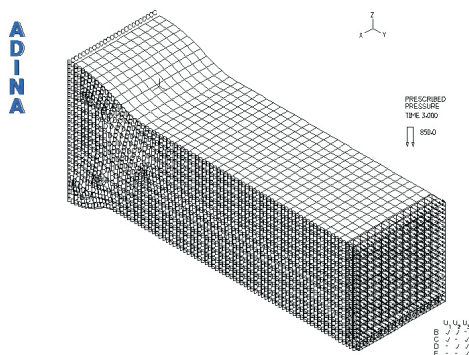
5.2.2. Model obliczeniowy

Z uwagi na płaszczyzny symetrii wzdłużnej i poprzecznej model obliczeniowy stanowił wycinek $\frac{1}{4}$ próbki z pominięciem uchwytów wioselkowych (rys. 13).



Rys. 13. Wybrany wycinek ¼ próbki

Model składał się z 10371 elementów przestrzennych (3D) w tym 3462 czworosściennych elementów 10-węzłowych i 6909 sześciosściennych elementów 20-węzłowych (rys. 14). Siatka elementów rozpięta była na 33 232 węzłach. Oznaczenia warunków brzegowych na rysunku 14 „C” — brak przemieszczenia w kierunku „y”, „D” — brak przemieszczenia w kierunku „x”.



Rys. 14. Model MES z zaznaczeniem podziału na elementy, warunków brzegowych i obciążenia

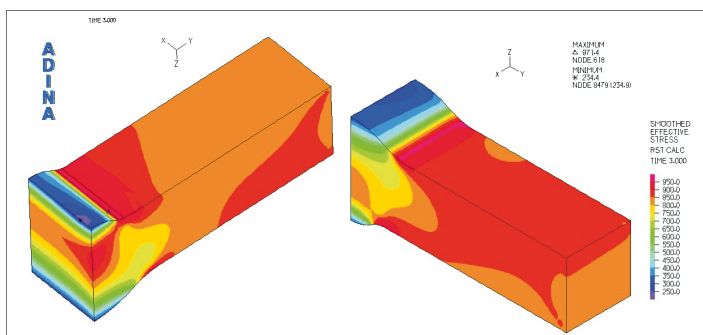
Jako materiał przyjęto model materiału sprężysto-plastyczny z nieliniowym umocnieniem opracowany na podstawie wyników próby rozciągania.

5.2.3. Wyniki obliczeń

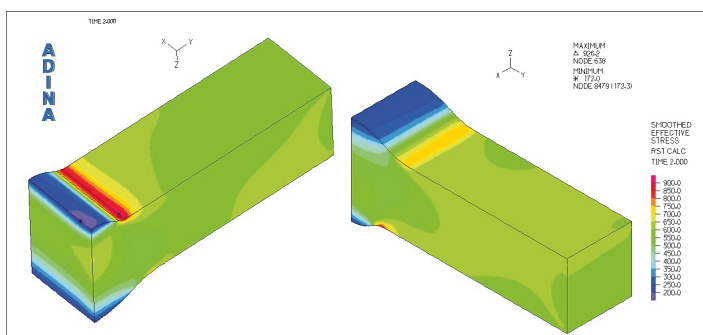
Wyniki przedstawiono w postaci kolorowych warstwic naprężeń zredukowanych obliczonych wg hipotezy wyężeniowej Hubera-Mizesa, pasm przemieszczeń i wykresów wzdłuż wybranych linii.

Na podstawie przeprowadzonego modelowania numerycznego uzyskano rozkłady naprężeń przedstawione na rysunkach 15-17. Na tej podstawie określono współczynnik spiętrzenia naprężeń α_k :

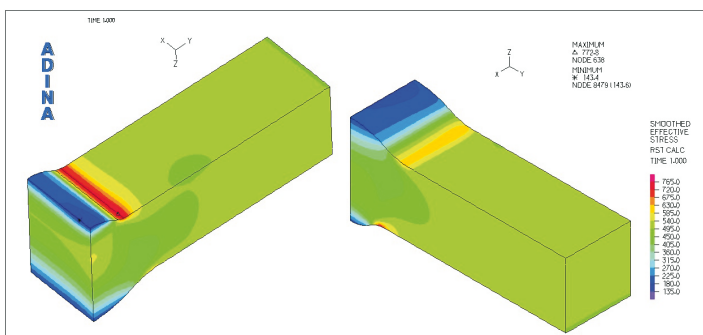
- od strony grani spoiny — $\alpha_k = 1,20$,
- od strony lica spoiny — $\alpha_k = 1,08$.



Rys. 15. Naprężenia zredukowane przy obciążeniu ciśnieniem 850 MPa

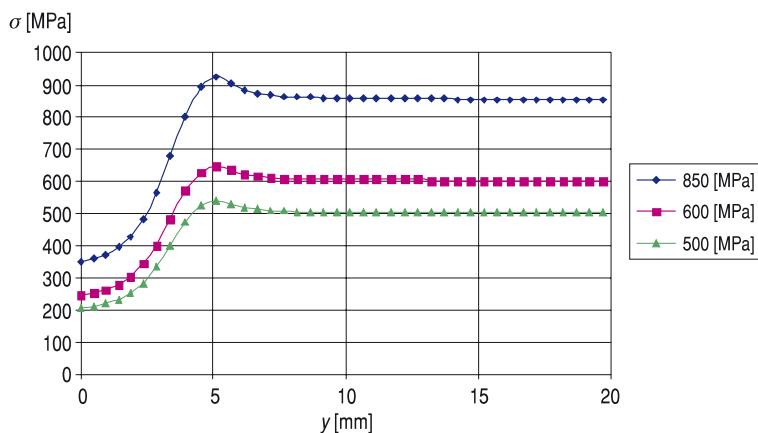


Rys. 16. Naprężenia zredukowane przy obciążeniu ciśnieniem 600 MPa

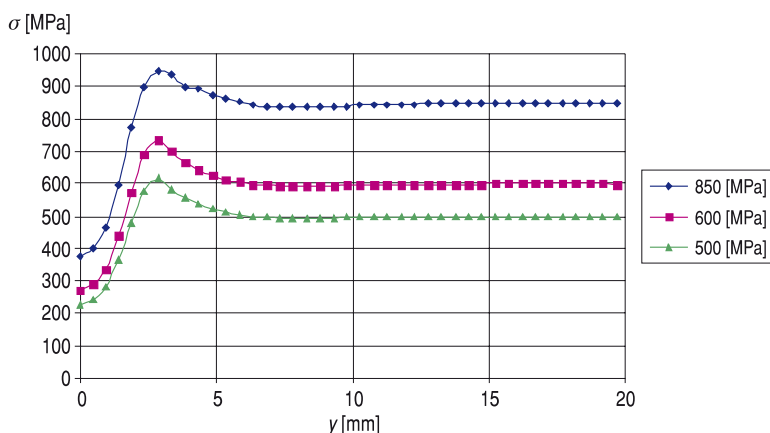


Rys. 17. Naprężenia zredukowane przy obciążeniu ciśnieniem 500 MPa

Zatem wartości te są niższe niż uzyskane metodami obliczeniowymi. W dalszych pracach do analizy trwałości zmęczeniowej połączenia spawanego wykorzystane zostaną wszystkie określone wartości α_k .



Rys. 18. Naprężenia zredukowane wzdłuż linii na górnej krawędzi modelu (środek próbki) dla trzech poziomów ciśnienia 850, 600 i 500 MPa



Rys. 19. Naprężenia zredukowane wzdłuż linii na dolnej krawędzi modelu (środek próbki) dla trzech poziomów ciśnienia 850, 600 i 500 MPa

6. Podsumowanie

Stal S890QL (XABO 890) wykazuje cykliczne umocnienie z tendencją do szybkiej stabilizacji. Dotyczy to zarówno próbek wykonanych z materiału rodzimego jak i próbek ze spoiną czołową. Podczas badania przy obciążeniu odzerowo-tętniącym o stałej wartości naprężenia σ_{\max} wykazano zmniejszanie się szerokości pętli histerezy i amplitudy odkształcenia plastycznego. Na podstawie badań próbek spawanych stwierdzono zmniejszenie się ich trwałości o około 60% w porównaniu do próbek z materiału rodzimego. Tendencja taka utrzymuje się także w zakresie wysoko cyklowym.

Przeprowadzone pomiary naprężeń własnych w spoinach czołowych wykazały ich znaczną wartość dodatnią, co powoduje sumowanie się tych naprężeń

z naprężeniami od sił zewnętrznych przy rozciąganiu. Ma to znaczący wpływ na trwałość badanych elementów.

Wyniki badań potwierdzają konieczność głębszego poznania charakterystyk zmęczeniowych stali S890QL (XABO 890) w zakresie małej liczby cykli. Istotne jest także określenie, jaki wpływ wywierają połączenia spawane na właściwości wytrzymałościowe konstrukcji wykonanych z tej stali. W przypadku mostu mamy do czynienia głównie z obciążeniami o cyklu zbliżonym do odzerowo-tętniącego, dlatego też na takich obciążeniach podczas dalszych badań skupiona zostanie uwaga autorów.

W kolejnych etapach prac prowadzone będą także badania innych typów połączeń spawanych ze stali S890QL. Następnie badana będzie stal S960QL (XABO 960) oraz jej połączenia spawane różnego typu. Badania te są kontynuowane głównie pod kątem modyfikacji węzłów spawanych mostu w celu zwiększenia trwałości konstrukcji.

Artykuł wpłynął do redakcji 25.08.2011 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w listopadzie 2011 r.

LITERATURA

- [1] *Założenia Taktyczno Techniczne — Most Samochodowy MS-20*, Departament Polityki Zbrojeniowej MON, Warszawa, 2003.
- [2] Cz. GOSS, S. KŁYSZ, W. WOJNOWSKI, *Problemy niskocyklowej trwałości zmęczeniowej wybranych stali i połączeń spawanych*, ITWL, Warszawa, 2004.
- [3] S. KOCAŃDA, *Podstawy konstrukcji maszyn*, Warszawa, 1983.
- [4] S. KOCAŃDA, A. KOCAŃDA, *Niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa metali*, PWN, Warszawa, 1989.
- [5] T.R. GURNEY, *Zmęczenie konstrukcji spawanych*, WNT, Warszawa, 1973.
- [6] Polska Norma PN-88/M-69710.
- [7] Cz. GOSS, P. MARECKI, *Niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa połączeń spawanych ze stali S890QL*, XXIII Sympozjum „Zmęczenie i Mechanika Pękania”, Bydgoszcz–Pieczyska, 2010.
- [8] Cz. GOSS, P. MARECKI, *Badania zmęczeniowe stali S890QL i jej połączeń spawanych*, XXV Sympozjon Podstaw Konstrukcji Maszyn, Gdańsk, 2011.
- [9] M. LECH-GREGA, *Raport Nr 3129/N/1/4 — Pomiar naprężeń własnych*, Skawina, 2011.
- [10] S. KOCAŃDA, J. SZALA, *Podstawy obliczeń zmęczeniowych*, PWN, Warszawa, 1997.

CZ. GOSS, P. MARECKI

Problems of fatigue life of welded joints made of S890QL steel

Abstract. In this paper, some selected results of static and low cycle fatigue tests of S890QL steel are presented. The paper also shows the results of static and low cycles fatigue tests of welded joints made of S890QL steel and measurement residual stresses. A value of coefficient intensity factor obtained from calculations and numerical modeling was compared.

Keywords: fatigue life, welded joints