

Ali Osman SUIÇMEZ, Michał PIOTROWSKI, Maciej KOTYK

TRWAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA A RODZAJ POŁĄCZENIA SPAWANEGO STALI S650MC I S700MC

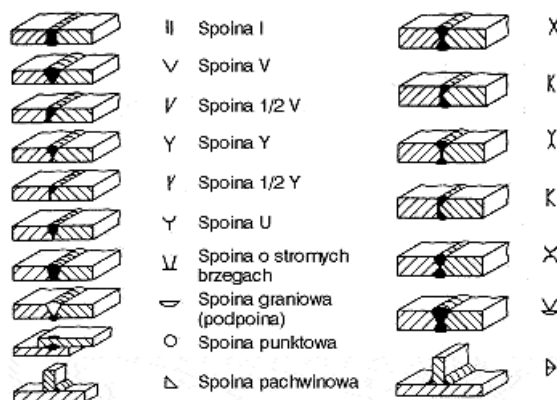
Streszczenie: W pracy zaprezentowano wyniki badań zmęczeniowych i statycznych próbek wykonanych z dwóch gatunków stali. Próbki były wykonane ze spajanych ze sobą kawałków blach w sposób trwały za pomocą spawania łukiem krytym. Badania miały na celu zobrazowanie wytrzymałości mechanicznej poszczególnych rodzajów spoin.

Słowa kluczowe: wytrzymałość zmęczeniowa, wytrzymałość statyczna, spoina, spawanie stali

1. WPROWADZENIE

Spośród technologii łączenia materiałów w sposób nierozłączny najbardziej rozpowszechnione jest spawanie. Zdecydowana większość przemysłu mechanicznego wykorzystuje tę technikę spajania do budowy nowych konstrukcji, jak i regeneracji uszkodzonych obiektów.

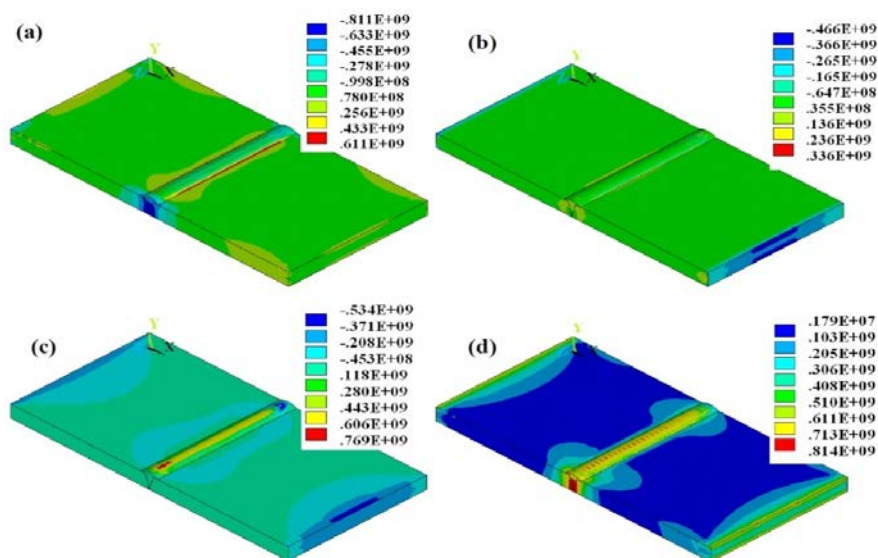
Na przestrzeni ubiegłego stulecia powstało wiele różnych metod spawania zróżnicowanych ze względu na źródło energii cieplnej i sposób tworzenia atmosfery ochronnej itp. Rozróżnia się kilka podstawowych rodzajów spoin (rys. 1).



Rys. 1. Rodzaje złączy spawanych
Fig. 1. Types of welded joints

mgr inż. Ali Osman SUIÇMEZ, Sakarya Üniversitesi, e-mail: aliosmansuicmez@hotmail.com
mgr inż. Michał PIOTROWSKI, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: m.piotrowski@utp.edu.pl
mgr inż. Maciej KOTYK, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-789 Bydgoszcz, e-mail: maciej.kotyk@utp.edu.pl

Odmienne techniki spawania i rodzaj złączy dają szereg zróżnicowanych zalet w postaci: możliwości spajania odmiennych materiałów, łatwej automatyzacji procesu, możliwości spawania w niekorzystnych warunkach (np. spawanie podwodne), szczelności złącza, jak i wiele innych [2]. Jednakże proces spawania ma także szereg wad, niejednokrotnie uniemożliwiających wykorzystanie tej techniki spajania [6], np. zmiana struktury materiału w strefie wpływu ciepła oraz odkształcenia cieplne powstające na skutek miejscowego dostarczenia dużej ilości skondensowanej energii cieplnej. Przebudowa struktury materiału w sposób oczywisty ma wpływ na wytrzymałość doraźną, jak i zmęczeniową, odkształcenia pospawalnicze wywołują dużą ilość naprężeń skupionych w samej spoinie, w strefie wpływu ciepła, ale i w szczególnych przypadkach w całej konstrukcji. Stosując różne techniki spawania można zmniejszać wielkość powstałych naprężeń, jednak nigdy nie uniknie się ich występowania. Należy pamiętać o tym, iż spiętrzenia naprężeń w spoinie nie są jedynie wynikiem powstania karbu technologicznego w samej spoinie i strefie wpływu ciepła, ale także wynikiem oddziaływania odkształceń cieplnych i skurczów pospawalniczych [1]. Rozkład naprężeń składowych i ekwiwalentnych przedstawiono na rysunku 2. Ważne jest odpowiednie konstruowanie przebiegu i charakteru spoin [3]. Zakres podjętych badań obejmował badania czterech typów próbek w warunkach obciążeń statycznych i zmiennych.



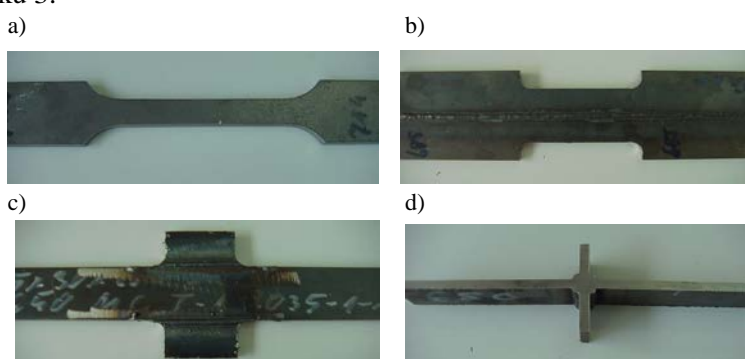
Rys. 2. Spiętrzenie naprężeń w spoinie doczołowej V: a) naprężenie normalne w poprzek grubości SX, b) naprężenia normalne wzdłuż grubości SY, c) SZ naprężenia wzdłużne, d) naprężenie resztkowe [2]

Fig. 2. a) transverse stress SX, b) along-thickness normal stress SY, c) longitudinal stress SZ, d) von Mises equivalent residual stress SEQV mapping of weld by hybrid laser-GMA welding (unit of stress in the contour is Pa) [2]

W spoinach występuje spiętrzenie naprężeń wynikające z:

- karbu mechanicznego (lokalna zmiana kształtu przedmiotu),
- karbu strukturalnego (lokalna zmiana struktury materiału),
- wad spawalniczych,
- dodatkowych naprężeń spawalniczych.

Eksperyment przeprowadzono zgodnie z normami PN-EN ISO 68921:2009 Próba statycznego rozciągania w temperaturze otoczenia oraz PN-74/H-04327 Badanie metali na zmęczenie. Do badań wykorzystano 4 typy próbek wykonane ze stali S650MC (6) oraz stali S700MC (7). Kształt próbek przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Obiekty badań: a) próbka gładka (typ A), b) ze spoiną wzdłużną (typ B), c) ze spoinami wzdłużnymi (typ C), d) połączenie krzyżowe (typ D)

Fig. 3. Objects of research: a) smooth specimen (type A), b) the longitudinal weld (type B), c) the longitudinal welds (type C), d) the cross (type D)

2. BADANIA STATYCZNE

Próby statycznego rozciągania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej Instron 8501, wyposażonej w głowicę siłową w zakresie pomiarowym ± 100 kN. Pomiaru wydłużenia dokonywano, wykorzystując ekstensometr do prób statycznych o bazie pomiarowej 50 mm, mocowany na części pomiarowej próbki. Badania polegały na poddawaniu próbki obciążeniu narastającemu z prędkością przesuwu tłoka maszyny wynoszącą $0,05 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ [5].

Badania przeprowadzono w temperaturze 21°C i wilgotności 30%. Próby prowadzono do chwili rozdzielenia próbki w obszarze części pomiarowej. W trakcie próby rejestrowano chwilowe wartości siły obciążającej próbkę oraz jej wydłużenie.

3. BADANIA ZMĘCZENIOWE

Badane próbki poddano zmiennemu, odzerowo tętniącemu rozciąganiu (tab. 1) [4]. Poziomy obciążenia przyjęte do badań określono po analizie wyników prób statycznego rozciągania. Parametry obciążenia zmiennego zestawiono

w tabeli 1. Próby zmęczeniowe prowadzono do chwili wystąpienia pęknięcia próbki. W trakcie badań poziomy naprężenia dla próbek typu D zostały zmienne ze względu na nieprzewidziane wcześniej wartości uzyskanych wyników i dla naprężenia 90 MPa uzyskany wynik wchodził w zakres niskocyklowy.

Tabela 1. Parametry obciążenia zmiennego stosowane podczas badań
Table 1. Parameters of variable stress

Poziom	Naprężenie [MPa]			
	σ_{max}	σ_{min}	σ_a	$\Delta\sigma_a$
1	70	0	35	70
2	80	0	40	80
2	90	0	45	90

4. WYNIKI BADAŃ PRÓB STATYCZNYCH I CYKLICZNYCH

Forma uszkodzenia próbek podczas prób statycznego rozciągania była związana z typem próbki. W przypadku próbki bez spoin (typ A) oraz próbki ze spoiną wzdłużną (typ B) pęknięcie następowało zawsze w części pomiarowej próbki (rys. 4a, b). Powyższe dotyczyło obydwu gatunków stali. W przypadku pozostałych dwóch rodzajów próbek pęknięcie następowało zawsze w pobliżu spoiny. Wyjątkiem jest połączenie krzyżowe, gdzie połączenie spawane zawsze uległo rozerwaniu w strefie spoiny. Pęknięcia próbek typu C i D przedstawiono na rysunku 4c i 4d.

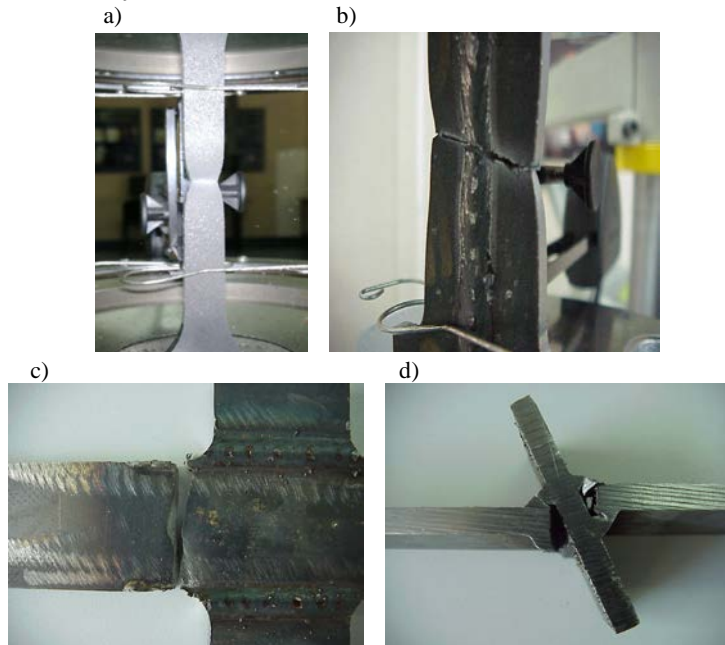
Wyniki prób statycznego rozciągania przedstawiono w formie tabelarycznej. Naprężenie w próbce obliczano, dzieląc wartość chwilową siły obciążającej przez przekrój początkowy próbki. Jako przekrój początkowy przyjmowano: dla próbek typu A – przekrój określony wymiarami poprzecznymi próbki, dla próbek typu B, C, D – przekrój określony wymiarami poprzecznymi próbki poza spoiną.

Wyniki badań z maszyny wytrzymałościowej poddano szczegółowemu opracowaniu. Wyniki opracowania zestawiono w tabeli 2.

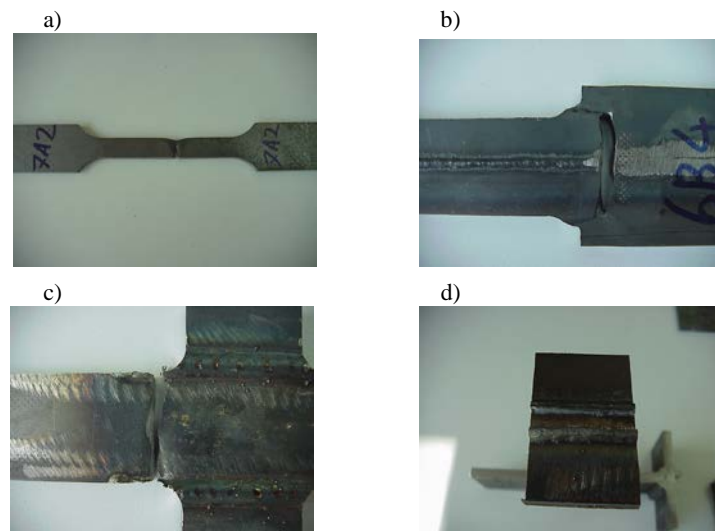
Tabela 2. Wyniki opracowania wykresów statycznego rozciągania
Table 2. Tensile test results

Lp.	Typ próbki	Stal S650MC			Stal S700MC			Normatywnie	
		Rm [MPa]	Re [MPa]	A [%]	Rm [MPa]	Re [MPa]	A [%]	S650MC	S700MC
1	A	815	754	22,66	814	779	21,51	Rm _{max} = 880 Re = 650 A = 20	Rm _{max} = 950 Re = 700 A = 20
2	B	850	766	21,12	797	695	20,68		
			Rp _{0,2}			Rp _{0,2}			
3	C	855	594	8,02	872	664	6,67		
4	D	691	668	1,25	744	689	1,3		

Na rysunku 5 pokazano najczęściej spotykane postaci uszkodzenia podczas prób zmęczeniowych.

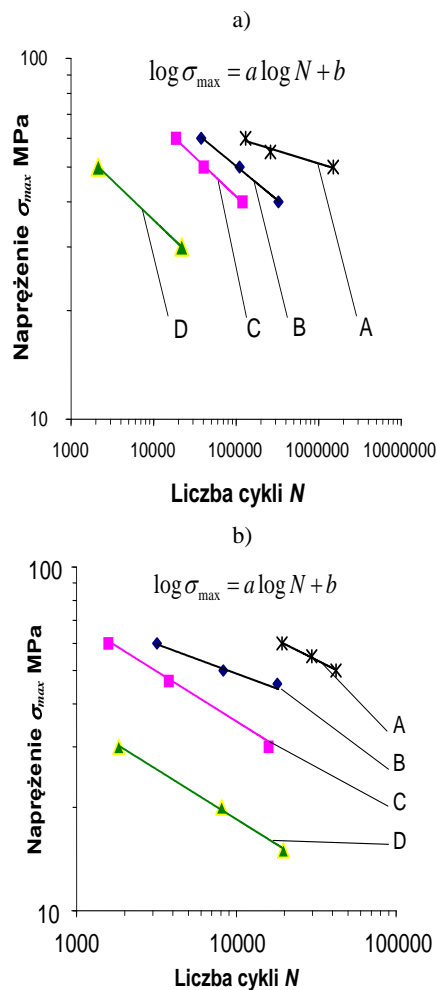


Rys. 4. Forma uszkodzenia próbek podczas prób statycznych: a) uszkodzenie próbki typu A, b) uszkodzenie próbki typu B, c) uszkodzenie próbki typu C, d) uszkodzenie próbki typu D
Fig. 4. The static tests damaged form of samples: a) the damage to the sample type A, b) damage to the sample type B, c) damage to the sample type C, d) damage to the sample type D



Rys. 5. Postaci uszkodzenia podczas prób zmęczeniowych: a) typ A, b) typ B, c) typ C, d) typ D
Fig. 5. The fatigue tests damaged form of samples: a) the damage to the sample A, b) damage to the sample B, c) damage to the sample type C, d) damage to the sample type D

Uzyskane podczas badań zmęczeniowych trwałości przedstawiono na rysunkach 6 i 7 w postaci wykresów zmęczeniowych w układzie współrzędnych liczba cykli do pęknięcia N – naprężenie σ_{max} .



Rys. 6. Wykresy zmęczeniowe: a) stal S650MC, b) stal S700MC
 Fig. 6. Fatigue life graphs: a) steel S650MC, b) steel S700MC

Wykresy zmęczeniowe w układzie bilogarytmicznym aproksymowano równaniem w postaci:

$$\log \sigma_{max} = a \log N + b \quad (1)$$

gdzie:

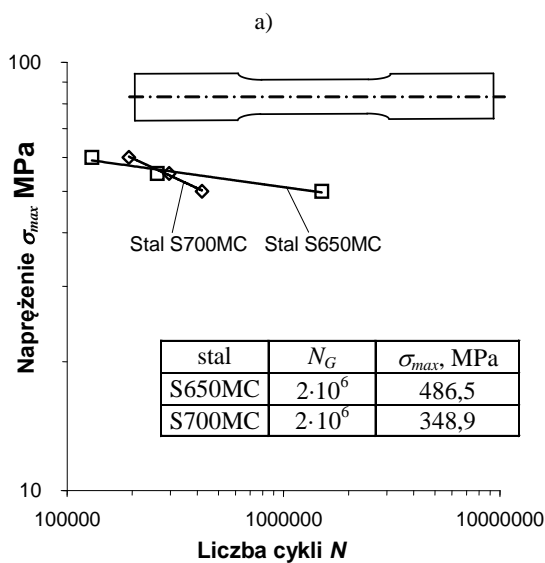
- a – współczynnik kierunkowy wykresu,
- b – wyraz wolny prostej regresji wykresu.

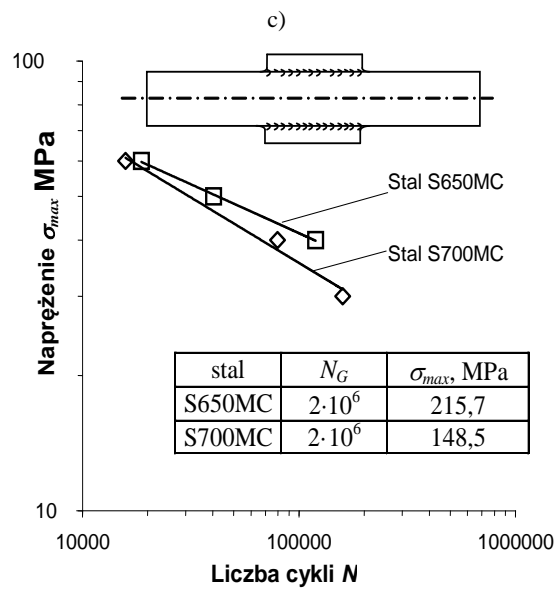
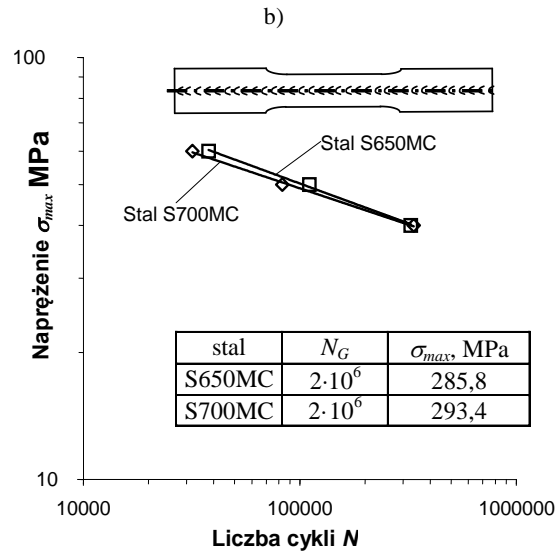
Na podstawie wyników badań obliczono z równania wykresu zmęczeniowej wartości naprężeń odpowiadające bazowym liczbom cykli $N_G = 10^6$, $N_G = 2 \cdot 10^6$. Uzyskane wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 3 i na rysunku 7.

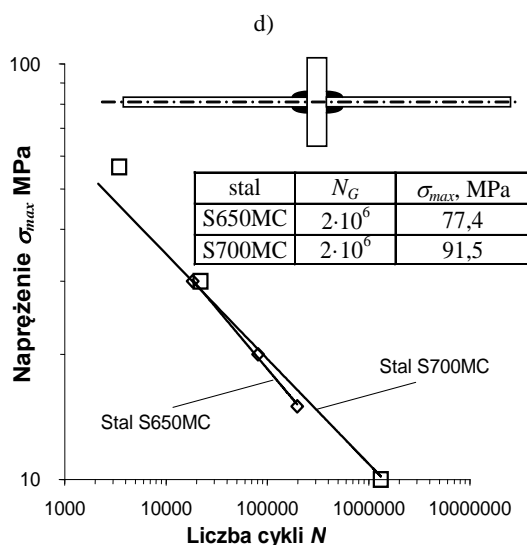
Tabela 3. Parametry wykresów zmęczeniowych dla próbek wykonanych ze stali S650MC i S700MC
Table 3. Fatigue life function parameters of steel S650MC and S700MC

Typ próbki	Stal	Równanie	a	b	σ_{max} dla $N_G=2 \cdot 10^6$
A	S650MC	$\sigma_{max}=a \cdot \log N + b$	-0,0706	1355	486,5042
	S700MC		-0,2333	10300	348,9851
B	S650MC		-0,1885	4403,9	285,8204
	S700MC		-0,1712	3518	293,4672
C	S650MC		-0,2177	5079	215,7963
	S700MC		-0,2914	10189	148,5975
D	S650MC		-0,2903	5226,6	77,45158
	S700MC		-0,2526	3576,2	91,57599

W celu porównania uzyskanych wyników trwałości próbek tego samego typu wykonanych ze stali S650MC i S700MC na rysunku 7 zestawiono wykresy zmęczeniowe.







Rys. 7. Wykresy zmęczeniowe uzyskane dla różnych typów próbek: a) próbka gładka (typ A), b) ze spoiną wzdłużną (typ B), c) ze spoinami wzdłużnymi (typ C), d) połączenie krzyżowe (typ D)

Fig. 7. Fatigue life graphs: a) smooth specimen (type A), b) the longitudinal weld (type B), c) the longitudinal welds (type C), d) the cross (type D)

5. PODSUMOWANIE

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań można stwierdzić, iż wytrzymałość jest ściśle zależna od rodzaju spoiny, jak i sposobu jej obciążenia. Trwałość zmęczeniowa próbek układu się w ciąg zależny od rodzaju próbki ze spoiną (w kolejności D, C, B, A), który nie zmienia swej kolejności dla różnych materiałów. Jest to zależne od kształtu spoiny na poszczególnych rodzajach próbek, co bezpośrednio przekłada się na sposób obciążenia samej spoiny. Obliczona granica zmęczenia na poziomie $2 \cdot 10^6$ cyklu dla próbek typu A i C ma większy poziom naprężeń dla stali S650MC, co zmienia się na korzyść stali S700MC dla próbek typu B i D. Występowanie spoin czołowych na przebadanych próbkach zwiększa wytrzymałość doraźną, a zmniejsza wytrzymałość zmęczeniową w stosunku do materiałów rodzimego.

Uzyskane wyniki badań blach spajanych dwoma rodzajami najczęściej stosowanych spoin spawalniczych pokazały, że rodzaj spoiny ma znaczny wpływ na wytrzymałość doraźną i zmęczeniową uzyskanych połączeń:

- czołowe – wysoka wytrzymałość na obciążenia stałe i zmienne,
- pachwinowe – łatwe w wykonaniu, niższa wytrzymałość szczególnie w przypadku obciążeń zmiennych.

Rodzaj spoiny i jej umiejscowienie ze względów wytrzymałościowych należy uwzględnić przy konstruowaniu obiektów spawanych.

LITERATURA

- [1] KONG F., KOVACEVIC R., Development of a Comprehensive Process Model for Hybrid Laser-Arc Welding. Southern Methodist University, 2011.
- [2] MAZANEK K., ŚNIEŻEK L., ŚLEŻAK T., Badania zmęczeniowe połączeń spawanych wysokowytrzymałej stali S960QL. Biuletyn WAT 62(1), 2013.
- [3] MUCHRYJ J., STACHURSKI M., Badania złączy spawanych. Biuro Gamma Warszawa, 2003.
- [4] PN-74/H04327- Badanie metali na zmęczenie. Próba osiowego rozciągania ściskania przy stałym cyklu obciążeń zewnętrznych.
- [5] PN-EN 10002-1:2004. Metale. Próba rozciągania. Metoda badania w temperaturze otoczenia.
- [6] http://engineeringtraining.tpub.com/14070/css/14070_37.htm

FATIGUE LIFE AND TYPE OF STEEL WELDED JOINT, STEEL S650MC AND S700MC

Summary: The paper presents a summary of the results of fatigue life tests and static samples made of two types of steel. The samples were made from bonded together pieces of steel. The tests were designed to illustrate the various types of mechanical strength of the joints.

Key words: strength of materials, welded joints, fatigue life