



## Badania zmęczeniowe połączeń spawanych wysokowytrzymałej stali S960QL

KAROLINA MAZANEK<sup>1</sup>, LUCJAN ŚNIEŻEK, TOMASZ ŚLĘZAK

<sup>1</sup>ELOKON Polska Sp. z o.o., 04-505 Warszawa, ul. Nowowiśniowa 2,  
karolina.mazanek@gmail.com

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

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań doświadczalnych i teoretycznych niskocyklowej trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych stali S960QL stosowanej na stalowe konstrukcje spawane. Badaniom poddano złącza doczołowe, krzyżowe i z żebrzem wzdłużnym. Największą trwałością cechuje się złącze doczołowe, a najmniejszą złącze krzyżowe. Zastosowany model obliczeniowy dobrze koresponduje z wynikami doświadczeń oraz pozwala bezpiecznie oszacować trwałość zmęczeniową dla naprężeń nominalnych powyżej 530 MPa.

**Słowa kluczowe:** budowa i eksploatacja maszyn, połączenia spawane, wytrzymałość zmęczeniowa, stal S960QL

### 1. Wstęp

Od obecnie projektowanych maszyn i konstrukcji wymaga się coraz wyższych parametrów technicznych oraz niezawodności przy relatywnie niskich kosztach wytwarzania i eksploatacji. Aby spełnić te wymagania, producenci muszą stosować nowoczesne materiały konstrukcyjne o wysokich właściwościach wytrzymałościowych, do których zalicza się stal S960QL, bardziej znana pod handlową nazwą XABO 960. Wysokowytrzymałe stale konstrukcyjne o granicy plastyczności  $R_e$  ( $R_{0,2}$ ) wynoszącej co najmniej 700 MPa są stosowane między innymi w konstrukcjach prześle mostów samobieżnych (np. most samochodowy MS-20) [1], rurociągów wysokociśnieniowych, wysięgników żurawi przejezdnych [2] czy innych konstrukcji dźwigowych stosowanych np. w przemyśle wydobywczym [3]. Elementy tych

konstrukcji są eksploatowane w warunkach obciążeń zmiennych, a ich wytrzymałość jest ograniczona zdolnością do przenoszenia naprężeń spiętrzonych w strefach węzłów krytycznych, do których zalicza się między innymi węzły spawane. Przypadki takich uszkodzeń elementów analizowano między innymi w pracy [3]. Stwierdzono, że wytrzymałość zmęczeniowa połączeń spawanych jest o około 30% niższa w stosunku do wytrzymałości materiału rodzimego. Na podstawie wyników badań własnych [4] oraz właściwości wytrzymałościowych podawanych przez producentów [5] można stwierdzić, że stale wysokowytrzymałe charakteryzują się bardzo niewielkim przyrostem odkształcenia i naprężenia pomiędzy umowną granicą plastyczności a wytrzymałością na rozciąganie, wynoszącym w skrajnych przypadkach około 2%. Taka charakterystyka stali stwarza niebezpieczeństwo zniszczenia konstrukcji spowodowane obecnością bardzo niewielkich odkształceń plastycznych.

W publikacjach krajowych i zagranicznych można znaleźć zaledwie pojedyncze opracowania dotyczące właściwości wytrzymałościowych i warunków spawania stali S960QL. Brakuje natomiast badań wytrzymałości zmęczeniowej zarówno samej stali jak i elementów konstrukcji spawanych. Celem niniejszej pracy jest określenie trwałości zmęczeniowej wybranych węzłów konstrukcji spawanej ze stali S960QL. Badania te poprzedzono oceną właściwości mechanicznych materiału rodzimego i analizą geometrii i mikrostruktury złączy spawanych ze spoiną czołową, z żebrą poprzecznym oraz żebrą podłużnym.

## 2. Przedmiot badań

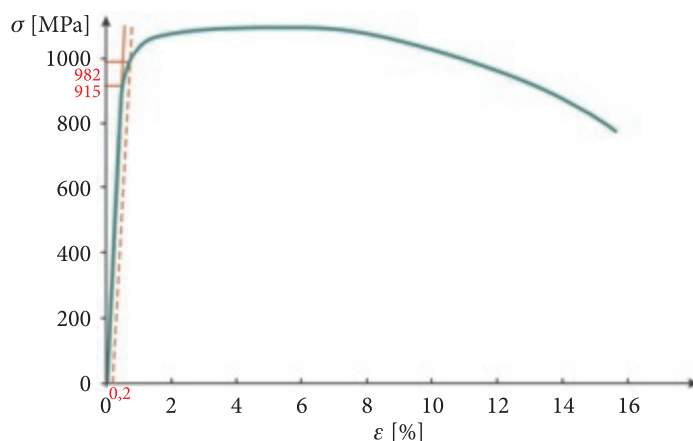
Badania przeprowadzono na elementach spawanych ze stali S960QL o składzie chemicznym przedstawionym w tabeli 1.

Oznaczenia i skład chemiczny stali S960QL

TABELA 1

Skład chemiczny [% maks.]								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
0,18	0,50	1,60	0,02	0,01	0,80	0,70	2,00	0,10

Podstawowe właściwości wytrzymałościowe stali określono w oparciu o statyczną próbę rozciągania. Badanie zostało przeprowadzone na pulsatorze hydraulicznym INSTRON 8802 z wykorzystaniem ekstensometru INSTRON typu 2630-112 w warunkach określonych normą PN-91/H-0431. Wykres uzyskany podczas przeprowadzonej próby rozciągania przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Wykres uzyskany podczas statycznej próby rozciągania stali S960QL

Porównanie właściwości wytrzymałościowych określonych na podstawie powyższego wykresu z właściwościami podawanymi przez producenta zamieszczono w tabeli 2.

TABELA 2

Właściwości mechaniczne stali S960QL

Właściwości	$R_{0,05}$ [MPa]	$R_{0,2}$ [MPa]	$R_u$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$E$ [MPa]	$A$ [%]
Określone podczas badań własnych	915	982	778	1100	196429	15
Podawane przez producenta	–	> 960	–	980-1150	–	> 10

Do badań wybrano trzy rodzaje połączeń spawanych (rys. 2):

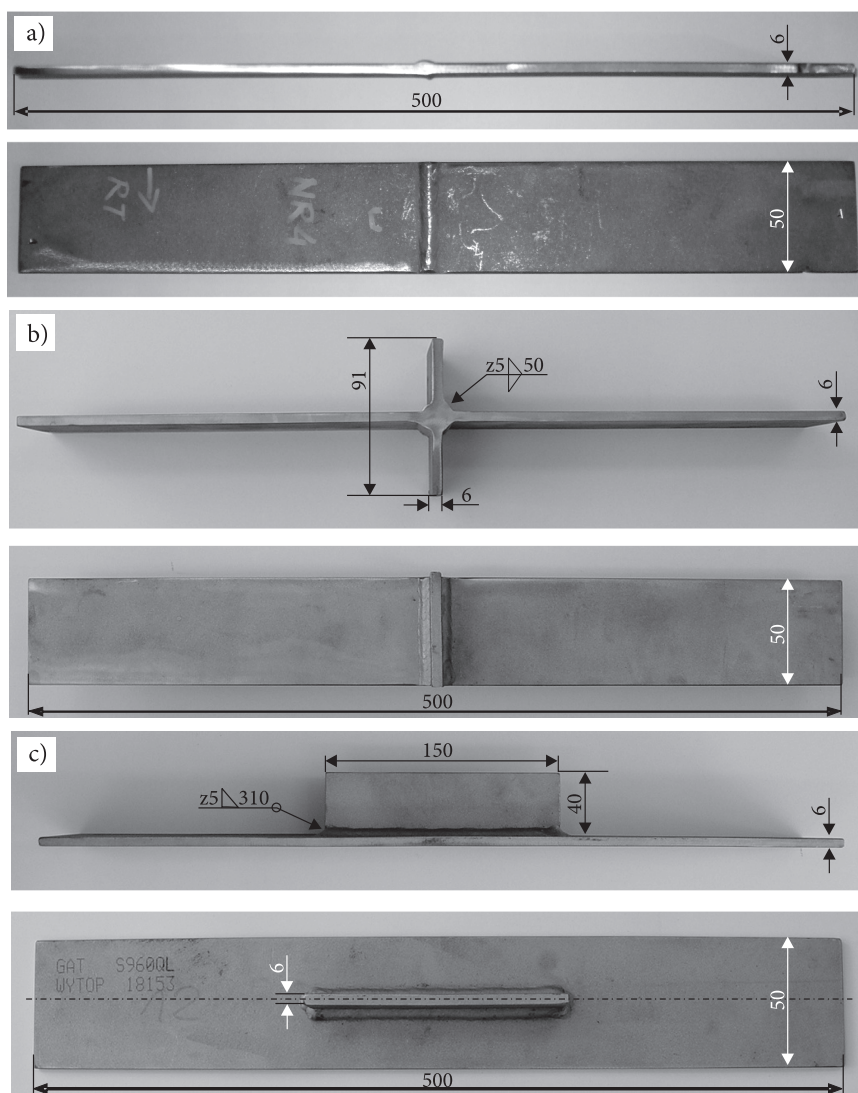
- czołowe,
- krzyżowe (z zębem poprzecznym),
- z zębem podłużnym.

Złącza spawane wykonano metodą MAG, stosując drut spawalniczy X90-IG o składzie chemicznym przedstawionym w tabeli 3.

TABELA 3

Skład chemiczny drutu spawalniczego X90-IG

Skład chemiczny [wagowo %]					
C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
0,1	0,8	1,8	0,35	0,60	2,3



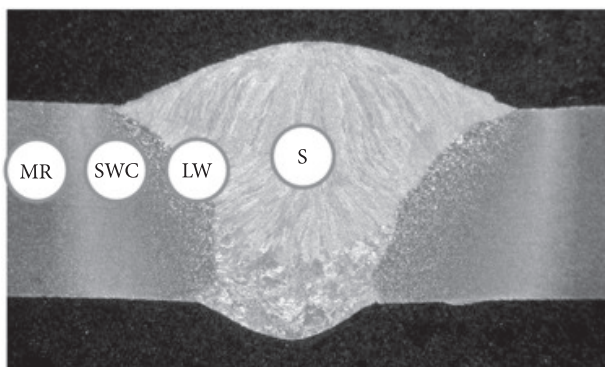
Rys. 2. Wymiary próbek zastosowanych do badań doświadczalnych trwałości zmęczeniowej: próbka ze złączem doczołowym (a); próbka z żebrem poprzecznym (b); próbka z żebrem podłużnym (c)

Po zabiegu spawania próbki zostały poddane badaniom radiograficznym w Laboratorium Badawczo-Metrologicznym Zakładów Mechanicznych „BUMAR-ŁABĘDY” SA zgodnie z normą PN-EN 1435:2001, podczas których stwierdzono spełnienie wymagań jakościowych złączy dla poziomu jakości B wg PN-EN 25817.

### 3. Badania struktury połączeń spawanych

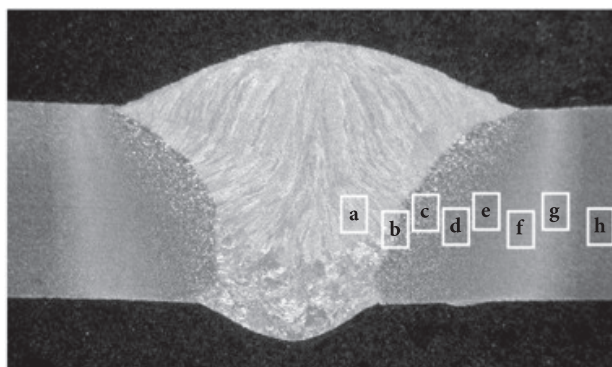
Strukturę materiału w obrębie złączy spawanych obserwowano za pomocą mikroskopu świetlnego OLYMPUS SXZ9. Badania mikroskopowe zglądów metalograficznych wykazały, że stal S960QL jest stałą drobnoziarnistą o iglastej strukturze bainitycznej. Taka struktura wynika z obróbki cieplno-mechanicznej przeprowadzonej w hucie podczas procesu produkcyjnego. Szczegółowe warunki tego procesu nie są udostępniane przez producenta.

Przekrój poprzeczny połączenia czołowego wybranej próbki przeznaczonej do badań wytrzymałościowych przedstawiono na rysunku 3. Na zglądzie spoiny oznaczono poszczególne strefy złącza spawanego, do których zalicza się: spoinę (S) oddzieloną linią wtopu (LW) od strefy wpływu ciepła (SWC) oraz materiał rodzimy (MR).



Rys. 3. Przekrój poprzeczny złącza doczołowego: spoina (S); linia wtopu (LW); strefa wpływu ciepła (SWC); materiał rodzimy (MR)

Spoina ma budowę krystaliczną materiału lanego z krystalitami ułożonymi zgodnie z kierunkiem odprowadzania ciepła. Sąsiadująca ze spoiną strefa wpływu ciepła charakteryzuje się zmienną mikrostrukturą z towarzyszącym jej rozrostem ziarna, co wywiera istotny wpływ na zróżnicowanie właściwości mechanicznych w złączu. Zmiany struktury SWC są wynikiem przemian fazowych, przemian alotropowych oraz odkształcenia sieci krystalicznej. Procesy te mogą zachodzić pojedynczo lub jednocześnie, zależnie od właściwości fizykochemicznych metalu. W metalach, w których zachodzą przemiany alotropowe lub które podlegają przemianom fazowym, SWC charakteryzuje się bardzo złożoną budową, w której wyróżnia się kilka obszarów o zróżnicowanej mikrostrukturze i właściwościach. Taki typ SWC występuje np. w złączach spawanych ze stali niskostopowych lub niestopowych. Podział SWC na poszczególne obszary jest umowny, gdyż zmiany struktury wykazują płynne zróżnicowanie. Obserwowaną różnorodność struktur badanego połączenia w obszarach a-h zaznaczonych na rysunku 4 zilustrowano na rysunku 5.

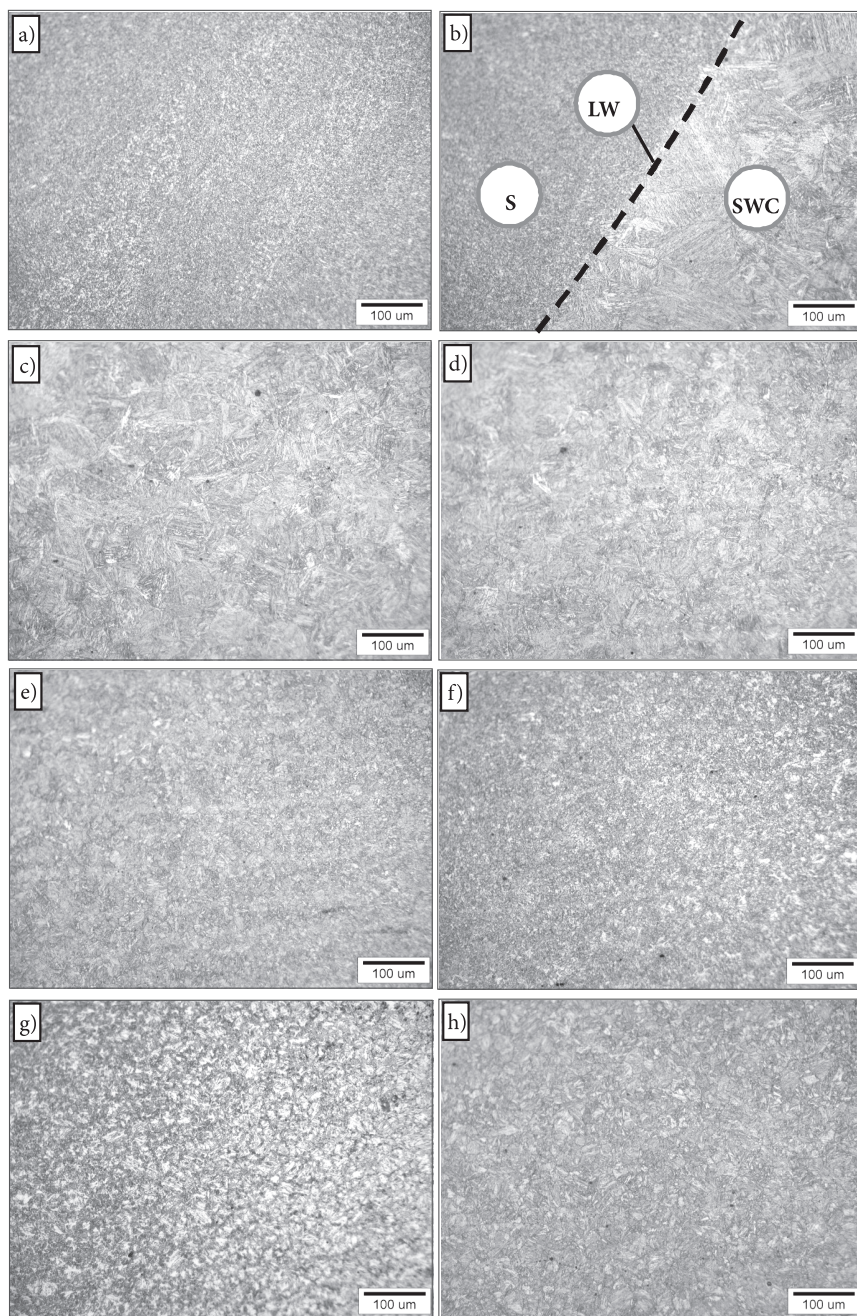


Rys. 4. Obszary zróżnicowanych struktur połączenia spawanego stali S960QL

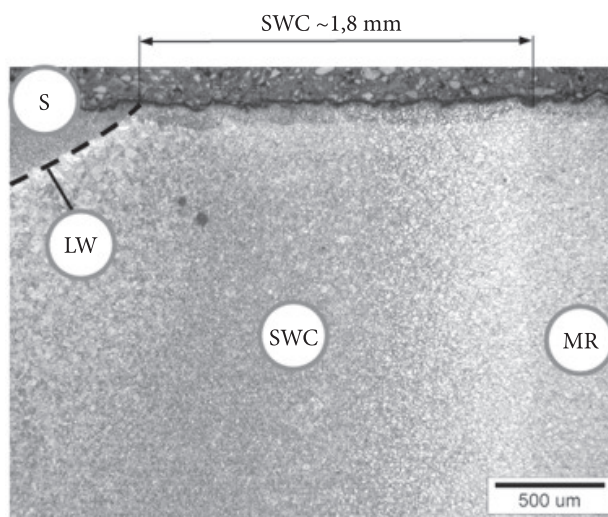
Struktura spoiny ma charakter lany, dendrytyczny, powstały jako efekt krystalizacji ciekłego jeziora (rys. 5a). Szczególna różnorodność struktury charakteryzuje strefę wpływu ciepła. W bezpośredniej styczności z linią wtopu występuje gruboziarnista struktura bainityczna (rys. 5b). Fotografie na rysunku 5c-g przedstawiają charakterystyczne dla stali niskostopowych i niestopowych struktury właściwe dla obszarów: przegrzania (rys. 5c-d), normalizacji (rys. 5e) i niepełnej normalizacji z miejscami widocznym rozrostem ziarna (rys. 5f) oraz rekrytalizacji bez oznak rozrostu ziaren (rys. 5g). Nie stwierdzono natomiast zmian struktury w materiale rodzimym obejmującym tę część połączenia, w której podczas spawania temperatura nie przekroczyła 500°C. Materiał ten cechuje drobnoziarnista struktura bainityczna (rys. 5h).

Obserwacje mikroskopowe wykazały, że wszystkie wykonane spoiny charakteryzują się poprawnym kształtem, głębokością wtopienia oraz liniami wtopienia bez widocznych przyklejeń. Nie stwierdzono także obecności obcych wtrąceń. Na uwagę zasługuje znaczna szerokość strefy wpływu ciepła, która w zależności od typu złącza wynosi od 1,5 do 5 mm (rys. 6).





Rys. 5. Struktura złącza doczołowego: spoina (a); linia wtopienia (b); strefa wpływu ciepła (c-g); materiał rodzimy (h)



Rys. 6. Strefa wpływu ciepła w próbce ze spoiną czołową

#### 4. Mikrotwardość połączeń spawanych

Pomiar mikrotwardości na powierzchniach zglądów metalograficznych wykonano przy użyciu mikrotwardościomierza Leitz Wetzlar 8375. Próby przeprowadzono metodą Vickersa przy obciążeniu wgłębnika 100 G, rozmieszczając punkty pomiarowe w rejonie złącza zgodnie z normą [6].

Wyniki pomiarów dla materiału rodzimego w obszarze strefy wpływu ciepła oraz w spoinie złącza krzyżowego zamieszczono w tabeli 4.

TABELA 4

Wartości średnie mikrotwardości HV 0,1

Materiał rodzimy	Strefa wpływu ciepła	Spoina
300	355	362

Twardość materiału rodzimego sięgająca 300 HV<sub>0,1</sub> może wpływać na ograniczoną spawalność. W strefie wpływu ciepła oraz w spoinie stwierdzono wzrost twardości odpowiednio do 355 i 362 HV<sub>0,1</sub>. Jednak podczas makroskopowych i mikroskopowych obserwacji struktury złączy nie stwierdzono obecności wad w postaci pęknięć.

#### 5. Analiza teoretyczna trwałości zmęczeniowej

Przed przystąpieniem do badań doświadczalnych trwałości zmęczeniowej przeprowadzono obszerną analizę teoretyczną połączeń spawanych. Założono, że



w dnie karbu spawalniczego, nawet przy naprężeniach nominalnych (poza karbem) mniejszych od granicy plastyczności, może wystąpić uplastycznienie materiału.

Korzystając z zależności do obliczeń zmęczeniowych według kryterium odkształceniowego przedstawionego w pracy [7], trwałość zmęczeniową konstrukcji spawanej, wyrażoną liczbą cykli do zniszczenia  $N_f$ , można oszacować za pomocą równania (1):

$$N_f = \left[ \frac{\ln\left(\frac{100}{100-Z}\right)}{\gamma_{Ff} \cdot \gamma_{Mf} \cdot \Delta\epsilon_k - \frac{1,1R_m}{E}} - \frac{1+R}{2(1-R)} \right]^{\frac{1}{m}}, \quad (1)$$

gdzie:  $N_f$  — liczba cykli obciążeń do zniszczenia próbki;  
 $\gamma_{Ff} \gamma_{Mf}$  — częściowe współczynniki bezpieczeństwa, przyjmując za [8]:  
 $\gamma_{Ff} = 1,5$  — uwzględnia stopień dokładności wzorów określających wartości odkształceń oraz niepewność modelu teoretycznego w zakresie obliczeniowej trwałości konstrukcji aż do inicjacji pęknięcia,  
 $\gamma_{Mf} = 1,35$  — uwzględnia możliwość kontroli i dostępność głównych węzłów konstrukcji oraz sposób konserwacji [7];  
 $\Delta\epsilon_k$  — zakres odkształceń podczas cyklicznego obciążenia;  
 $R_m$  — granica wytrzymałości na rozciąganie;  
 $E$  — moduł Younga;  
 $R$  — współczynnik asymetrii cyklu;  
 $m$  — wykładnik materiałowy (dla stali S960QL równy 0,6);  
 $Z = 47\%$  — przewężenie.

Zgodnie z zaleceniami podanymi przez Machutowa w [9], dla stali o  $R_m \leq 1200$  MPa i  $Z > 30\%$  zamiast przewężenia  $Z$  wprowadzono wielkość  $Z^x = \frac{Z}{2} + 15$ .

Wyniki obliczeń trwałości zmęczeniowej przeprowadzone z wykorzystaniem zależności (1) istotnie odbiegają od wyników badań doświadczalnych. Zależność ta została opracowana i zweryfikowana dla elementów spawanych wykonanych ze stali węglowej konstrukcyjnej. W celu lepszego dopasowania wzoru (1) do właściwości stali S960QL mającej wysoką wytrzymałość, wprowadzono współczynnik poprawkowy  $\eta$ , uwzględniający niemal dwukrotną różnicę między granicami wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  stali konstrukcyjnej i stali wysokowytrzymałej. Po modyfikacji wzór przedstawia się następująco:

$$N_f = \left[ \frac{\ln\left(\frac{100}{100 - Z^x}\right)}{\gamma_{Ff} \cdot \gamma_{Mf} \cdot \Delta\epsilon_k - \frac{1,1R_m}{\eta \cdot E}} - \frac{1+R}{2(1-R)} \right]^{\frac{1}{m}}, \quad (2)$$

gdzie:  $\frac{1}{\eta} = 0,6$ .

Zakres odkształceń  $\Delta\epsilon_k$  opisujemy następującą zależnością:

$$\Delta\epsilon_k = \frac{\alpha_\epsilon \cdot \Delta\sigma_N}{E}, \quad (3)$$

gdzie:  $\alpha_\epsilon$  — współczynnik spiętrzenia odkształcenia;  
 $\Delta\sigma_N$  — zakres naprężeń nominalnych przy odkształceniach cyklicznych.

Poprzez modyfikację zależności podanej przez Machutowa i uwzględnienie w niej asymetrii cyklu obciążenia można otrzymać zależność opisującą wartość współczynnika spiętrzenia odkształcenia  $\alpha_\epsilon$ :

$$\alpha_\epsilon = \alpha_k^{2/(1+n')} \cdot \overline{\Delta\sigma_N}^{(1-n')/(1+n')}, \quad (4)$$

gdzie:  $\alpha_k$  — współczynnik kształtu (teoretyczny współczynnik spiętrzenia naprężeń),  
 $n'$  — wykładnik cyklicznego umocnienia (dla stali S960QL:  $n' = 0,05$  — na podstawie niepublikowanych badań P. Mareckiego),

$$\overline{\Delta\sigma_N} = \frac{\Delta\sigma_N}{(1-R) \cdot R_e}.$$

Ponieważ znajomość wartości współczynnika  $\alpha_k$  jest niezbędna do określenia wartości współczynnika spiętrzenia odkształcenia  $\alpha_\epsilon$ , dla wybranych modelowych węzłów spawanych przeprowadzono analizę ich geometrii.

Wartości współczynników kształtu  $\alpha_k$  dla spoiny doczołowej i krzyżowej zostały określone trzema metodami analitycznymi: Jewdokimowa, Lawrance'a oraz Ushirokawy i Nakayamy [7]. Natomiast w celu wyznaczenia współczynnika  $\alpha_k$  dla żebra podłużnego przeprowadzono własną analizę teoretyczną na podstawie rozważań przedstawionych w publikacji [7]. Ponieważ  $\alpha_k$  jest uzależniony od spiętrzenia naprężeń geometrycznych oraz kształtu samej spoiny, to możemy go opisać zależnością:

$$\alpha_k = \alpha_{KG} \cdot \alpha_{KS}, \quad (5)$$

gdzie:  $\alpha_{KG}$  — geometryczny współczynnik spiętrzenia naprężeń;  
 $\alpha_{KS}$  — współczynnik spiętrzenia naprężeń związanych z kształtem samej spoiny.

Współczynnik  $\alpha_{KS}$  wyznaczono metodą Lawrance'a, więc konieczne było tylko określenie współczynnika spiętrzenia naprężeń geometrycznych  $\alpha_{KG}$ . W rozważaniach wzięto pod uwagę szerokość blachy usztywnianej (rozstaw żeber), długość żebra oraz sposób zakończenia spoin pachwinowych. Pominięto natomiast wpływ szerokość samej spoiny, uznając go za mało istotny.

Wartości współczynników  $\alpha_k$  dla różnych rodzajów złączy, wyznaczonych wymienionymi metodami, zestawiono w tabeli 5.

TABELA 5

Wartości współczynnika kształtu  $\alpha_k$ 

Metoda analityczna	Rodzaj złącza		
	Czołowe	Krzyżowe	Żebro podłużne
Jewdokimowa	1,94	2,39	–
Lawrance'a	1,55	1,14	–
Ushirokawy i Nakayamy	1,62	1,79	–
Analiza własna	–	–	1,74
Wartość średnia	1,70	1,77	1,74

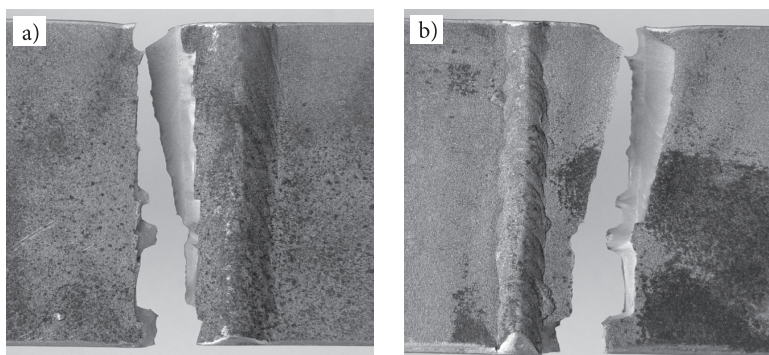
Ostatecznie zależność (1), po podstawieniu niezmiennych parametrów do równania (2), przyjmuje postać:

$$N_f = \left[ \frac{0,49}{2,025 \cdot \Delta \varepsilon_k - 3,7 \cdot 10^{-3}} - 0,51 \right]^{1,67} \quad (6)$$

## 6. Wyniki badań doświadczalnych trwałości zmęczeniowej

Badania trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych stali S960QL w warunkach osiowego rozciągania przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej INSTRON 8802. Badania wykonano przy maksymalnych wartościach naprężeń nominalnych  $\sigma_{nmax} = 450, 530, 615$  MPa i współczynniku asymetrii cyklu  $R = 0,01$  oraz częstotliwości zmian obciążenia  $f = 2$  Hz. Jako kryterium trwałości zmęczeniowej przyjęto liczbę cykli zmian obciążenia do dekohezji badanego elementu (rys. 7).

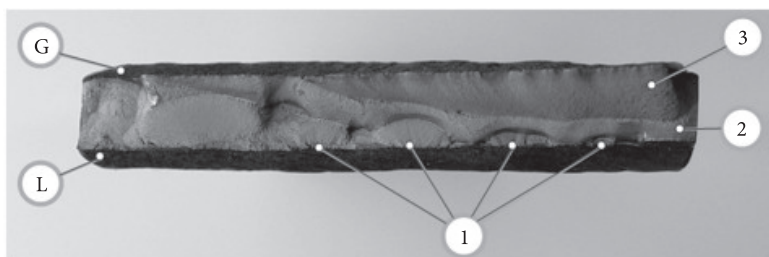
Powierzchnia przełomów elementów poddanych zmiennemu obciążeniu zawiera bogaty zbiór informacji o przebiegu pęknięcia. Przełomy badanych próbek ze spoinami przebiegają makroskopowo prostopadle do kierunku największych wydłużeń i nie



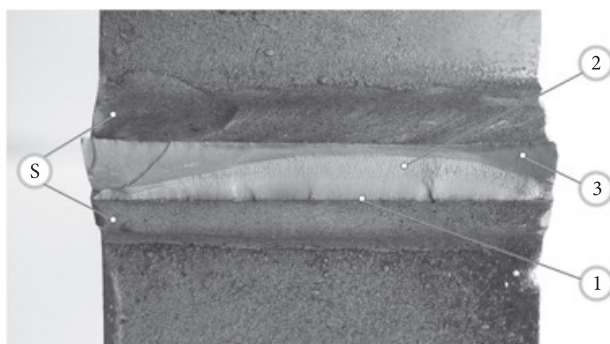
Rys. 7. Próbkę ze spoiną czołową po badaniach zmęczeniowych przy  $\sigma_{max} = 615$  MPa: widok od strony lica (a) i od strony grani (b)

wykazują makroskopowych odkształceń plastycznych. We wszystkich przypadkach próbek ze złączem doczołowym (rys. 8) liczne źródła zmęczeniowego pęknięcia (1) zlokalizowane były na powierzchni elementu w linii przejścia lica spoiny do materiału spawanego, skąd następował sukcesywny rozwój pęknięcia. Powstałe w ten sposób powierzchnie przełomu nie leżą w jednej płaszczyźnie. W wyniku ich połączenia powstały wyraźne uskoki ogniskowe. Odzworowują one zatrzymanie pęknięcia lub zmniejszenie prędkości pęknięcia związane ze zmieniającymi się warunkami obciążenia. W miarę wzrostu liczby cykli pęknięcia rozprzestrzeniają się sukcesywnie, tworząc strefę zmęczeniową (2). Postępujący rozwój pęknięcia powoduje dalsze osłabienie przekroju próbki, co doprowadziło do gwałtownego jej zniszczenia. Ta szybko zniszczona końcowa część przełomu stanowi strefę resztkową (3).

W złączy krzyżowym (rys. 9) źródło zmęczeniowego pęknięcia (1) zlokalizowane było również na granicy spoiny i materiału rodzimego, a pęknięcie rozwijało się w kierunku spoiny przeciwległej. Na przełomie próbki można zaobserwować charakterystyczny matowy obszar strefy zmęczeniowej (2) oraz gładką strefę resztkową (3).

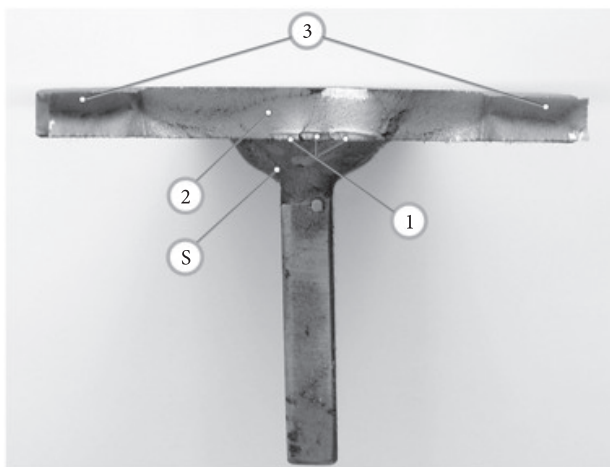


Rys. 8. Powierzchnia przełomu zmęczeniowego próbki ze złączem doczołowym badanej przy  $\sigma_{max} = 530$  MPa: lico spoiny (L); grani spoiny (G) oraz kolejne obszary pęknięcia; źródła zmęczeniowego pęknięcia (1), strefa zmęczeniowa (2), strefa resztkowa (3)



Rys. 9. Powierzchnia przełomu zmęczeniowego próbki ze złączem krzyżowym badanej przy  $\sigma_{Hmax} = 615$  MPa: spoina (S) oraz kolejne obszary pęknięcia; źródło zmęczeniowego pęknięcia (1), strefa zmęczeniowa (2), strefa resztkowa (3)

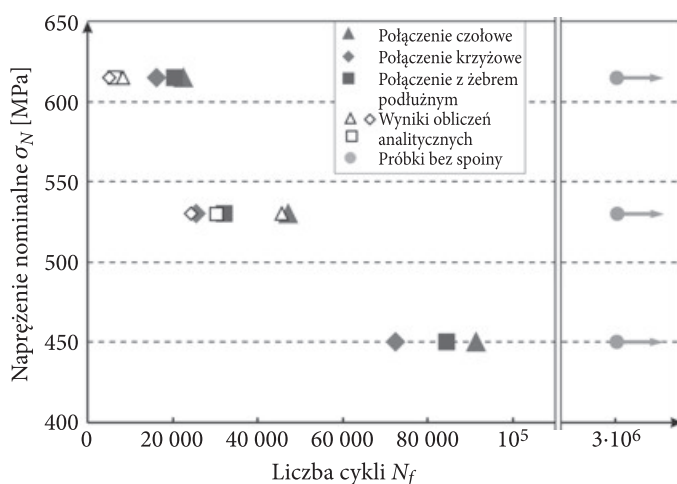
W elementach z zębem wzdłużnym (rys. 10) inicjacja pęknięcia miała miejsce w strefie zakończenia spoiny pachwinowej podłużnej (1). Pęknięcie propagowało od spoiny w kierunku krawędzi próbki, tworząc strefę zmęczeniową (2). Końcowemu etapowi pęknięcia towarzyszą zauważalne wgłębienia wynikające z odkształceń plastycznych w strefie resztkowej (3), w bezpośrednim sąsiedztwie krawędzi próbki.



Rys. 10. Powierzchnia przełomu zmęczeniowego próbki z zębem podłużnym badanej przy  $\sigma_{Hmax} = 615$  MPa: spoina (S) oraz kolejne obszary pęknięcia; źródło zmęczeniowego pęknięcia (1), strefa zmęczeniowa (2), strefa resztkowa (3)

Wyniki badań doświadczalnych trwałości zmęczeniowej rozpatrywanych połączeń spawanych przedstawiono na wykresie (rys. 11). Umieszczono na nim także wartości trwałości zmęczeniowej uzyskane z analizy teoretycznej, przeprowadzonej w oparciu o zależność (6). Nie umieszczono natomiast wyników analizy teoretycznej





Rys. 11. Wyniki badań trwałości zmęczeniowej połączeń spawanych ze stali S960QL

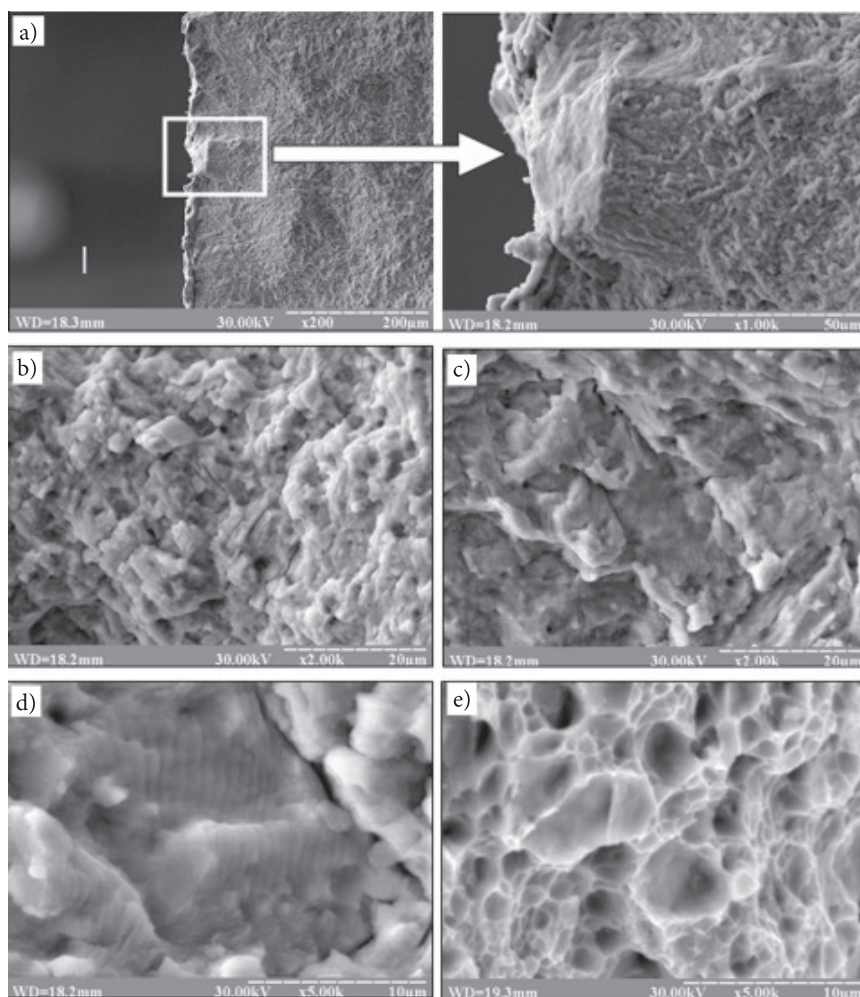
dla poziomu  $\sigma_{\max} = 450$  MPa, gdyż zastosowany model obliczeniowy daje bezpieczne oszacowanie trwałości zmęczeniowej dla poziomów naprężeń  $\sigma_{\max} \geq 530$  MPa. Badaniom trwałości zmęczeniowej na założonych trzech poziomach naprężeń nominalnych poddano także próbki bez spoin.

Największą trwałość zmęczeniową w warunkach osiowego rozciągania wykazało połączenie czołowe, a najmniejszą złącze krzyżowe. Próbki bez spoin przekroczyły przyjętą bazową liczbę cykli  $3 \cdot 10^6$  na wszystkich trzech poziomach stanu naprężenia.

## 7. Badania mikrobudowy powierzchni przełomów zmęczeniowych

Badania fraktograficzne pozwalają na określenie m.in. przyczyn zmęczeniowego pęknięcia typu eksploatacyjnego, konstrukcyjnego i technologicznego. Przez połączenie wyników badań makrofraktograficznych i mikrofraktograficznych możliwe jest również przybliżone odtworzenie historii obciążenia zniszczonego elementu. Mechanizm rozwoju pęknięć zmęczeniowych prześledzono za pomocą mikroskopu skaningowego na drodze analizy mikrobudowy powierzchni przełomu złącza doczołowego próbki badanej przy  $\sigma_{\max} = 530$  MPa. Analizując mikrobudowę powierzchni przełomów zmęczeniowych, zauważono charakterystyczny kierunek propagacji pęknięcia – rozwijało się ono od źródeł pęknięcia zmęczeniowego na granicy lica spoiny z blachą w kierunku grani. Pęknięcia propagowały od wad powierzchniowych w postaci lokalnego podtopienia powstałego podczas procesu spawania (rys. 12a). Początkowy etap pęknięcia cechuje niezbyt rozbudowana morfologia powierzchni przełomu posiadająca cechy pęknięcia plastycznego (rys. 12b). Na rysunku 12c przedstawiono obszary typowe

dla drugiego etapu pęknięcia, czyli rozwoju pęknięcia w stanie ustalonym. Wyraźnie widoczne są prążki charakterystyczne dla materiałów plastycznych zmęczeniowych (rys. 12d). Dalszy ustalony rozwój pęknięcia charakteryzuje się obecnością lokalnych pasm słabo zaznaczonych prążków zmęczeniowych. Ostatni etap zmęczenia materiału, czyli gwałtownie zachodzące pęknięcie w strefie resztkowej, przebiegło z tworzeniem się na powierzchni przełomu typowego złomu plastycznego z charakterystycznymi wgłębieniami (dołczkami) (rys. 12e).



Rys. 12. Mikrobudowa powierzchni przełomu złącza doczołowego próbki badanej przy  $\sigma_{\max} = 530$  MPa (opis w tekście)

## 8. Podsumowanie

Analizowana stal S960QL posiada doskonałe właściwości mechaniczne, dzięki czemu idealnie nadaje się na wysokowytrzymałe konstrukcje pracujące pod dużymi obciążeniami. Jednak o trwałości konstrukcji nie świadczą wyłącznie właściwości stosowanych materiałów, ale zdolność do przenoszenia obciążeń przez węzły, w których występują różnego rodzaju karby i ma miejsce spiętrzenie naprężeń. Jest to bardzo istotne, ponieważ obecność połączeń spawanych może nawet o 30% obniżyć wytrzymałość konstrukcji, co więcej uszkodzenie konstrukcji może być trudne do przewidzenia i przebiegać w sposób gwałtowny. To z kolei może powodować zagrożenie dla życia lub zdrowia ludzkiego oraz duże straty materialne.

Badany materiał charakteryzuje się drobnoziarnistą strukturą bainityczną o teksturze wskazującej na obróbkę cieplno-mechaniczną. Ponieważ badana stal charakteryzuje się wysokimi parametrami wytrzymałościowymi, odkształceniowy model obliczeniowy trwałości zmęczeniowej opracowany dla stali konstrukcyjnych został nieznacznie zmodyfikowany w celu dostosowania go do tych parametrów. W wyniku realizacji przyjętego programu badań dokonano analizy trwałości zmęczeniowej trzech rodzajów węzłów spawanych ze stali S960QL: złącza doczołowego, krzyżowego oraz w kształcie żebra wzdłużnego. Wyniki badań doświadczalnych udowodniły, iż największą trwałością cechuje się złącze doczołowe, a najmniejszą złącze krzyżowe. Można zatem stwierdzić, że na trwałość zmęczeniową złączy spawanych wykonanych z tego samego materiału największy wpływ ma ilość występujących w danym rodzaju złącza spoin. Bezpieczne oszacowanie trwałości zmęczeniowej uzyskano dla naprężeń nominalnych powyżej  $\sigma_{\text{max}} = 530$  MPa. Zastosowany w pracy teoretyczny model obliczeniowy dobrze koresponduje z wynikami doświadczeń.

Uzyskane wyniki otwierają kierunki dalszych badań mających na celu dostosowanie modelu analitycznego pozwalającego na bezpieczne wyznaczenie trwałości zmęczeniowej elementów spawanych ze stali wysokowytrzymałych.

Artykuł wpłynął do redakcji 22.03.2012 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w październiku 2012 r.

### LITERATURA

- [1] Cz. GOSS, P. MARECKI, F. KUCZMARSKI, *Niskocyklowa wytrzymałość zmęczeniowa stali Weldox 900*, *Górnictwo Odkrywkowe*, 49, 3-4, 2007, 63-65.
- [2] *Hochfeste Stäle N-A-XTRA® und XABO®. Verarbeitungsempfehlungen*, Ausgabe 09/2010, Materiały informacyjne firmy ThyssenKrupp Steel Europe ze strony [www.thyssenkrupp-steel-europe.com](http://www.thyssenkrupp-steel-europe.com).
- [3] M. LACHOWICZ, W. NOSKO, *Spawanie stali konstrukcyjnej Weldox 700*, *Przegląd Spawalnictwa*, 1, 2010, 13-18.
- [4] K. MAZANEK, *Badania trwałości zmęczeniowej węzłów spawanych ze stali S960QL*, praca dyploma, Politechnika Warszawska, Warszawa, 2009.

- [5] *Material specification 245*, December 2005, Materiały informacyjne firmy ThyssenKrupp Steel Europe ze strony [www.thyssenkrupp-steel-europe.com](http://www.thyssenkrupp-steel-europe.com).
- [6] PN-EN ISO 9015-2:2011 *Badania niszczące połączeń spawanych — Badanie twardości, Część 2. Badanie mikrotwardości złączy spawanych łukowo*
- [7] Cz. GOSS, S. KŁYSZ, W. WOJNOWSKI, *Problemy niskocyklowej trwałości zmęczeniowej wybranych stali i połączeń spawanych*, Wydawnictwo Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych, Warszawa, 2004.
- [8] M. ŁUBIŃSKI, *Wpływ połączeń spawanych na niskocyklową wytrzymałość zmęczeniową konstrukcji stalowych*, Kraków, 1995.
- [9] N.A. MACHUTOV, A.P. GUSIENKOW, M.M. GALENIN, *Rasczjoty prochnosti elementow konstrukcij pri malocyklowom nagruzhennii. Metodicheskie ukazania*, Moskwa, 1987.

K. MAZANEK, L. ŚNIEŻEK, T. ŚLĘZAK

### **Fatigue research of welded joints of high strength S960QL steel**

**Abstract.** This paper presents the results of experimental and theoretical research of the low-cycle fatigue strength of welded joints. There was investigated S960QL steel used on steel welded structures. Butt and cruciform joints and joints with a longitudinal rib were chosen for fatigue testing. Fatigue life is the highest in case of the butt joints and it is the lowest for the cruciform. Analytical model corresponds well to experimental results. In addition, the used model makes it possible to estimate safely fatigue life under nominal stresses being above 530MPa.

**Keywords:** mechanical engineering and machinery maintenance, welded joints, fatigue limit, S960QL steel

