
Stanovenie únavovej pevnosti zvarových spojov ocele S960MC zváraných laserovým lúčom

Martin Frátrik, Ing.*

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: martin.fratrik@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2771

Miloš Mičian, doc. Ing., PhD.

Katedra technologického inžinierstva, Strojnícka fakulta,
Žilinská univerzita v Žiline,
Univerzitná 1, 010 26 Žilina.
E-mail: milos.mician@fstroj.uniza.sk, Tel.: + 421 41 513 2768

Determination of fatigue strength of S960MC laser welded joints

Abstract: The work deals with determining the fatigue strength of butt-welded joints of S960MC steel. The fatigue strength of two versions of laser beam welded joints as well as the base material was assessed. To reduce the notch effect of the weld beam, the assessed weld joints were produced in a variety of methods utilizing filler material and additional dressing of the weld beam. The measurements determined variations in each type. The value of the fatigue strength decreased by 50 % to 67 % with respect to the base material, indicating that the notch effect of the weld joint had an impact on the value of the fatigue limit. Despite having relatively low fatigue strengths, both values meet normative standards and can be used in practical circumstances.

Keywords: S960MC; fatigue strength; laser beam welding.

ÚVOD

Nezanedbateľný podiel zváraných konštrukcií z HSLA ocelí je počas svojej životnosti vystavený dynamickému namáhaniu. Poruchy spôsobené únavou vo zváraných konštrukciách sú aj preto naďalej témou, ktorá si zasluhuje pozornosť odbornej verejnosti vzhľadom k ich príspevku k priemyselným haváriám, k stratám na životoch a značným finančným nákladom spôsobených opravami poškodených konštrukcií. Únava je stále hlavnou príčinou porúch zváraných konštrukcií v ocelových mostoch, lodných konštrukciách a v dopravných prostriedkoch. Z tohto dôvodu je nevyhnutné navrhovať zvárané konštrukcie s cieľom zvýšiť únavovú životnosť, pričom metódy navrhovania musia byť spojené s požiadavkami na kvalitu, ktoré bude možné sledovať a riadiť počas výrobného procesu.

Ako je všeobecne známe, s cieľom znížiť hmotnosť zváraných konštrukcií je výber materiálu optimalizovaný výberom materiálu so zvýšenou medzou klzu, aby sa umožnilo vyššie namáhanie. Z praktických skúseností však vyplýva, že voľba vysokopevnej ocele nemá vo väčšej miere vplyv na celkovú únavovú životnosť zváraných konštrukcií. Aj z tohto dôvodu, súčasne smernice pre návrh cyklicky namáhaných zváraných konštrukcií, ako sú [1] a [2], nezohľadňujú vplyv medze klzu základného materiálu na medzu

únavy zvarového spoja. Konzervatívnym spôsobom sa predpokladá, že aj dobre vyrobené zvarové húsenice majú počiatkové trhliny.

Na základe poznatkov z teórie lomovej mechaniky je taktiež možné predpokladať, že všetky konštrukčné ocele budú vykazovať podobné správanie pri šírení trhlín. V prípade zvarových spojov je možné fázu iniciácie trhlín považovať za zanedbateľnú, čo vedie k rovnakému únavovému správaniu zvarových spojov nezávisle od triedy ocele základného materiálu. Protikladom k týmto tvrdeniam sú viaceré publikácie, ktoré potvrdili, že použitie vysokopevných materiálov môže viesť k zvýšeniu únavovej pevnosti zvarových spojov [3,4]. Takéto navýšenie je možné v praxi dosiahnuť iba predĺžením fázy iniciácie trhliny. Prakticky je to možné zabezpečiť výrobou vysokokvalitných zvarových spojov, ktoré zaisťujú hladký prechod medzi zvarom a základným materiálom a vylúčenie akýchkoľvek vážnych koncentrátorov napätia, ako sú zápaly, prevýšenia, póry alebo chyby natevenia. Spomenuté opatrenia sú obzvlášť dôležité pre zvarové spoje vyhotovené bez použitia prídavného materiálu (napr. laserové zváranie, zváranie elektrónovým lúčom), ktoré sú náchylnejšie na prítomnosť zápalov, pórov, prípadne neprievarov. Skúmaním zvyšovania únavovej životnosti laserových zvarových spojov HSLA ocelí sa zaoberali napríklad Fuštar et al.

[5] alebo Karakas et al. [6]. Tieto štúdie boli zamerané na zvýšenie únavovej životnosti predovšetkým prostredníctvom metódy HFMI (High Frequency Mechanical Impact). Okrem spomenutých metód existujú aj ďalšie perspektívne metódy na zvýšenie únavovej životnosti, ako napríklad dodatočné pretavenie povrchu zvarovej húsenice (tzv. dressing) laserovým lúčom, prípadne vyhotovenie zvarových spojov s použitím prídavného materiálu. Vzhľadom k nedostatočnému pokrytiu problematiky únavových vlastností laserom zváraných zvarových spojov sa daná práca bude zaoberať stanovením únavovej pevnosti daných zvarových spojov. Cieľom práce bude porovnanie únavovej pevnosti dvoch variant laserom zváraných zvarových spojov. Prvý posudzovaný variant bude vyhotovený zváraním bez použitia prídavného materiálu s dodatočným pretavením (tzv. dressingom). Druhý variant bude zváraný s použitím prídavného materiálu. Spôsob vyhotovenia oboch variantov je zvolený s cieľom minimalizovania možných koncentrátorov napätia vo zvarových spojoch. Výber zvolených variant spočíva v predpoklade stanovenia medze únavy na vzorkách s minimalizovaným vrubovým účinkom. Na základe toho je možné získať medzu únavy považovať za hornú medzu únavy pre daný typ zvarových spojov. Pri praktickej aplikácii je však nutné počítať s prítomnosťou chýb zvárania tvoriacich vrubový účinok. Preto je pri dielensky vyhotovených tupých zvarových spojoch možné predpokladať s nižšou hodnotou medze únavy ako je experimentálne stanovená medza únavy. Pre účely porovnávania bola únavová skúška vyhotovená aj na základnom materiáli.

1 MATERIÁLY A METÓDY

1.1 Základný materiál

Základným materiálom pre oba zvarové spoje bola nízkolegovaná vysokopevná konštrukčná oceľ S960MC vo forme plechu hrúbky 3 mm. Oceľ je v praxi používaná vo zváraných konštrukciách v automobilovom priemysle, v lodnom priemysle, pri výrobe žeriavov, ťažiarenských zariadení a pod. V tab. 1 je uvedené chemické zloženie ocele podľa inšpekčného certifikátu a v tab. 2 sú uvedené minimálne mechanické vlastnosti ocele deklarované výrobcom (SSAB AB, Švédsko).

Tab. 1. Chemické zloženie ocele S960MC (hm.%)

C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	V
0,085	0,18	1,06	0,01	0,003	0,036	0,002	0,007
Ti	Cu	Cr	Ni	Mo	N	B	
0,026	0,01	1,08	0,07	0,109	0,005	0,0015	

Tab. 1 Mechanické vlastnosti ocele S960MC.

$R_{p0,2}$	R_m	A_{min}	CET/CEV	KV -40°C
[MPa]	[MPa]	[%]		[J]
min. 960	980-1250	7	0,28/0,51	min. 27

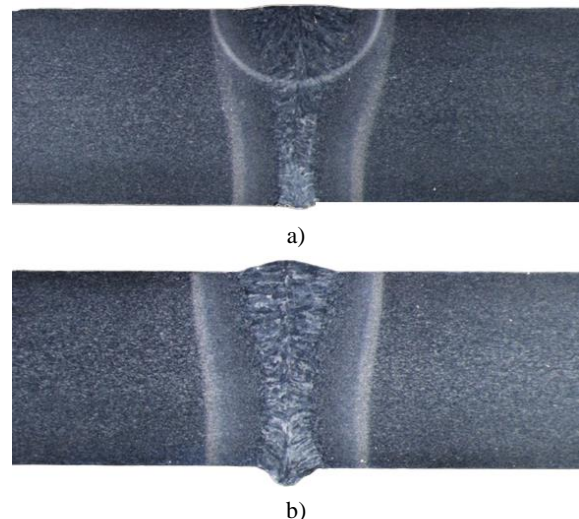
1.2 Experimentálne zvarové spoje

Oba zvarové spoje boli zvárané laserovým lúčom ako tupé I-zvarové spoje s nulovou reznou medzerou. Rozmery zváraných plechov boli 200 mm × 150 mm × 3 mm. Zvarové hrany boli pred zváraním dôkladne očistené a odmastené. Zvarový spoj zváraný s dodatočným pretavením (vz. 1) bol zváraný na dva prechody s časovým rozstupom cca 30 s. Pre zvarový spoj s použitím prídavného materiálu (vz.2) bol použitý prídavný materiál *Union X96* s priemerom $\phi 1$ mm klasifikovaný ako *G89 5 M21 Mn4Ni2.5CrMo* podľa *STN EN ISO 16834-A*. Rýchlosť podávania drôtu v danom variante bola $0,5 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Pre oba varianty bol ako ochranný plyn použitý argón 4.6 (podľa *STN EN ISO 14175*). V tab. 3 sú uvedené parametre zvárania použité pri vyhotovení experimentálnych zvarových spojoch.

Tab. 3. Parametre zvárania laserovým lúčom

Zvar	Výkon lasera [W]	Rýchlosť zvárania [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	Fokus [mm]	Prietok plynu [$\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$]	Tepelný príkon [$\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$]
vz.1	2000	20	-1,0	30	1,00
vz.1*	2000	20	+10,0	30	1,00
vz.2	2000	18	-1,0	30	1,11

* - parametre dodatočného pretavenia (dressingu).



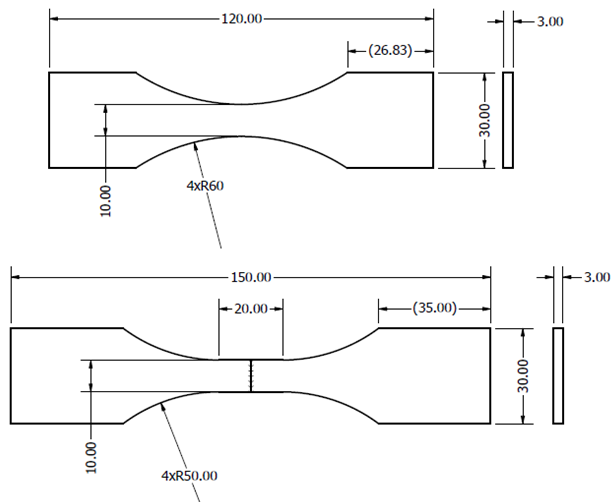
Obr. 1. Pričný rez experimentálnymi zvarovými spojmi: a) vz. 1; b) vz. 2

Na obr. 1 je možné pozorovať makroskopickú snímku vyhotovenú v priečnom reze zvarovými spojmi. Na základe uvedených snímok je možné posudzovať zvarové spoje považovať za vyhovujúce vzhľadom k

požiadavkám stanovených normou *STN EN ISO 13919-1* (stupeň kvality *B*).

1.3 Únavové skúšky zvarových spojov

Skúška bola vykonaná na plochých vzorkách (obr. 2). Vzorky boli delené vodným lúčom, pričom rezné hrany boli upravené brúsením a leštením, tak aby sa vylúčil vplyv nežiadúcich vrubov pochádzajúcich z delenia. Zvarové spoje a povrch vzoriek neboli žiadnym spôsobom mechanicky upravované s cieľom zachovať vplyv povrchu materiálu a zvarového spoja na únavovú pevnosť.



Obr. 2. Rozmery vzoriek použitých na únavové skúšky základného materiálu (hore) a zvarových spojov (dole)

Vzorky základného materiálu boli cyklicky namáhané na zariadení *INOVA FU-O-160-1600-V* (*Inova GmbH, SRN*). Vzorky boli striedavo symetricky zaťažované spôsobom ťah-tlak ($R = -1$) frekvenciou 30 Hz. Pre základný materiál boli zvolené hladiny zaťaženia 800; 700; 600; 500; 412,5; 400; 387,5; 350; 337,5; 325; 312,5; 300; 275 MPa. Vzorky boli cyklicky namáhané do momentu pretrhnutia, resp. do dosiahnutia počtu cyklov $N = 10^7$.

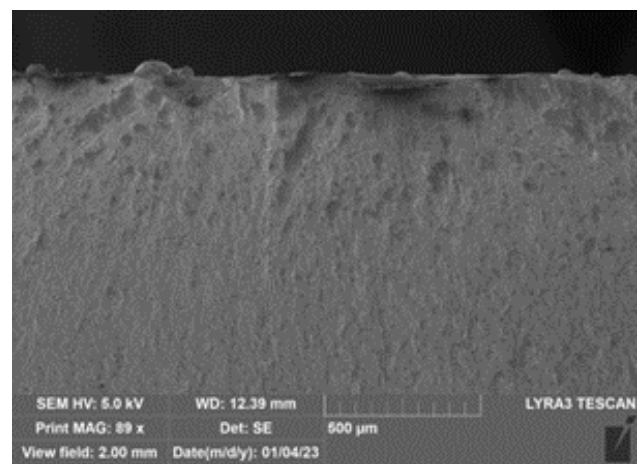
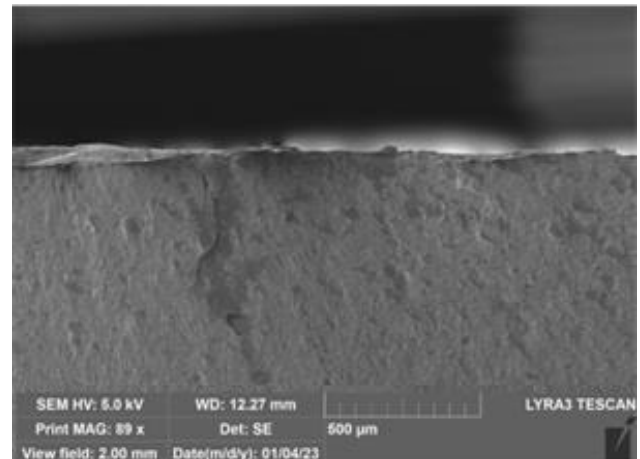
Vzorky zvarových spojov boli cyklicky namáhané na zariadení *MTS Acumen 12* (*MTS Systems Corporation, USA*). Vzorky boli striedavo symetricky zaťažované spôsobom ťah-tlak ($R = -1$) frekvenciou 20 Hz. Zvarové spoje boli zaťažované na hladinách 312,5; 300; 287,5; 275; 250; 225; 200; 187,5; 175; 150; 137,5; 125; 115 MPa do momentu pretrhnutia, resp. do dosiahnutia počtu cyklov $N = 10^7$.

Na základe nameraných dát bola stanovená medza únavy pre základný materiál a zvarové spoje. Medza únavy je definovaná zaťažovacím napätím, pri ktorom počet cyklov do pretrhnutia prevyšuje hodnotu 10^7 . V prípade dosiahnutia takejto hodnoty bol pri danom zaťažení zopakovaný cyklus za účelom potvrdenia hodnoty medze únavy.

Na základe nameraných dát bola stanovená únavová pevnosť pre základný materiál na úrovni

$\sigma_c = 350$ MPa, pre zvarový spoj vz. 1 na úrovni $\sigma_c = 175$ MPa a pre zvarový spoj vz. 2 na úrovni $\sigma_c = 115$ MPa.

Po pretrhnutí boli na vybraných vzorkách urobené *SEM* snímky lomových plôch. Účelom snímok bolo lokalizovanie iniciácie únavovej trhliny. Na obr. 3 sú zobrazené *SEM* snímky lomových plôch vzoriek zvarových spojov, ktoré vo všetkých prípadoch preukázali umiestnenie iniciácie trhliny ku koreňu zvaru.



Obr. 3. Snímky lomových plôch zvarových spojov po únavovej skúške: a) vz. 1 b) vz. 2

2 DISKUSIA K VÝSLEDKOM

Analýza únavových vlastností vybraných zvarových spojov ocele *S960MC* preukázala výrazný pokles únavovej pevnosti voči základnému materiálu. Hodnota medze únavy základného materiálu meraná na plochých vzorkách bez mechanickej úpravy povrchu dosiahla hodnotu 350 MPa. Táto hodnota predstavuje približne 30 % z hodnoty medze pevnosti základného materiálu. Na zvarovom spoji vz. 1 bola nameraná medza únavy na úrovni 175 MPa. V prípade variantu vz. 2 bola stanovená medza únavy na úrovni 115 MPa. Na všetkých vzorkách, u ktorých počas cyklického namáhania došlo k dolomeniu bol počiatok únavovej trhliny lokalizovaný do oblasti koreňa zvarového spoja.

Namerané hodnoty sú vzhľadom na mechanické vlastnosti základného materiálu a mechanické vlastnosti staticky namáhaných zvarových spojov výrazne nižšie. Danú skutočnosť je potrebné zohľadniť pri konštrukčnom návrhu dynamicky zaťažovaných zvarovaných konštrukcií z ocele S960MC. Vzhľadom k nameraným hodnotám medze únavy sa v prípade aplikácie odporúča preferovať variant s dodatočným pretavením lícnej strany zvarového spoja, t. j. vz. 1. Zároveň je možné predpokladať, že medza únavy zvarového spoja bez prídavného materiálu, resp. dodatočného pretavenia by dosiahla výrazne nižších hodnôt ako boli namerané v danom experimente.

Z hľadiska normatívnych požiadaviek je možné namerané hodnoty medze únavy posudzovať podľa dokumentu EN 1993-1-9 Eurocode 3: Konštrukcia oceľových konštrukcií - Časť 1-9: Únava [2]. V danom dokumente sú na základe praktických skúseností a experimentálnych meraní stanovené dolné hranice medze únavy na hodnote $2 \cdot 10^6$ cyklov. Pre základný materiál vo forme valcovaného plechu bez povrchovej úpravy, ktorý zodpovedal experimentálnym podmienkam je spodná hranica stanovená na 140 MPa. Experimentom bola táto hodnota stanovená na 450 MPa. V prípade tupých zvarových spojov zvarovaných jedným prechodom z jednej strany je spodná hodnota medze únavy zodpovedajúca $2 \cdot 10^6$ cyklov stanovená na 36 MPa. Experimentálne boli namerané hodnoty 275 MPa pre variant vz. 1 a 235 MPa pre variant vz. 2. Z tohto hľadiska je preto možné experimentálne zvarované zvarové spoje považovať za spôsobilé a vhodné pre cyklicky namáhané konštrukcie.

ZÁVER

Pri skúmaní únavových vlastností zvarových spojov sa preukázal pokles medze únavy voči základnému materiálu na úrovni 50 % až 67 %. Daný pokles nastal aj napriek úprave povrchu zvarovej húsenice s cieľom zabezpečiť čo najmenšiu koncentráciu napätia v prechode medzi základným materiálom a zvarovou húse-

nicou. Aj napriek relatívne nízkym hodnotám medze únavy je však možné konštatovať, že posudzované zvarové spoje spĺňajú požiadavky stanovené v príslušných technických normách pre výrobu oceľových konštrukcií (Eurokód 3).

Pod'akovanie

Výskum bol podporený grantovými systémami APVV-20-0427; VEGA 1/0044/22; KEGA 008ŽU-4/2022 a GS UNIZA 17326.

LITERATÚRA

- [1] HOBACHER, A. (2009): *The new IIW recommendations for fatigue assessment of welded joints and components – A comprehensive code recently updated*. In: International Journal of Fatigue, Vol. 31 (2009), No. 1, 50–58.
- [2] STN EN ISO 1993-1-9. (2007): *Eurokód 3. Navrhovanie oceľových konštrukcií. Časť 1-9: Únava*.
- [3] OTTERSBBÖCK, M. J. - LEITNER, M. - STOSCHKA, M. - MAURER, W. (2016): *Effect of weld defects on the fatigue strength of ultra high-strength steels. XVIII International Colloquium on Mechanical Fatigue of Metals (ICMFM XVIII)*. In: Procedia Engineering, Vol. 160 (2016), 214-222.
- [4] ŠLEZAK, T. (2020): *Fatigue Examination of HSLA Steel with Yield Strength of 960 MPa and Its Welded Joints under Strain Mode*. In: Metals, Vol. 10 (2020), 228.
- [5] FUŠTAR, B. - LUKAČEVIĆ, I. - SKEJIC, D. - GASPAROVIC, M. (2022): *Fatigue tests of as-welded and HFMI treated S355 details with longitudinal and transverse attachments*. In: Welding in the World, Vol. 66 (2022), No. 2, 2549-2561.
- [6] KARAKAS, Ö. - LEITNER, M. - TUZUN, N. (2021): *Application of critical distance approach for fatigue assessment of welded and HFMI-treated steel joints*. In: International Journal of Fatigue, Vol. 154 (2021), No. 7-8, 106534.