

Kvalifikace postupu svařování konstrukčních ocelí se zvýšenou mezí kluzu

Bc. Štěpán Ježek

ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie, Technická 4, 166 07 Praha 6, Česká republika

Abstrakt

Tato se práce se zabývá vytvořením opravného vzorku pro kvalifikaci postupu svařování oceli S960QL z důvodu nesplnění požadavku ohybové zkoušky dle normy ČSN EN ISO 15614-1.

Klíčová slova: WPQR; pWPS; ČSN EN ISO 15614-1; t8/5; S960QL; WeldCalc

1. Úvod

Tato práce se zabývá problematikou kvalifikace postupu svařování konstrukčních ocelí se zvýšenou mezí kluzu a jejich svařitelností.

Pro materiál S960QL byla vytvořena společností Schäfer – Menk s.r.o. kvalifikace postupu svařování, která zajišťuje proces svařování a kvalifikuje společnost ke svařování v požadovaném rozsahu dle ČSN EN ISO 15614-1. Pro tento materiál byl vytvořený náhradní vzorek pro zkoušku ohybem za průběžného sledování parametru t8/5.

Práce se zabývá S960QL používaným na auto-jeřábových konstrukcích. U této oceli došlo ke zvýšení meze kluzu pomocí jemnozrnné struktury a vhodného tepelného zpracování.

Kvalifikace postupu svařování byla prováděna podle normy ČSN EN ISO 15614-1 : Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 1: Obloukové a plamenové svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu.

Veškeré svařovací procesy byly provedeny ve výrobních prostorách společnosti Schäfer-Menk s.r.o., vyhodnocení nedestruktivních zkoušek jakosti svaru bylo provedeno dle výše zmíněné normy akreditovaným kontrolorem svařovacího postupu společností GSI-SLV Praha, destruktivní zkoušky byly provedeny společností GSI-SLV Halle.

1.1. Cíl práce

Svařování kovových materiálů je speciální proces, obsahující mnoho faktorů ovlivňující kvalitu spoje. V případě porušení spoje při používání součásti může dojít k poškození či zničení výrobku nebo ke zranění osob. Těmito situacím se snaží dodavatelé i odběratelé svařenců vyhnout a z tohoto důvodu došlo k vytvoření nadnárodních normativů, které specifikují požadavky na jakost při svařování (např. EN ISO 3834-2, ČSN EN 1090-2, ČSN EN 15085, DIN 18800). Společnost Schäfer-Menk s.r.o. je těmito normami certifikována.

Každý svařenec, dodaný zákazníkovi, musí být kvalifikován WPQR, které zaručují integritu (svar dle požadované přípustnosti) a zaručené mechanické vlastnosti svařového spoje.

Tato práce se zabývá nalezením nápravného řešení pro výrobu vzorku k zajištění kvalifikace svařování materiálu S960QL pro robotické svařování, praktickým měřením a hodnocením teplotního cyklu. Cílem měření a hodnocení hodnot času t8/5 při svařování v průběhu svařovacího procesu je porovnání naměřených reálných výrobních hodnot s hodnotami získanými pomocí programu WeldCalc a předepsanými hodnotami od zákazníka. Naměřené časy mají vliv na kvalitu a pevnostní charakteristiky svaru.

V této práci bude navržen svar pro kvalifikaci postupu svařování dle normy ČSN EN ISO 15614-1. Kvalifikace postupu svařování vypracovaná touto prací se použije v reálném provozu společnosti. Vyhodnocení WPQR bude provedeno dle výše uvedené normy.

Zvolené cíle práce:

- Návrh pWPS pro nový vzorek
- Vytvoření vyhovujícího vzorku
- Sledování tepelného cyklu pomocí termočlánků
- Porovnání naměřených dat s programem WeldCalc a požadavky zákazníka

1. WPQR pro S960QL

Tato část práce se zabývá vytvořením náhradního vzorku pro kvalifikaci postupu svařování pro tupý 1/2 V (HV) svar materiálů o tloušťkách $t_1 = 6$ a $t_2 = 10$ mm a měřením teplotního cyklu svařovacího procesu. Profil HV svaru byl vytvořen na základním materiálu o tloušťce $t_1 = 6$ mm. U předchozího vzorku nebyl vyhovující výsledek ohybové zkoušky, která je součástí škály mechanických zkoušek, požadovaných pro kvalifikaci dle ČSN EN ISO 15614-1.

Tvorba vzorku a měření tepelného cyklu probíhalo ve výrobním podniku společnosti Schäfer – Menk s.r.o. v Dýšině u Plzně pod odborným vedením Ing. Jaroslavem Brabcem IWE.

Zkouška ohybem nevyhověla požadavkům z důvodu chyby v kořeni svaru, proto jsme pro nový vzorek navrhli změnu procesu svařování, která by měla zaručit požadované vlastnosti spoje.

* Kontakt na autora: Jmeno.Prijmeni@fs.cvut.cz

Interní pravidla a požadavky zákazníka požadují hodnotu $t_8/5$ u vysokopevných jemnozrnných ocelí v rozmezí 6-12 vteřin.

Z důvodu vyšší pevnosti materiálu bylo velmi důležité zachovat technologickou kázeň a svařování provést přesně dle doporučení výrobce materiálu a letitých zkušeností odborníků ze společnosti Schäfer – Menk s.r.o..

Svarový spoj byl proveden automatizovaně, svařovacím robotem Closs Kyrox 350 viz Obrázek 1., který disponoval tandemovým hořákem s vysokým svařovacím výkonem. Z důvodu vysokého svařovacího výkonu bylo nutné svarový spoj před svařovacím procesem podložit svarovými vrstvami pro stabilizaci taveniny v kořeni svaru.



Obr. 1. Closs Kyrox 350.

1.1. Základní materiál

Svařovacím materiálem byl materiál S960QL výrobcem označovaný jako Weldox 960.

Pro kontrolu, zda základní materiál splňuje požadavky normy ČSN EN 10025-6 byly použity inspekční certifikáty 3.1. dle normy ČSN EN 10204 dodané společně s materiálem.

Norma ČSN EN 10025-6+A1, definuje pro materiál výrobku požadované chemické složení, mechanické vlastnosti a stav materiálu.

Inspekční certifikáty potvrdily správnost obou základních materiálů a lze je použít pro vytvoření vzorku pro WPQR.

1.2. Návrh pWPS pro nový vzorek

Předchozí vzorek pro WPQR nevyhověl požadavkům normy pro zkoušku ohybem, důvodem byla trhлина v kořenové vrstvě svaru viz Obrázek 2.



Obr. 2. Nevyhovující vzorek

Po negativním výsledku ohybové zkoušky, jsme pro změnu procesu předpokládali, že příčinou trhliny v kořeni svaru mohla být necelistvost v kořenové vrstvě svaru způsobená lidským faktorem při svařování podložení nebo nízká pevnost použitého přídavného materiálu pro podložení svaru.

Pro dosažení vyhovujícího vzorku jsme v procesu navrhli tyto změny:

- Zavedení automatizovaného svařování pro podložení svaru (svařovací traktor)
- Použití přídavného materiálu s vyšší pevností pro podložení svaru (z ED-SG3 na ED-FK 1000)

Použitou pWPS uvádím jako Přílohu 1.

Z důvodu vysoké základní pevnosti svařovaného materiálu je nutné před začátkem procesu aplikovat přehřev.

1.3. Čas $t_8/5$

U vysokopevných jemnozrnných ocelí je důležité hodnotit hodnotu $t_8/5$ dosahovanou v průběhu svařovacího procesu. Určení $t_8/5$ se ve společnosti Schäfer – Menk s.r.o. pro oceli s vyšší pevností než S690QL provádí standardně pomocí programu WeldCalc, který je od dodavatele materiálu SSAB a je jím pro nastavení procesu doporučen.

V průběhu vytváření opravného vzorku pro WPQR byl $t_8/5$ také měřen přímo pomocí termočlánků pro porovnání přímo naměřených dat s vypočtenou hodnotou, toto přímé měření v průběhu svařování vzorku pro WPQR je požadováno zákazníkem.

1.4. Ověření vhodnosti parametrů

Před začátkem svařování jsme si ověřili, zda navržené parametry splňují interní požadavky na dosaženou hodnotu $t_8/5$ v průběhu svařování. Ověření jsme provedli pomocí programu WeldCalc od dodavatele základního materiálu značky Weldox firmy SSAB

Tento program na základě svařovacích parametrů, geometrii svaru a tloušťky svařovaného materiálu výpočtem určí výslednou hodnotu $t_8/5$. V případě svařování oceli značky Weldox je toto určení času $t_8/5$ dle doporučení dodavatele dostatečné pro vytvoření vyhovujícího spoje. Požadovaný rozsah $t_8/5$ je zúžen oproti doporučení výrobce plechů SSAB z 5-15s na 6-12s (požadavek zákazníka).

Výhodou tohoto softwaru je možnost predikce času ochlazování a možnost úpravy svařovacího procesu ještě před samotným svařováním a tím i minimalizace ztrát způsobených špatně nastaveným procesem.

Pro výpočet času $t_8/5$ jsem použil hodnoty svařovacího procesu uvedené v pWPS, z důvodu použitého tandemového hořáku jsem pro výpočet volil průměrnou teplotu přehřevu 80°C, průměrnou hodnotu napětí a součet proudů použitých pro vytvoření svarového spoje, neboť software neumožňuje navolit tento způsob provedení svaru. Hodnoty pro výpočet uvádím v Tabulce 1.

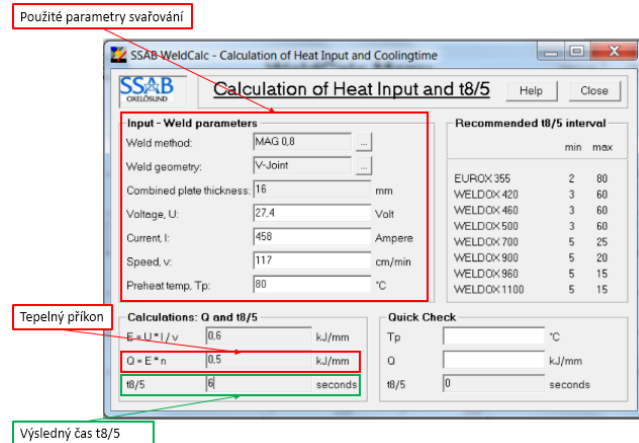
Tabulka 1: Hodnoty použité pro výpočet

Napětí drát 1 [V]	Napětí drát 2 [V]	Proud drát 1 [A]	Proud drát 2 [A]	Ø Napětí [V]	Σ Proudů [A]	Rychlost svařování [m/min]	Ø Teplota přehřevu [°C]
27,9	26,9	223	235	27,4	458	117	80

V programu SSAB WeldCalc jsem dále musel zvolit typ svaru viz Obrázek N, který se nejvíce podobá použité geometrii. Typ svaru půl V nebyl v nabídce, tak jsem pro výpočet musel použít typ svaru V.

Potom jsme museli vybrat použitou metodu svařování, dle této metody software zvolí koeficient účinnost svařování pro následný výpočet. Zvolil jsem dle použité technologie metodu MAG s koeficientem 0,8.

Po zadání těchto pracovních parametrů software vypočetl hodnotu $t_8/5$ viz Obrázek 3.



Obr. 3: Výpočet $t_8/5$

Při námi navržených parametrech by hodnota $t_8/5$ v průběhu svařování měla dosahovat hodnoty 6 vteřin, což je na dolní hranici předepsaného rozmezí pro $t_8/5$. Tento proces je správně navržený a po tomto pozitivním ověření můžeme při zvolených parametrech vytvořit svarový spoj.

1.5. Svařování vzorku pro WPQR

Vzorek pro WPQR jsme svařovali dle parametrů definovaných v pWPS, před svařováním vzorku jsme svařovali zkušební vzorek totožných vlastností, tento vzorek jsme mohli využít k lehké optimalizaci svařovacího procesu, před vytvořením vzorku pro WPQR, pro dosažení požadovaných vlastností spoje a hodnot $t_8/5$.

1.5.1. Předehřev materiálu

Pro dosažení správného provedení svaru a požadavků na jakost, včetně požadavku na $t_8/5$ je velice důležité dodržení teploty předehřevu dle směrnice. Předehřev je důležitý pro vytvoření kvalitního svarového spoje bez vzniku svarových vad či nežádoucích zůstatků struktur a k redukci obsahu vodíku v okolí svarového spoje. V tomto případě je pro tloušťku materiálu $t_2 = 10$ mm požadované předehřívání na min. 100st. C a max. na 120st.C. U tloušťky $t_1 = 6$ mm je nutné dodržet max. předehřev 60st.C. Důležitým aspektem je také správné měření teploty předehřevu a správný postup předehřívání dle instrukce Schäfer-Menk s.r.o.. Předehřev základního materiálu byl proveden ručně pomocí kyslíko-acetylenového hořáku z obou stran svařovaného materiálu.

Správná dosažená teplota byla kontrolována termokřídami, které jsme měli k dispozici pro teploty 75, 100, 150 °C.

Bylo důležité použít právě tyto křídý, protože při předehřevu materiálu je důležité homogenní teplotní pole v celém objemu materiálu a správná teplota. Případná nižší

i vyšší teplota předehřevu může ovlivnit výslednou hodnotu $t_8/5$ a tím negativně ovlivnit vlastnosti svarového spoje a tím i celý výsledek vytvářené WPQR.

1.5.2. Podložení svaru

Podložení svaru bylo provedeno vícevrstevným svarovým spojem. Podložení bylo vytvořeno třemi housenkami, pokládanými přesně dle schématu uvedeného v pWPS.

Pro podložení byla použita technologie MAG za použití svařovacího traktoru.

1.5.3. Vytvoření svarového spoje

Jak již bylo výše zmíněno, svarový spoj byl vytvořen automatizovaně robotem Closs Kyrox 350, za použití tandemového hořáku. Svar byl proveden na dva průchody svařovacím hořákem.

Byly vytvořeny dva vzorky, první pro optimalizaci svařovacího procesu pro druhý vzorek, který bude použitý pro WPQR.

Před svařovacím procesem na robotu byl vybrušen kořen svaru do čista do hloubky 6mm. V průběhu svařování vzorku byla před každou svarovou vrstvou kontrolována teplota interpass, teplota materiálu by měla dosahovat teploty 110°C.

Pro svařování byly použity parametry, uvedené v pWPS.

1.6. Získávání dat pomocí termočlánků

Získávání dat probíhalo pomocí měřícího přístroje National Instrumental pro měření $t_8/5$ s pomocí tří připojených termočlánků. Naměřené hodnoty jsou vyhodnocovány softwarem Vatron-t85_Programm.

Umístění termočlánku do svarového kovu bylo provedeno vždy ve stejné vzdálenosti od začátku svařence viz Obrázek 4. Umístění do stejného místa bylo důležité pro zvýšení přesnosti při porovnání naměřených dat a provedení mechanických zkoušek v laboratoři. Minimální vzdálenost mezi termočlánky byla volena dle požadavků normy ČSN EN ISO 15614-1.

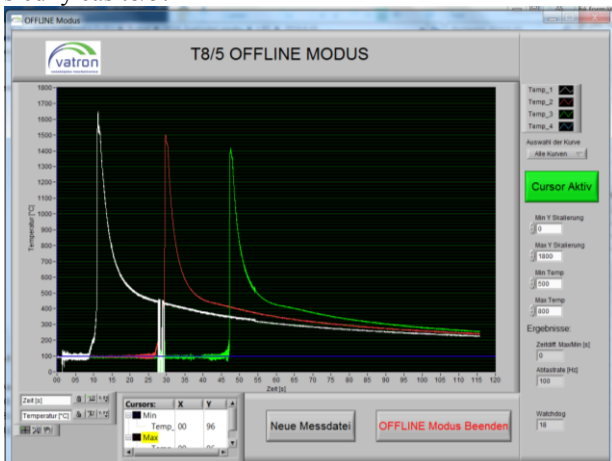


Obr. 4: Umístění termočlánků

Termočlánky se pro zjištění celého teplotního cyklu musí umístit do svarové lázně ihned za svařovací hořák. Z toho důvodu začne termočlánek měřit již teplotu taveniny a ve výsledných křivkách můžeme vidět průběh teplot svarového spoje od taveniny až po teploty základního materiálu v tepelně neovlivněné oblasti na konci svařovacího procesu.

Výsledkem měření je křivka chladnutí, která má pro každý termočlánek jinou barvu viz Obrázek 5. Podle

těchto naměřených dat použitý software vyhodnotí výsledný čas t8/5.



Obr. 5: Křivky chladnutí

1.6.1. Naměřené hodnoty

Naměřené hodnoty času t8/5, odečtené ze softwaru Vatron-t85_Programm uvádím do tabulky 2 a 3, které obsahují také hodnoty parametrů použitých při svařovacího procesu. Tabulka 2 se týká zkušebního kusu, tabulka 3 uvádí hodnoty pro WPQR vzorek.

Tabulka 2: Vzorek k nastavení parametrů svařován

Napětí - drát 1 [V]	Proud - drát 1 [A]	Napětí - drát 2 [V]	Proud - drát 2 [A]	Rychlost svařování [m/min]	Odečtené t8/5 [s]		
21,6	150	-	-	32,9			
21,6	190	-	-	33,5			
21,6	190	-	-	35,4			
27,9	241	26,9	222	117	8,01	5,85	6,33
28,9	233	28	219	110	6,95	6,2	5,89

Tabulka 3: Vzorek použitý pro WPQR

Napětí - drát 1 [V]	Proud - drát 1 [A]	Napětí - drát 2 [V]	Proud - drát 2 [A]	Rychlost svařování [m/min]	Odečtené t8/5 [s]		
21,6	144	-	-	38			
26,2	247	-	-	45			
26,2	247	-	-	45			
27,9	223	26,9	235	117	8,01	6,01	6,33
28,9	230	29	230	110	6,95		

U naměřených hodnot si můžeme všimnout, že se nám nepodařilo naměřit všechny hodnoty t8/5 při vytváření podložení svaru a při druhém průchodu svařovacího hořáku u vzorku pro WPQR pouze část. Hodnoty nebyly naměřeny z důvodu špatného umístění sondy do svarové lázně (malá svarové lázně, vyšší rychlost svařování, špatná přístupnost).

Při svařování vzorku pro nastavení parametrů svařování měřená hodnota času t8/5 se snížila pod požadovanou minimální hodnotu 6 vteřin. Z toho důvodu jsme pro svařování vzorku pro WPQR použili větší proud na druhém drátu a tím zvýšili celkový tepelný příkon a v důsledku i dobu chladnutí t8/5.

Hodnoty t8/5 pro náhradní vzorek pro WPQR jsou všechny v předepsaném rozsahu.

1.7. Porovnání naměřených dat s WeldCalc

Pro porovnání s programem WeldCalc jsem využil parametry pro první průchod tandemového hořáku při

svařování vzorku pro WPQR, pro tyto parametry máme přímo změřené hodnoty t8/5 v průběhu celé délky svaru.

V Tabulce 4 si můžeme všimnout, že kromě hodnoty změřené termočlánkem na začátku svaru se hodnoty t8/5 ustáleného procesu blíží teoretické vypočtené hodnotě.

Tabulka 4: Porovnání s předchozím výpočtem

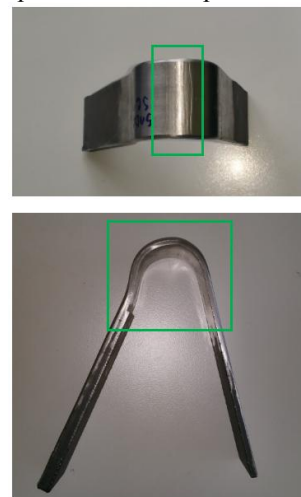
Napětí drát 1 [V]	Napětí drát 2 [V]	Proud drát 1 [A]	Proud drát 2 [A]	Ø Napětí [V]	Σ Proudů [A]	Rychlost svařování [m/min]	Ø Teplota přehřevu [°C]	Odečtené t8/5 [s]			WeldCalc t8/5 [s]
27,9	26,9	223	235	27,4	458	117	80	8,01	6,01	6,33	6

1.8. Opakování ohybové zkoušky

Po vytvoření nového svarového vzorku pro WPQR jsme opět nechali námi vytvořený náhradní vzorek otestovat dle požadavků ČSN EN ISO 15614-1 společností GSI-SLV Halle. Tato německá společnost je požadavkem zákazníka.

Při opakované zkoušce ohybem náhradní kus vyhověl požadavkům normy ČSN EN ISO 15614-1. Tento typ svaru splnil všechny požadavky normy a úspěšně kvalifikuje proces pro výrobu.

Positivní výsledek ohybové zkoušky viz. Obrázek 6 je splněním zadání pro druhou sekci praktické části.



Obr. 6: Vzorek po ohybové zkoušce

2. Závěr

Po úpravě procesu se nám podařilo vytvořit svarový spoj o takových vlastnostech, že úspěšně prošel opakovanou zkouškou ohybem a úspěšně splnil všechny požadavky normy ČSN EN ISO 15614-1.

Na základě této WPQR je možné v rámci kvalifikace navrhnout WPS pro svařování.

Výsledky přímého měření teplotního cyklu pomocí termočlánků potvrdili hodnotu vypočtenou pomocí programu WeldCalc a společně ověřily správné nastavení procesu pro dosažení požadovaného času ochlazování t8/5.

3. Literatura

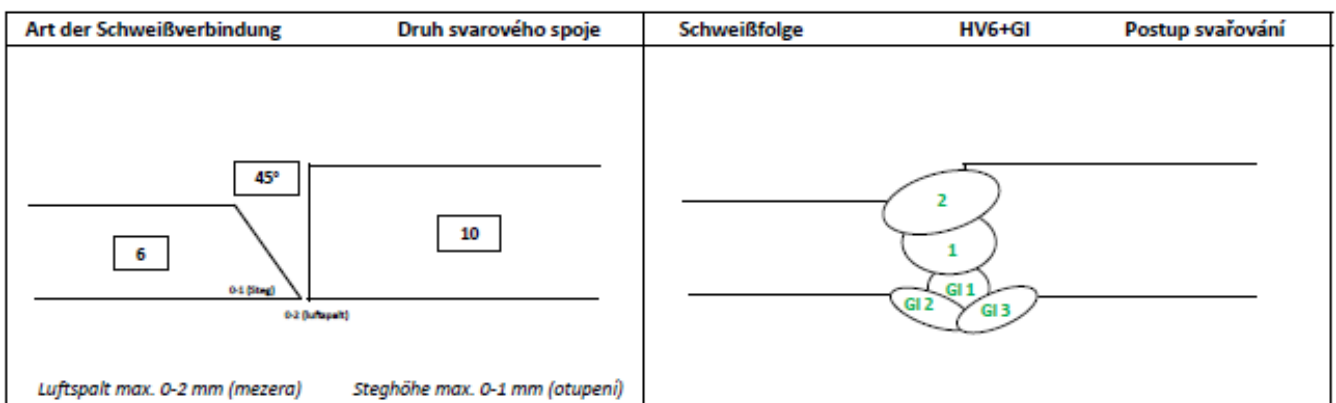
- [1] ČSN EN ISO 15614-1. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování: Část 1: Obloukové a plamenové svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [2] ČSN EN 10204. *Kovové výrobky - Druhy dokumentů kontrol*. 2. Praha: Český normalizační institut, 2005. [3] ČSN EN 10025-6 +A1. *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí: Část 6: Technické dodací podmínky pro ploché výrobky z ocelí s vyšší mezí kluzu v zušlechtěném stavu*. 1. Praha: Český normalizační institut, 2010..
- [4] Beneš L., Brabec J. *Specifika a požadavky na kvalifikaci svařování jemnozrnných ocelí v auto-jeřábové technice*, Praha: ČVUT v Praze a Schäfer-Menk s.r.o., 2017
- [5] *Firemní předpisy a standardy*. Schäfer-Menk 2016
- [6] STEMNE, [Daniel, Torbjörn NARSTRÖM a Bogoljub HRNJEZ]. *Welding handbook: a guide to better welding of Hardox and Weldox*. Oxelösund: SSAB, 2010. ISBN 9789197857307

Příloha 1



*Schweißanweisung des Herstellers (pWPS) – 960 B 6 1.2 (R031-2015)
Postup svařování výrobce (pWPS)*

Ort:	<i>Pizeň-Dýšina</i>	Místo:	Prüfer/Prüfstelle:	-	Zkušební organizace:
Schweißverfahren:	MAG ROBOTER	Metoda svařování:	Vorbereitung:	Broušení (Schleifen)	Příprava:
WPOQR:	-	WPOQR číslo:	Grundwerkstoff:	S960QL (ČSN EN 10025-6)	Základní materiál:
Hersteller:	Schäfer Menk	Výrobce:	Zusatzwerkstoff:	ED FK 1000	Přídavný materiál:
Schweißprozeß:	135	Metoda svařování:	Werkstoffdicke (in mm):	6 + 10	Tloušťka materiálu:
Nahtart:	BW	Druh svaru:	Schweißposition:	PA + PA	Poloha svařování:
Nahtvorbereitung:	úkos (Fase)	Příprava svaru:	Schweißer:	Operator	Svářeč:



Lage	Prozeß	Drathdurchmesser	Drathvorschub	Strom	Spannung	Stromart	Schweißgeschwindigkeit	Vorwärmtemperatur	Wärmeeinbringung Q	Zeit t 8/5
Svar	Metoda	Průměr drátu	Posuv drátu	Proud	Napětí	Druh proudu	Rychlost svařování	Teplota předehřevu	Vnesené teplo Q	Čas t 8/5
		[mm]	[m/min]	[A]	[V]	[Polarität]	[cm/min]	[°C]	[kJ/cm]	[s]
GI (protivrstva)	135	1.2	6	200	22	=/+	35,0	60/100.	6,0	8,0
1 (kořen)	135	1.2/1.2	7-8	240/226	26,5/27	=/+	117,0	90/110.	5,0	9,7-11,3
2 (krycí)	135	1.2/1.2	10-12	234/218	28,2/28,3	=/ +	110,0	80/110.	5,0	7,3-8,3

ORIENTAČNÍ ŠÍŘKA HOUSENKY KOŘENOVÝCH VRSTEV 8-10 mm; ORIENTAČNÍ ŠÍŘKA VÝPLŇOVÝCH A KRYCÍCH VRSTEV 10-12 mm

Schweißzusatz (Norm):	EN ISO 16834 - A – G89 6 M25 Mn4Ni2CrMo	Svařovací přísady (norma):
Schweißzusatz (Art):	ED FK 1000 (SG 890)	Svařovací přísady (druh):
Hersteller:	Fliess	Výrobce:
Charge:	873065	Šarže:
Schutzgas:	M 21 (18% CO₂; 82% Ar) (ČSN EN ISO 14175 – Corgon)	Ochranná atmosféra:
Gasdurchflußmenge:	GI=15 l/min; Tandem=25 l/min	Průtok plynu:
Fugen; Unterlage:	-	Drážkování; podložení:
Vorwärmtemperatur:	t1 = max. 60 °C; t2 = max. 100 °C	Teplota předehřevu:
Zwischenlagentemperatur:	110 °C	Mezihouseňková teplota:
Wärmenachbehandlung:	-	Tepelné zpracování po svařování:
Bemerkung:	Tandem; protivrstva drátem ED FK 1000 (Gegenlage mit ED FK 1000)	Poznámka:
Bemerkung:	SSAB Programm; Geometrie: V-Joint	Poznámka:

Hersteller: Schäfer-Menk, s.r.o.

Prüfer:

P. VÁLA 14.10.2016

J. Brabec 14.10.2016

Name, Datum, Unterschrift

Name, Datum, Unterschrift