

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**VLIV VELIKOSTI VNESENÉHO TEPLA NA VYBRANÉ
VLASTNOSTI SVARU JEMNOZRNNÉ OCELI**

INFLUENCE OF STORED HEAD ON THE CHOICE PROPERTIES OF FINE – GRAINED
STEEL WELDING.

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. VRATISLAV URBAN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

DOC. ING. LADISLAV DANĚK, CSC.

BRNO 2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Vratislav Urban

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Vliv velikosti vneseného tepla na vybrané vlastnosti svaru jemnozrné oceli.

v anglickém jazyce:

Influence of stored heat on the choice properties of fine - grained steel welding.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jemnozrné oceli patří k materiálům s vyšší pevností. Jsou náchylné k tvorbě studených trhlin, proto je nutné je předehtřivat. Příliš velký tepelný příkon při svařování však také není vhodný, dochází k hrubnutí zrn v důsledku tavení precipitátů na jejich hranicích. Mechanické vlastnosti jsou tedy ve velké míře závislé na optimálním příkonu.

Cíle diplomové práce:

- 1) Charakteristika jemnozrných ocelí.
- 2) Volba a orientační ověření parametrů svařování
- 3) Návrh metodiky experimentálních prací a jejich vyhodnocování
- 4) Provedení a zhodnocení experimentů (metalografická dokumentace, průběhy tvrdosti atd), formulace závěrů

Seznam odborné literatury:

1. Kolektiv autorů. Technologie svařování a zařízení. Ostrava: ZEROSS 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0
2. ONDREJČEK, P. Zváranie ocelí v ochrane plynov. Bratislava. ETERNA PRESS 2003. 202 s. ISBN 80-968359-5-5
3. ESSAB, FRONIUS, KEMPPPI, firemní materiály
4. Kolektiv autorů. Materiály a jejich svařitelnost. Ostrava: ZEROSS 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3
5. ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering. Vol. 6. USA: ASM, 2003. 1298 s. ISBN 0-87170-382-3

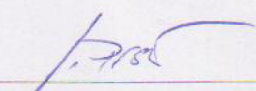
Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

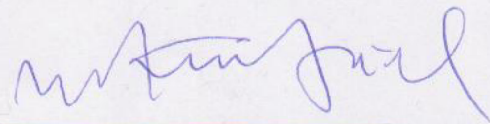
Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2010/11.

V Brně, dne 19.11.2010

L.S.




prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu


prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá charakteristikou jemnozrnných ocelí, volbou technologií svařování jemnozrnných ocelí a vlivem vneseného tepla na vybrané vlastnosti svaru. Byla studována mikroskopická struktura sváru a jeho pevnost v závislosti na vneseném teple. Na základě získaných poznatků byly stanoveny optimální parametry pro svařování jemnozrnných ocelí.

Klíčová slova

jemnozrnné oceli, Weldox, teplotní cyklus, svařování

ABSTRACT

The diploma thesis is focused on characterization of fine – grained steels, choosing of welding technology and effects of heat transmission on weld joint quality. The effect of transmitted heat on microscopic structure and stiffness of weld have been studied. Based on obtained results the optimal parameters for welding of fine - grained steel have been determined

Keywords

fine-grained steel, Weldox, thermal cycle, welding

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Urban, Vratislav. Vliv velikosti vneseného tepla na vybrané vlastnosti svaru jemnozrnné oceli. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. Vedoucí práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Vliv velikosti vneseného tepla na vybrané vlastnosti svaru jemnozrnné oceli vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum 20. 8. 2011

.....
Bc. Vratislav Urban

Poděkování

Děkuji tímto Ing. Ladislavu Daňkovi, CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt	4
Prohlášení.....	5
Poděkování	6
Obsah	7
1. Úvod	8
2. Jemnozrnné oceli	9
2.1 Normalizačně žíhané jemnozrnné oceli	10
2.2 Výběr oceli pro svařované konstrukce	11
2.3 Zušlechťené jemnozrnné oceli	14
2.4 Termomechanicky zpracované jemnozrnné oceli	17
3. Svařitelnost jemnozrnných ocelí	23
3.1 Vliv chemického složení.....	24
3.2 Vliv svařované tloušťky	25
3.3 Vliv obsahu difúzního vodíku	26
3.4 Vliv tepelného příkonu při svařování	27
3.5 Vliv stavů napjatosti	28
3.6 Výsledná teplota předehřevu	29
4. Teplotní cyklus	30
5. Svařování metodou TIG	32
5.1 Výběr wolframové elektrody.....	34
5.2 Přídavné materiály	35
6. Studené trhliny	36
7. Materiál na experimenty	38
7.1 Chemické a mechanické vlastnosti	39
7.2 Experimentální část práce	40
7.3 Nátav č. 1	41
7.4 Nátav č. 2	44
7.5 Nátav č. 3	46
7.6 Nátav č. 4	48
7.7 Nátav č. 5	50
7.8 Nátav č. 6	52
7.9 Shrnutí výsledků experimentů	54
7.10 Tahová zkouška	55
7.11 Metalografické hodnocení a měření tvrdosti	58
8. Závěr	62
9. Použitá literatura	63
10. Seznam příloh	64

1. Úvod

S narůstajícími požadavky na vlastnosti konstrukčních materiálů se do popředí dostávají materiály, které byly vyrobeny za účelem nahradit konstrukční oceli s běžnými hodnotami meze kluzu a meze pevnosti. Tyto oceli se řadí do jemnozrnných ocelí. Jedná se o oceli, které mají mez kluzu 355 až 1300 MPa. Ostatní zaručené mechanické vlastnosti (tažnost a vrubová houževnatost) zůstávají na přibližně stejné úrovni.

Jejich přednost je v dosažení daného pevnostního stupně při zachování co nejlepší svařitelnosti.

Při diskuzích o aplikacích vysokopevných konstrukčních ocelí je nutno si uvědomit, že nelze počítat s úsporou nákladů, pokud v konstrukci použijeme vysokopevný plech (menší tloušťky) místo klasické oceli. Vysokopevná ocel o mezi kluzu 700 MPa je cca 2x až 3x dražší, než ocelový plech. V reálných konstrukcích pak úspora tloušťky plechu při použití oceli s dvojnásobnou hodnotou meze kluzu není 50%, ale většinou je to méně než 30%. Úspora nákladů na materiál není tedy prioritním důvodem k aplikaci vysokopevné oceli. V současné době je převládajícím důvodem aplikací vysokopevných ocelí potřeba snížit hmotnost z jiných důvodů než je úspora nákladů na materiál.

Vysokopevné oceli mají před sebou velkou perspektivu. Není sice zcela zřejmé jak „masově“ jsou schopny v budoucnu nahradit klasické oceli, nicméně celosvětově roste jejich spotřeba rychleji než spotřeba klasických ocelí. Mezi nejvíce používanou vysokopevnou ocel patří Weldox vyráběná švédskou firmou SSAB Oxelosund AB.

2. Jemnozrnné oceli

„Současný trend při výrobě svařovaných konstrukcí, ve velké míře stavebních mechanismů, klade nové nároky na volbu základního materiálu. Tyto konstrukce musí vyhovovat konstruktérem stanovenému zatížení při minimalizaci hmotnosti konstrukce a tím redukcí nákladů jak při výrobě, tak i při provozu vlastního zařízení.“[1]

„Mechanické vlastnosti u nelegovaných konstrukčních uhlíkových ocelí jsou určovány především obsahem uhlíku a manganu. Obecně můžeme říci, že jsou zpevněny především substitučním a intersticiálním mechanismem. Je i jiná možnost jak zvýšit mez kluzu a mez pevnosti nelegovaných ocelí při zachování jejich houževnatosti a přitom potlačit nepříznivý vliv uhlíku na jejich svařitelnost. Jde o dolegování materiálu malým obsahem prvku jako Al, Ti, Nb a V.(jejich celkové množství nepřesahuje 0,15hm. %). Tyto prvky vytváří v oceli karbidy (C), nitridy (N) a karbonitridy (CN), které příznivě ovlivňují velikost zrn a navíc svou vazbou na uhlík a dusík snižují jejich obsah v oceli a tím zlepšují svařitelnost, resp. snižují náchylnost na def. stárnutí.“[1]

„Polotovary z jemnozrnných ocelí se vyrábějí nejčastěji řízeným válcováním v kombinaci tepelným zpracováním, které zvyšuje vliv mikrolegur (Al, Ti, Nb a V) na vlastnosti materiálu. Proto také někdy jsou označeny materiály tohoto typu jako mikrolegované jemnozrnné oceli. Obsah mikrolegujících prvků jsou obvykle limitovány Al min. 0,015hm.%, Ti max. 0,15hm.%, V max. 0,1hm.% a Nb max. 0,04hm.%. Všechny uvedené prvky tvoří s uhlíkem a dusíkem karbidy, nitridy nebo karbonitridy. V případě hliníku to je nitrid AlN. Titan tvoří karbid TiC, nebo karbonitrid Ti (C, N) a nitrid TiN. Niob vytváří karbid NbC, nebo karbonitrid Nb (C, N) a vanad karbid V_4C_3 nebo karbonitrid V(C, N).“[1]

„Jemnozrnné oceli rozdělujeme následovně:

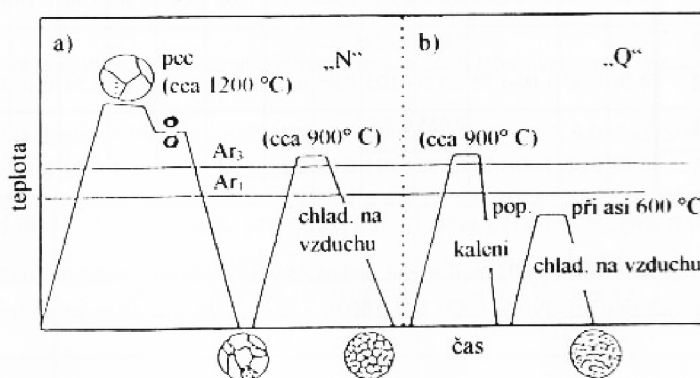
- normalizačně žíhané jemnozrnné oceli (A)
- zušlechtěné jemnozrnné oceli (Q)
- termomechanicky zpracované jemnozrnné oceli (M) " [1]

"Pro svařování vysokopevných jemnozrnných ocelí se v první řadě používají následující metody svařování:

- ručně obalenými elektrodami (111)
- svařování el. Obloukem v ochranné atmosféře - MAG (135)
- pod tavidlem (121) "[8]

2.1. Normalizačně žíhané jemnozrnné oceli

„Mají základ ve výrobě jemnozrnných normalizačně žíhaných oceli s hodnotou meze kluzu od 255 do 500 MPa (obr. 1), ze kterých jsou vyráběny plechy o následujících obsazích prvků: 1,70hm.% manganu, 0,30hm.% chromu, 0,10hm.% molybdenu, do 1hm.%niklu, do 0,22 V vanadu s tím, že součet niobu, titanu a vanadu nepřesáhne 0,22hm.%. Oceli jsou normalizačně žíhané v rozsahu teplot 880 až 960°C. Žíhání na odstranění zbytkového napětí je uskutečněno za teplot 530 až 600°C. Průběh tepelného zpracování mikrolegovaných jemnozrnných ocelí po válcování je na obr 1. "[2]



„Obr. 1 Mikrolegované oceli po válcování tepelně zpracované

a) normalizačním žíháním N

b) zušlechtěním "[2]

„Jak již bylo uvedeno, hliník zabraňuje podstatně náchylnosti oceli a ovlivněných oblastí svarových spojů ke stárnutí, způsobnému precipitaci nestabilních nitridů železa typu $Fe_{16}N_2$ a Fe_4N , vedoucí k vázání dusíku na stabilní nitridy hliníku AlN “ [2]

„Citlivost ke stárnutí je u oceli do hodnoty meze kluzu 315MPa kontrolován zkouškou deformačního stárnutí (deformace 10% a stárnutí 2150°C 0,5 hod.) s požadavkem min. 27J v příčném směru a 41J v podélném směru. U oceli s hodnotou meze kluzu do 500MPa po deformaci 5% a stárnutí 250°C 0,5 hod. musí být splněn požadavek 31J v příčném směru a 41J v podélném směru.

Chemické složení normalizačně zpracovaných jemnozrnných ocelí pro ocelové konstrukce je uvedeno v tabulce 1. [2]

„Tab. 1. Chemické složení normalizačně žíhaných jemnozrnných ocelí (N)“ [2]

Označení podle		Chemické složení [hm. %]													
ČSN-EN 10027-1 ECISS- IC 10	ČSN- EN 10027- 2	C	Si	Mn	P	S	Nb	V	Almet	Ti	Cr	Ni	Mo	Cu	N
	max.	max.		max.	max.	max.	max.	max.	min..	max.	max.	max.	max.	max.	max.
S275N	1,049	0,18	0,04	0,50-1,40	0,035	0,030	0,05	0,05	0,02	0,03	0,03	0,03	0,10	0,35	0,015
S275NL	1,0491	0,16	0,04	0,50-1,41	0,030	0,025	0,05	0,05	0,02	0,03	0,03	0,03	0,10	0,35	0,015
S355N	1,0545	0,20	0,05	0,90-1,65	0,035	0,030	0,05	0,12	0,02	0,03	0,03	0,50	0,10	0,35	0,015
S355NL	1,0546	0,18	0,05	0,90-1,66	0,030	0,025	0,05	0,12	0,02	0,03	0,03	0,50	0,10	0,35	0,015
S420N	1,8902	0,2	0,06	1,00-1,70	0,035	0,030	0,05	0,2	0,02	0,03	0,03	0,80	0,10	0,70	0,025
S420NL	1,8912	0,2	0,06	1,00-1,71	0,030	0,025	0,05	0,2	0,02	0,03	0,03	0,80	0,10	0,70	0,025
S460N	1,8901	0,2	0,06	1,00-1,72	0,035	0,030	0,05	0,2	0,02	0,03	0,03	0,80	0,10	0,70	0,025
S460NL	1,8903	0,2	0,06	1,00-1,73	0,030	0,025	0,05	0,2	0,02	0,03	0,03	0,80	0,10	0,70	0,025

2.2 Výběr oceli pro svařované konstrukce

„Oceli pro svařování, které jsou k dispozici v rámci konstrukčních ocelí ve skupinách 1, 2 a 3 (ČSN 050323), lze rozdělit do skupin:

- hliníkové konstrukční normalizačně žíhané oceli pro konstrukce pracující za normálních teplot EN 10025+A1 (revidované vydání EN 10025-2),

- uhlíkové konstrukční jemnozrnné normalizačně žíhané oceli pro pracovní teploty normální i snížené – EN 10113-2 (nové vydání EN 10025-3 a 10025-4),
- oceli s vyšší hodnotou meze kluzu EN 10149 a 10137 (nové vydání EN 10025-6),
- oceli pro tlakové nádoby a zařízení EN 10028-2 a 3 a pro výkovky EN 10222-1,
- oceli se zvýšenou odolností proti atmosférické korozi (nové vydání EN 10025-5).

V rámci nového vydání ČSN EN 10025 (tab. 2) se nemění:

- oceli pro tlakové nádoby a zařízení EN 10028-2 a 3,
- oceli s vyšší hodnotou meze kluzu EN 10149."[9]

„Tab. 2 Vysokopevné mikrolegované jemnozrnné oceli po změně označení jakosti"[9]

EN 10028-2 a 3 Oceli pro tlakové nádoby			EN 10025-3 a 4 Svařované konstrukce			EN 10149-2 tažené Oceli k			EN 10025-6 Zušlechtnuté vysokopevné oceli			
	N	M	Q		N	M		M	N		Q	QA
P420*		M		S420	N	M	S420	MC				
		ML1			NL	ML						
		ML2										
P460	N	M	Q									
	NH	ML1	QH	S420	N	M	S460			S460	Q	
	NL1	ML2	QL2	S460	NL	ML				S460	QL	
	NL2		Q					MC			QL1	
P500			QH				S500	MC		S500	Q	A
			QL2								QL	L
											QL1	
							S600	MC				
										S620	Q	A
											QL	AL
											QL1	
							S650	MC				
P690			Q							S690	Q	A
			QH								QL	AL
			QL2								QL1	
							S700	MC				
							S740	MC				
							S890	MC		S890	Q	
											QL	
											QL1	
							S960	MC		S960	Q	
											QL	
										S1100	Q	
											QL	

*-R_e [N/mm²] (MPa)

N – normalizované jemnozrnné oceli; Q – zušlechtnuté oceli;

A – precipitačně vytvrzené jemnozrnné oceli; H – oceli pro práci za vyšších teplot;

L – oceli pro nižší teploty

2.3. Zušlechtěné jemnozrné oceli

„Novodobé vysokopevné oceli jsou vyráběny v zušlechtěném stavu (kalením a popouštění). Zušlechtění lze dosáhnout u oceli s nízkým obsahem uhlíku (obdobné chemické složení, jako je tomu u normalizačně žíhaných ocelí) vznikem nízkouhlíkového martenzitu po kalení nastávají vysoké hodnoty meze kluzu. Nejvyšší obsahy prvků v zušlechtěných jemnozrných ocelích jsou uvedeny v tabulce 3. "[2]

„Jde o chemické složení tavbové analýzy zušlechtěných jemnozrných oceli s hodnotou meze kluzu 460 až 490MPa v základním provedení (bez označení) a v provedení pro nízké teploty (L, L₁) se sníženými obsahy nečistot. V závislosti na hodnotě meze kluzu jsou oceli legovány slitinovými prvky jako: Ni, Cr, Mo a V. "[2]

„Tab. 3. Tavbová analýza zušlechtěných jemnozrných a termomechanicky zpracovaných ocelí"[2]

Jakost M/T	Chemické složení [hm. %]														
	C	Mn	Si	P	S	N	B	Cr	Cu	Mo	Nb	Ti	V	Zr	Al
	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.	max.
Bez ozn. C-20°C	0,2	1,70	0,80	0,025	0,015	0,015	0,005	1,50	0,50	0,70	0,06	2,0	0,12	0,15	0,015
	0,2	1,70	0,80	0,025	0,015	0,015	0,005	1,50	0,50	0,70	0,06	2,0	0,12	0,15	0,015
L: -40°C L ₁ : -60°C	0,2	1,70	0,80	0,020	0,010	0,015	0,005	1,50	0,50	0,70	0,06	2,0	0,12	0,15	0,015
	0,2	1,70	0,80	0,020	0,010	0,015	0,005	1,50	0,50	0,70	0,06	2,0	0,12	0,15	0,015

„Mechanické hodnoty zušlechtěných jemnozrných a termomechanicky zpracovaných oceli jsou uvedeny v tabulce 4. "[2]

Tab. 4. Mechanické hodnoty zušlechťených jemnozrnných ocelí S460 až S960 (Q) a termomechanicky zpracovaných ocelí (M) „ [2]

Označení dle ČSN EN 10027-1	Mez kluzu R_e pro tloušťku [mm]			Mez pevnosti R_m pro tloušťku [mm]			Tažnost % (min).
	$\geq 3 \leq 50$	$> 50 \leq 100$	$> 100 \leq 150$	$\geq 3 \leq 50$	$> 50 \leq 100$	$> 100 \leq 150$	
	MPa (min).			MPa (min).			
S460QM S460QLM S460QL1M	460	440	400	550 – 720		500 – 670	17
S500QM S500QML S500QML1	500	480	440	590 – 770		540 – 720	17
S550QM S550QML S550QML1	550	530	490	640 – 820		590 – 770	16
S620QM S620QML S620QML1	620	580	560	700 – 940		650 – 830	15
S690QM S690QML S690QML1	690	650	630	770 – 940	760 – 930	710 – 900	14
S890Q S890QL S890QL1	890	830		940 – 1100	880 – 1100	-	11
S960QM S960QML	960	-	-	980 – 1150	-	-	10

„Podobné chemické složení a podobný způsob tepelného zpracování dělají z vysokopevných konstrukčních ocelí sourozence ocelí otěruvzdorných. V obou případech se většinou jedná o kalené ocelové plechy s nízkým obsahem uhlíku a legujících prvků, tak aby při vysokých hodnotách pevnosti (respektive tvrdosti) byla zajištěna jejich technologičnost, zejména svařitelnost. Hlavní rozdíl při výrobě těchto dvou skupin ocelí je v závěrečné fázi tepelného zpracování – popouštění. Zatímco se otěruvzdorné oceli po kalení nepopouštějí nebo se popouštějí jen na nízké teploty (cca 200°C), vysokopevné konstrukční oceli se popouštějí na vysoké teploty (cca 600°C). Vyšší popouštěcí teplotou vznikne ve

vysokopevných konstrukčních ocelích jiná rovnováha mezi pevností a houževnatostí – úroveň houževnatosti je povýšena na úkor pevnosti." [6]

„V současné době můžeme rozdělit vysokopevnostní konstrukční oceli do dvou hlavních skupin. Do úrovně meze kluzu $Re = 500\text{MPa}$ včetně, jsou tyto oceli nekalené a jsou zahrnuty v EN 10 113. V označení SSAB Oxelösund jde pak o ocelové plechy WELDOX 420, WELDOX 460 a WELDOX 500 (uvedené číslo znamená zaručovanou hodnotu meze kluzu). Kalené „pravé“ vysokopevnostní oceli pak mají mez pevnosti R_m od 690MPa a jsou zahrnuty v EN 10 137. V označení WELDOX jsou to pak stupně 700, 900 a 960. Nejpevnější konstrukční ocelí je v současné době ocel WELDOX 1100 s mezí kluzu $Re=1100\text{MPa}$, která není ještě zahrnuta v evropských normách. Zásadní rozdíl v mechanických vlastnostech mezi „klasickou“ konstrukční ocelí (S) a vysokopevnými ocelemi je zejména v mezi kluzu a mezi pevností. Ostatní zaručované mechanické vlastnosti (tažnost a vrubová houževnatost) zůstávají na přibližně stejné úrovni." [6]

„Z hlediska ekonomického nelze při náhradě běžných ocelí vysokopevnými počítat s nižšími náklady z toho důvodu, že vysokopevná ocel je 2 až 3x dražší než např. ocel S355. V reálných konstrukcích pak úspora tloušťky plechu při použití oceli s dvojnásobnou hodnotou meze kluzu není 50%, ale většinou je to méně než 30%. Úspora nákladů na materiál není tedy a prioritním důvodem k aplikaci vysokopevné oceli." [6]

„V současné době je převládajícím důvodem aplikací vysokopevných ocelí potřeba snížit hmotnost s jiných důvodů než je úspora nákladů na materiál. Tyto důvody jsou v zásadě dva." [6]

„První je, že existuje omezení hmotnosti výrobku z hlediska jeho manipulace, dopravy, legislativních předpisů, těžiště, přičemž jsou na tyto výrobky současně kladeny i značné nároky na nosnost, bezpečnost, odolnost proti zatížení, aj. Do této skupiny patří mobilní jeřáby, důlní výztuže, některé součásti zdvihacích zařízení a konstrukcí ropných plošin.

Druhým důvodem je, že snížením hmotnosti dosáhneme zvýšení kapacity (nosnosti) zařízení. Zde se jedná opět o mobilní jeřáby, dále o podvalníky, části podvozků některých nákladních automobilů, hydraulické ruky, aj." [6]

2.4. Termomechanicky zpracované jemnozrnné oceli (M)

„Termomechanické zpracované oceli (TMZ) je konvenční způsob výroby polotovarů (plechy, pásy, tyče, profily) který se začal průmyslově využívat na základě hlubších teoretických poznatků z teorie dislokací. Při tomto způsobu výroby polotovarů se materiál zpevňuje nejen mechanismem substitučního, intersticiálního a precipitačního zpevnění, ale výraznou roli hraje zejména hustota dislokací a příspěvek dislokačního zpevnění.“[1]

„Termomechanického zpevnění se dosahuje řízenou kombinací tváření materiál s jeho fázovými a strukturními přeměnami. Termomechanicky lze zpracovat téměř všechny polymorfní oceli. Největší význam však má u nízkolegovaných až středně legovaných oceli s obsahem uhlíku 0,4 až 0,6hm.%. U těchto materiálů je možné termomechanickým zpracováním dosáhnout současně zvýšení pevnostních i plastických vlastností.“[1]

„Mezi základní způsoby termomechanického zpevnění je možno řadit:

1. Termomechanické zpracování niobem nebo vanadem legovaných mikrolegovaných jemnozrnných ocelí metodou řízeného válcování. Řízením teploty, času a úběru při válcování dostaneme velmi jemné austenitické zrna, které při rychlém ochlazení transformujeme na jemnozrnný ferit s vysokými hodnotami meze kluzu a nízkou tranzitní teplotou.
2. Termomechanické zpracování deformací před transformací. Tento způsob je nejběžnější.

Je možné ho rozdělit na:

- a) Vysokoteplotní termomechanické zpracování.

Je charakteristické tváření v ještě stabilního austenitu a následným rychlým ochlazením v čase kratším, než je čas nutný na rekrytalizaci. Tímto zpracováním se zvýší pevnost i lomová houževnatost materiálu.

- b) Nízkoteplotní termomechanické zpracování.

Je založeno na deformaci (asi 50%) nestabilního austenitu během inkubační periody a jeho zakalením na martenzit s následným po pouštění při teplotách nižších než 200°C

3) Deformace během transformace.

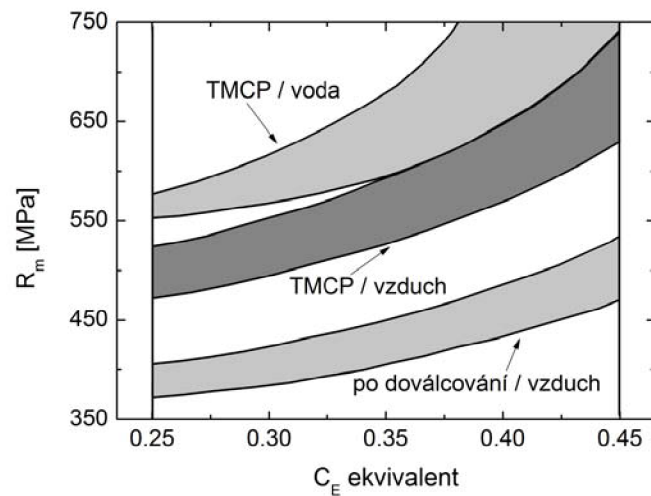
Termomechanické zpevnění oceli se dosahuje u uhlíkové oceli tvářením (nad 60%) po rychlém ochlazení z austenitizační teploty v průběhu perlitické transformace při teplotách 600 až 700°C, následným ochlazením na vzduchu. Při tomto způsobu zpracování se dosáhne malého zvýšení pevnosti, ale podstatného zvýšení houževnatosti materiálu. Deformace legovaných ocelí v průběhu bainitické transformace a zakalením získáme v mikrostruktuře oceli směs martenzitu a spodního bainitu. Výsledkem je větší zvýšení pevnosti materiálu ve srovnání s nízkoteplotním termomechanickým zpracováním, ale houževnatost materiálu se sníží

4). Deformace po transformaci

Vyznačuje se malou deformací martenzitu za studena (1 až 5%) mezi prvním a druhým popouštěním, nebo přímo při popouštěcí teplotě 150 až 200°C. Tímto zpracováním můžeme podstatě zvýšit mez kluzu materiálu při současném poklesu hodnot tažnosti a lomové houževnatosti."[1]

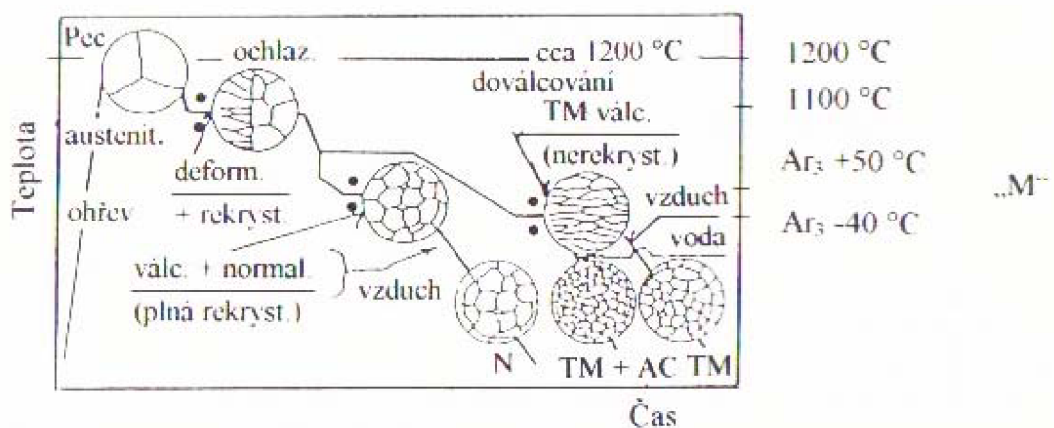
„Cílem procesu termomechanického zpracování je dosáhnout výrazného zpevnění zrn, což vede ke zvýšení jak pevnostních vlastností, tak i houževnatost oceli. Termomechanické zpracování se skládá z řízeného ovládání procesu tváření a následného zrychleného ochlazování bez dalšího tepelného zpracování. Velký důraz je při tomto procesu kladen na zvýšené parametry nukleace feritu v deformačně zpevněné austenitické matici s cílem snížení objemového podílu zbytkového austenitu, res. M/A složky v případě vzniku granulárního bainitu. "[2]

„Příznivý důsledek procesu termomechanického zpracování, reprezentovaného řízeným válcováním a řízeným (zrychleným) ochlazováním je při vyšší pevnosti a odolnosti proti křehkému porušení oceli v dosažení snížené úrovně C_E ekvivalent (obr. 2) a tím i ve snížení teploty předehřevu při svařování, za současně vyšší odolnosti proti vodíkovému křehnutí."[2]



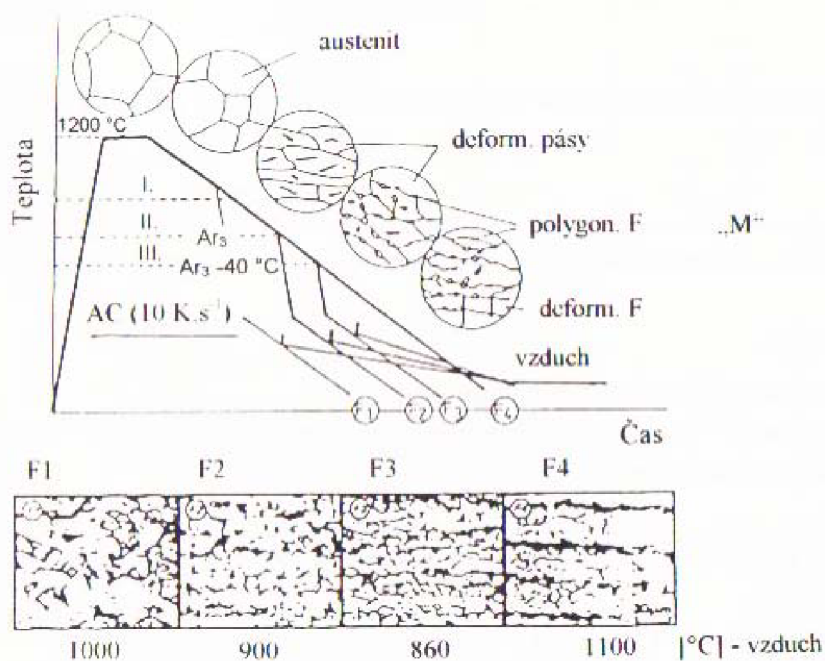
„Obr. 2 Vztah mezi C_E ekvivalentem uhlíku a hodnotou meze pevnosti v závislosti na rychlosti ochlazování (voda - vzduch) po doválcování (TMCP – tepelně mechanicky řízené procesy) "[2]

„Přednost spojení řízeného válcování s řízeným ochlazováním v porovnání s normalizačním žíháním je zřejmé z obr. 3. Výsledkem je jemnozrnná nerekrystalizovaná struktura "[2]



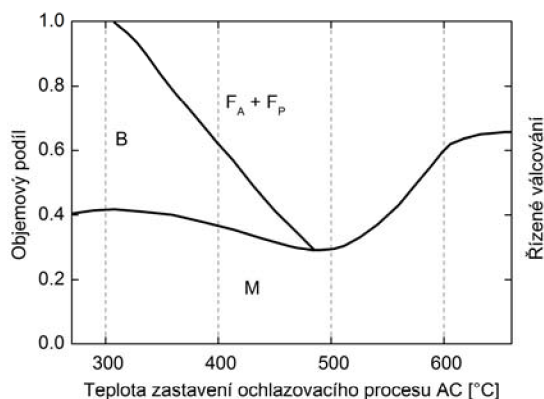
„Obr. 3 Vliv řízeného válcování TM a řízeného ochlazování na jemnozrnnost oceli"[2]

„Vedle výrazného zjemnění struktury, jmenovitě zrn feritu, se dosáhne i vysokého zrovnoměrnění struktury za současné eliminace perlitických pásů (obr. 4).“[2]



„Obr. 4 Vliv řízeného válcování (teploty doválcování) a rychlosti ochlazování ($10^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ - vzduch) na výslednou strukturu oceli“[2]

„Závažný vliv na mechanické vlastnosti oceli má zvolený režim zrychleného ochlazování (AC), jmenovitě teplota konce ochlazování, jakož i proces probíhající při zastavení zrychleného ochlazování. Nejvyšší odolnost proti vodíkem indukovaným trhlinám je dosahována při zastavení zrychleného ochlazování v teplotním intervalu 450 až 500 °C, kdy dostáváme zvýšený objemový podíl jemných feritických zrn, jemných disperzních ostrůvků bainitu a ostrůvků nízkouhlíkového martenzitu. Za nižších teplot zastavení roste množství bainitu na úkor jemných feritických zrn, jak je zřejmé z obr. 5.“[2]



„Obr. 5 Závislost objemového podílu mikrostrukturních fází na teplotě zastavení ochlazovacího procesu/ (AC) "[2]

„Termomechanicky řízené procesy v aplikaci se zrychleným ochlazováním vedou ke zvýšení vlastnosti vysokopevných ocelí cestou výrazného ovlivnění struktury, jmenovitě:

- a) Zjemnění zrn feritu
- b) Zjemnění disperzně vyloučených sekundárních fází
- c) Tvorbu lokalizovaných oblasti rovnoměrně distribuovaných strukturních ostrůvků perlitu na místo perlitických pásů "[2]

„Při aplikaci zrychleného ochlazování v rámci řízeného válcování musí být respektována následující doporučení:

- a) Doválcovací teplota musí být těsně nad Ar_3 což vede k dosažení nízké přechodové teploty přechodu houževnatých lomů do oblasti křehkého lomů.
- b) Zrychlené ochlazování vede k růstu pevnosti při výhodné hodnotě meze kluzu a bez ztráty houževnatosti
- c) V případě vzniku granulárního bainitu téměř nedochází k degradaci houževnatosti oceli (omezí se výskyt degradující M/A složky) "[2]

„Snížení doválcovací teploty těsně pod Ar_3 (cca 30 - 40°C) vede v případě řízeného válcování ke zvýšení hodnot pevnosti oceli. Vznik perlitických pásů a

vývin textury ve výchozí matrice je minoritní. Snížení teploty dovalcování je výhodné, je však velmi náročné z hlediska namáhání válců pro válcování.

Hlavní zpevňující mechanismy z hlediska vlivu na svařitelnost oceli jsou uvedeny v tabulce 5."[2]

„Tab. 5 Hlavní zpevňující mechanismy oceli a jejich vliv na svařitelnost "[2]

Mechanismus zpevnění	Vliv na svařitelnost	Vliv způsobu zpracování			
		N	Q/T	TMCP	CR+AC
Zjemnění zrn feritu	kladný, vzrůst houževnatosti	+	++	++	+++
Zpevnění tuhého roztoku	záporný, silné zpevnění, snížení houževnatosti	+++	++	++	+
Disperzní zpevnění	záporný, zkřehnutí TOZ	++	+	+	(+)
Dislokační a transformační zpevnění	minoritní	-	+++	+	++

N - normalizační žíhání

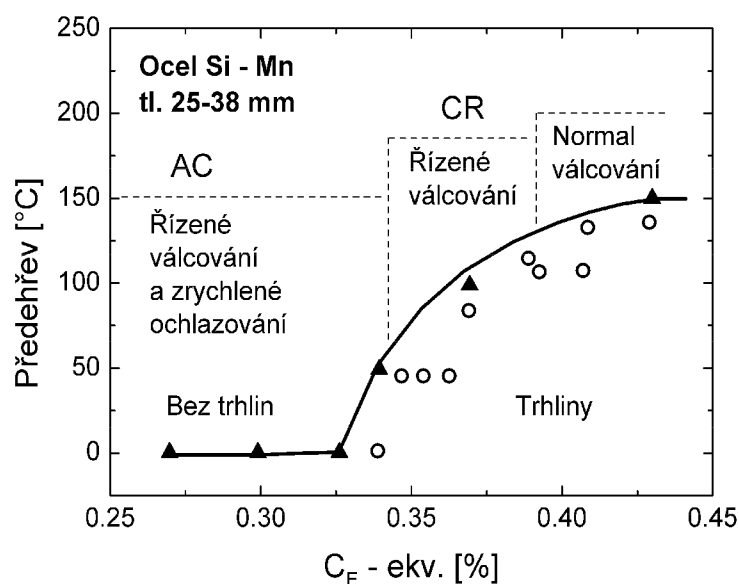
Q/T - kalení a popouštění

TMCP - tepelně mechanicky řízený proces

CR+AC - řízené válcování a zrychlené ochlazování

„Z tabulky 5. vyplývá, že cestou řízeného válcování a řízeného ochlazování lze dosáhnout optimálních technicko-technologických vlastností z hlediska svařování. Vlastnosti lze dále zvýraznit dovalčováním těsně pod Ar_3 teplotu.

Snížení C_E ekvivalentu oceli vede ke zlepšení houževnatosti a parametrů svařitelnosti tepelně mechanicky zpracovaných ocelí. Na obr.6 je vyjádřený vztah mezi C_E ekvivalentem a teplotou předehřevu z hlediska potlačení vzniku trhlin. Teplota předehřevu je nízká u oceli řízeně válcované v aplikaci s řízeným zrychleným ochlazováním."[2]



„Obr. 6 Vztah mezi C_E ekvivalentem a teplotou předkřevu při svařování s tepelným příkonem $17 \text{ kJ} \cdot \text{cm}^{-1}$ “ [2]

„Chemické složení jemnozrnných termomechanicky zpracovaných ocelí je uvedeno v tabulce 3.

Oceli jsou označovány v EN 10027-1 M (termomechanicky válcovano).
Mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 4“ [2]

3. Svařitelnost jemnozrnných ocelí

„Při svařování jemnozrnných mikrolegujících ocelí můžeme očekávat růst zrn v tepelně ovlivněné oblasti svarových spojů (dále jen TOO) a tím i pokles plastických vlastností v této oblasti. Svařujeme pokud možno bez předehřevu a s omezeným tepelným příkonem při svařování. V případě nutnosti použití předehřevu postačí obvykle teploty v rozmezí 100 až 150°C .

Svařitelnost termomechanicky zpracovaných ocelí je podobná jako svařitelnost konvenčně tepelně zpracovaných ocelí stejného chemického složení.“ [1]

„Pracovní postup musí být při svařování jemnozrnných zvláště termomechanicky zpracovaných ocelí veden tak, aby nedošlo procesem svařování k nepříznivému snížení vlastností spoje v tepelně ovlivněné oblasti

(TOO). Doporučuje se svařovat přídavnými materiály s nejmenším průvarem, menšími průměry elektrod (elektrodovými dráty), menšími proudy a větší postupovou rychlostí s tepelným příkonem do 10 kJ/cm. Při stehování se svařuje housenkami delšími než 50 mm, které se znovu převarí, z důvodu vzájemného vyžihání TOO a již navařené housenky, za současného snížení obsahu difúzního vodíku na minimum."[9]

K zajištění vysoké kvality svarových spojů jemnozrnných ocelí je nutné věnovat pozornost vlivu:

- Chemického složení základního materiálu
- Svařované tloušťky
- Obsahu vodíku ve svarovém kovu
- Tepelného příkonu při svařování
- Stavů napjatosti, tvořící se při svařování "[2]

3.1 Vliv chemického složení

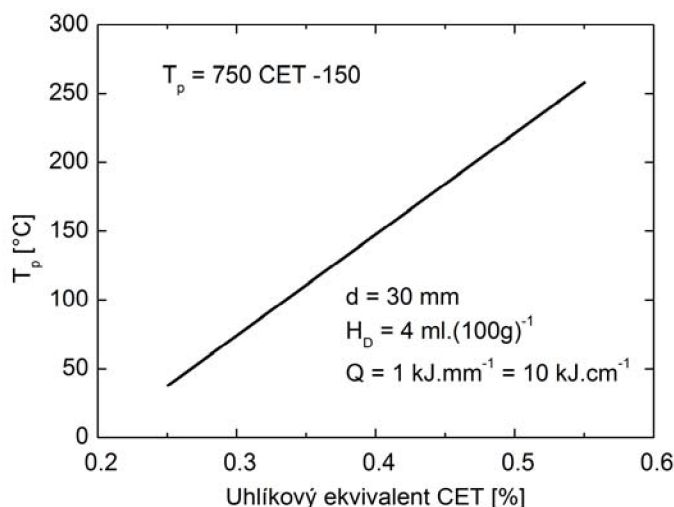
„Podle posledních poznatků výzkumu (SEW 088) je z hlediska možností vzniku trhlin za studena vhodnější použít pro výpočet ekvivalentu uhlíku IIW modifikovaný vzorec:

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} [\%] \quad (3.1)$$

který lépe vystihuje vliv prvků majících účinek na vznik trhlin za studena indukovaných vodíkem. Vliv ekvivalentu CET na teplotu přehřevu T_p při svařování tloušťky plechu $d = 30\text{mm}$ tepelným příkonem $Q_s = 10\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$, vypočítané podle vzorce: "[2]

$$T_p = 750CET - 150 \quad (3.1a)$$

je znázorněn na obr. 7 (obsah difúzního vodíku $H_D = 4 \text{ ml}\cdot(100\text{g})^{-1}$)



„Obr. 7 Hodnoty teploty předehřevu v závislosti na ekvivalentu uhlíku CET[%]“ [2]

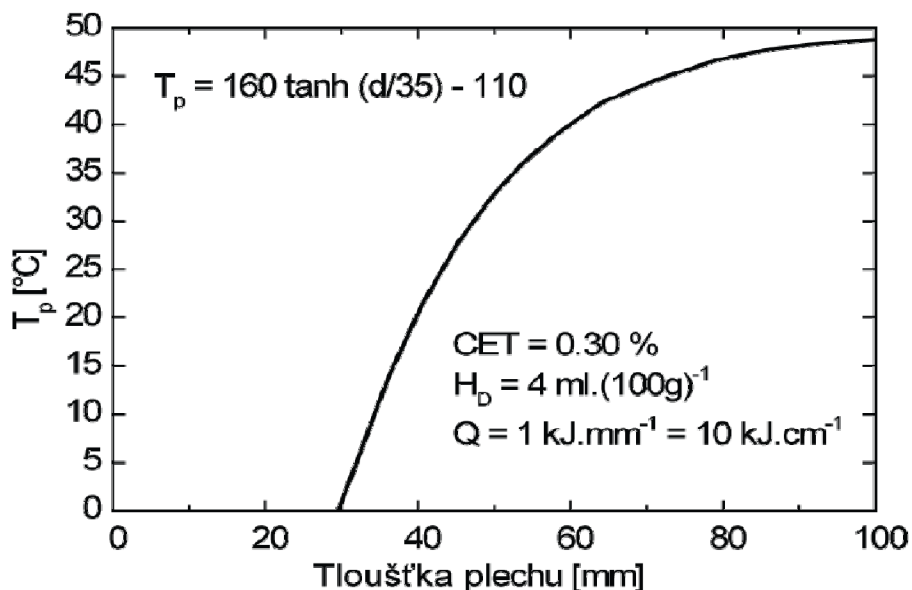
„Z obr. 7 je patrné, že termomechanicky zpracované oceli S460M o tloušťce 30mm s CET 0,24% lze za normálních podmínek svařovat bez předehřevu. Jinak je tomu u normalizačně žíhaných ocelí S460N a zušlechtěných ocelí S460Q, které k dosažení hodnoty meze kluzu $R_e = 460$ MPa vyžadují slitinové prvky Ni, Cr, Mo, zvyšují CET např. na hodnotu 0,34% což znamená pro svařování tloušťky 30 mm předehřev na min. 100°C.“ [2]

3.2 Vliv svařované tloušťky

„Závislost tloušťky stěny na vyšší teploty předehřevu vyjadřuje rovnice: která je graficky znázorněna na obr. 8. Závislost platí pro CET 0,30%, $H_D = 4$

$$T_p = 160 \tanh\left(\frac{d}{35}\right) - 110 \quad (3.2)$$

ml*(100g)⁻¹) a tepelný příkon 10kJ*cm⁻¹. Z průběhu křivky vyplývá, že do tloušťky 60 mm má změna tloušťky podstatný vliv na výši teplotu předehřevu.“ [2]



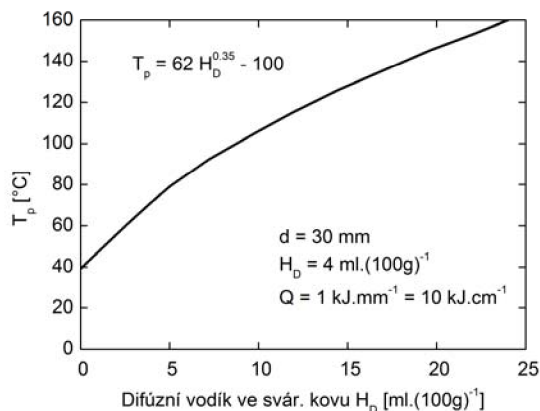
„Obr. 8 Závislost tloušťky plechu (d) na výši teploty předhřevu (T_p) pro CET 0,30% "[2]

3.3 Vliv obsahu difúzního vodíku

„Závislost obsahu difúzního vodíku ve svarovém kovu na výši teploty předehřevu vyjadřuje rovnice:

$$T_p = 62H_D^{0.35} - 100 \quad (3.3)$$

která je graficky znázorněná na obr. 9. Rovnice je platná pro CET 0,30%, tloušťku plechu $d = 30\text{mm}$ a tepelný příkon $Q_s = 10\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-1}$. Z průběhu křivky je zřejmé, že vliv difúzního vodíku je podstatný z hlediska výše teploty předehřevu (vyloučení vzniku trhlin za studena iniciovaným vodíkem). Pro svařování se doporučují dobře vysušené elektrody s bazickým obalem ($H_D < 5\text{ml.}(100\text{g})^{-1}$). V případě použití elektrod s celulózovým obalem (CEL) s obsahem difúzního vodíku $H_D < 5\text{ml.}(100\text{g})^{-1}$ je bezpodmínečně nutný předehřev na teplotu 150°C . "[2]



„Obr. 9 Závislost obsahu difúzního vodíku (H_D) na výši teploty předehřevu (T_p) pro CET 0,30% “[2]

3.4 Vliv tepelného příkonu při svařování

„Tepelný příkon počítáme podle rovnice:

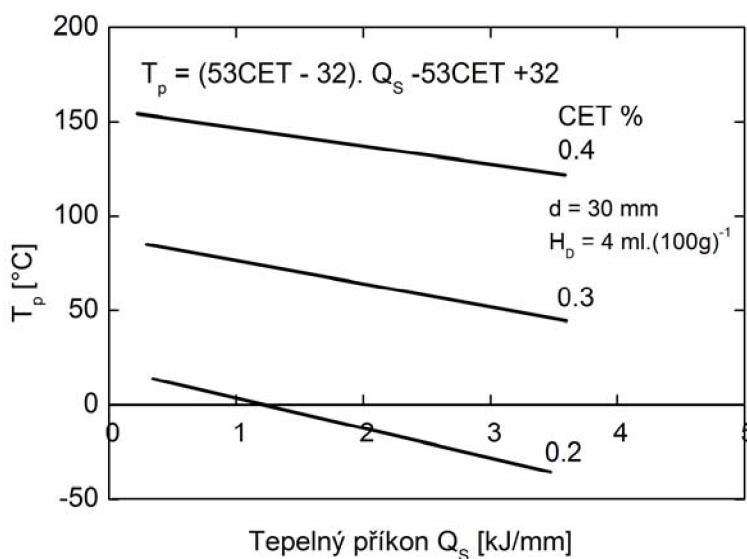
$$Q_s = \eta \frac{U \cdot I}{v \cdot 10^3} [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (3.4)$$

kde U je napětí [V], I proud [A], v rychlost svařování [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$] a η je koeficient účinnosti postupu svařování, podstatně ovlivňuje proces svařování z hlediska teploty předehřevu.

Závislost tepelného příkonu Q_s na teplotě předehřevu T_p pro tloušťku plechu $d = 30 \text{ mm}$, CET 0,2- 0,40% a $H_D = 4 \text{ ml} \cdot (100\text{g})^{-1}$, počítáme podle rovnice:

$$T_p = (53\text{CET} - 32) \times Q_s - 53\text{CET} + 32[\%] \quad (3.4a)$$

je znázorněná na obr. 10. “[2]



„Obr. 10 Závislost tepelného příkonu Q_s na teplotě předehřevu T_p “ [2]

„Z obr. 10 je zřejmé, že se zvyšujícím se tepelným příkonem se snižuje teplota předehřevu. Jde o potvrzení důležitého poznatku náhrady teploty předehřevu tepelným příkonem. Náhrada je zvláště účinná při svařování oceli s nízkou hodnotou CET.“ [2]

3.5 Vliv stavů napjatosti

„Hodnota zbytkového napětí je při svařování vysokopevných ocelí podstatná z důvodu, že mohou dosáhnout hodnoty meze kluzu R_e . Po překročení hodnoty meze kluzu se pnutí odbourávají plastickou deformací. Při tom je důležité, zda stav napjatosti je dvou nebo vícerozměrný v neprospěch vícerozměrného stavu napjatosti.“ [2]

3.6 Výsledná teplota předehřevu

„Za respektování všech výše uvedených vlivů lze teplotu předehřevu počítat podle vzorce:

$$T_p = T_i 750 CET + 160 \tanh\left(\frac{d}{35}\right) = 62H_D^{0.35} + (53CET - 32) \times Q_s - 330 \quad (3.6)$$

při tom teplota T_p vyjadřuje nejnižší teplotu předehřevu při jednovrstvém svařování. Teplota T_i (angl. „interpass“) vyjadřuje teplotu mezihouseňkovou při vícevrstevném svařování. Znovu je nutné uvést, že postup zaručuje svarové spoje prosté trhlin vzniklých za studena, iniciovaných (indukovaných) difúzním vodíkem.“[2]

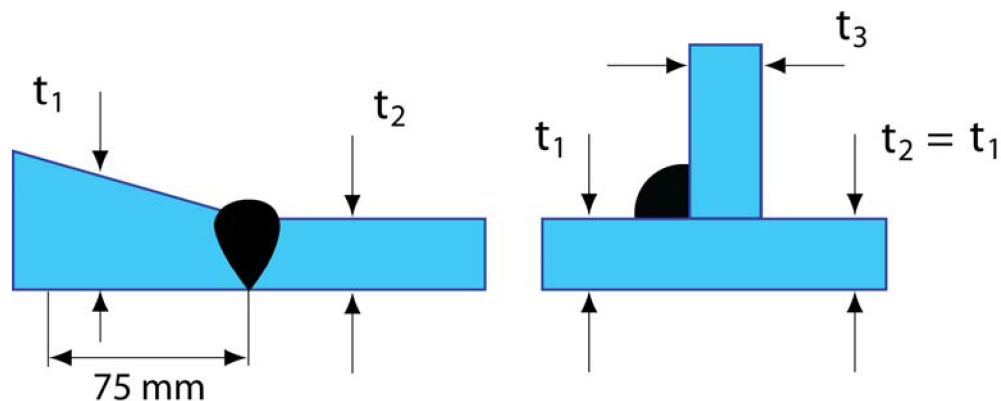
„Uvedený výpočet je platný pro rozsah prvků:

0,05-0,32hm.% C; \leq 0,8hm.% Si; 0,5-1,9hm.% Mn; \leq 1,5hm.% Cr; \leq 0,7hm.% Cu; \leq 0,75hm.% Mo; \leq 0,06hm.% Nb; \leq 2,5hm.% Ni; \leq 0,12 hm. Ti; \leq 0,18 hm. % V; \leq 0,005 hm. % B; při CET v rozsahu 0,2 – 0,5 %, pro tloušťky 5 až 90 mm, pro H_D max. 20 ml. (100g)⁻¹ a pro Q_s 0,5 až 4 kJ*mm⁻¹. Mezihouseňková teplota T_i nesmí přesáhnout teplotu 300°C.“[2]

„Předehřev zásadně volíme vždy v případech, poklesne-li teplota okolí pod 5°C, a dále v případech kdy je základní materiál orosen.“

Z rozboru technologie svařování jemnozrnných (vysokopevných) ocelí vyplývá, že předehřevem a tepelným příkonem lze účinně ovlivňovat ochlazovací rychlost při svařování, která má podstatný vliv na výsledné mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti svarových spojů jemnozrnných ocelí.“[4]

Kombinovaná tloušťka plechu (mm)



„Obr. 11 Kombinace tlouštěk plechu pro předehřev“[4]

Příklady teplot předehřevu, °C*

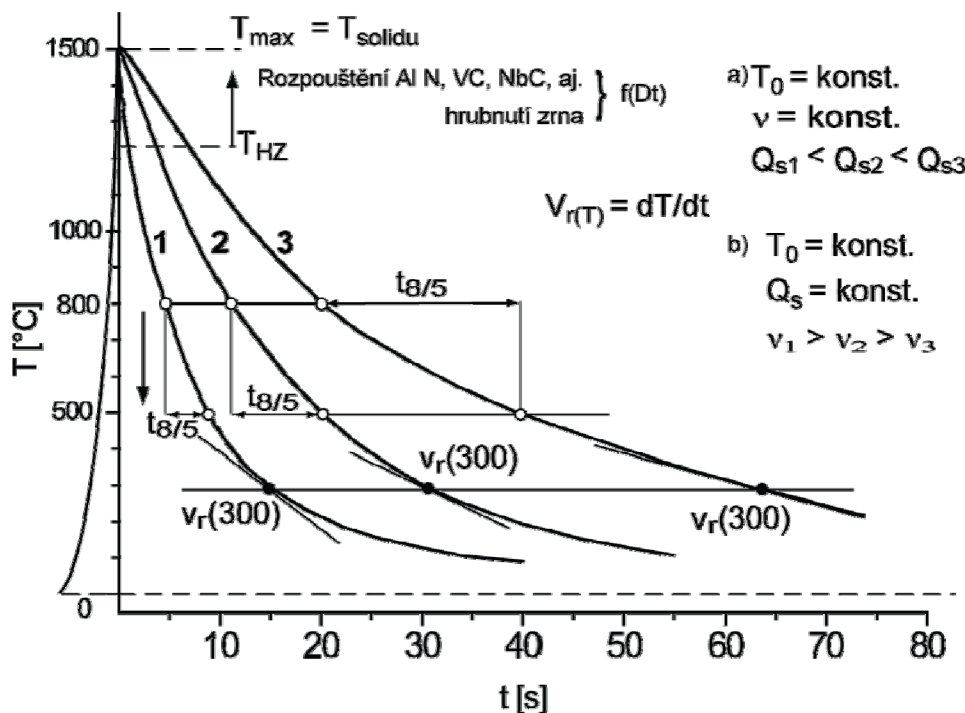
$t_1 + t_2 + t_3 =$	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	
S 355 (St 52-3)				Pokožová teplota								75°C		
WELDOX 700							75°C			100°C		150°C		
WELDOX 900		75°C						100°C				150°C		
WELDOX 960	75°C							100°C				150°C		

*) Uvedené teploty jsou pro svařování s tepelným příkonem 1,7kJ/mm, s obsahem vodíku ve svarovém kovu ≤ 5 ml/ 100g (ISO 3690)

„Obr. 12 Příklady teplot předehřevu“[4]

4. Teplotní cyklus

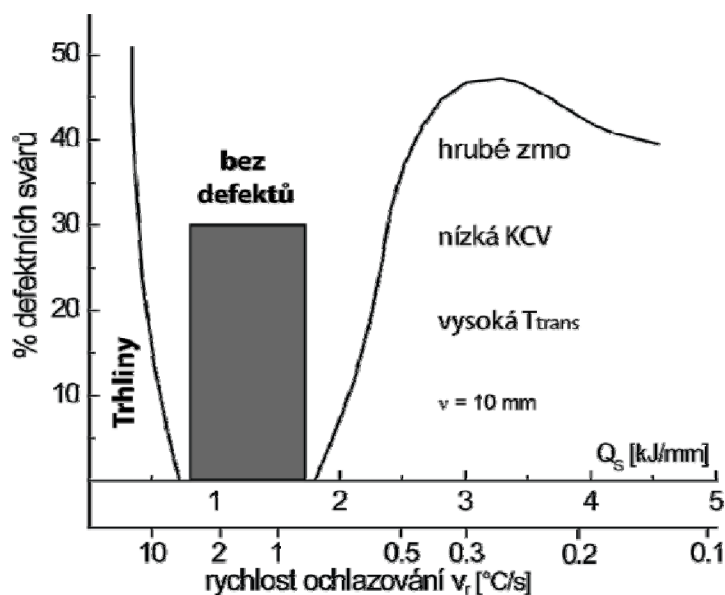
„Změny struktury a vlastností v teplem ovlivněné oblasti bezprostředně souvisí s chemickým složením oceli, strukturním stavem a průběhem teplotního cyklu v blízkosti hranice tavení, kde byla nejvyšší teplota, nejvíce zhrublé zrna a následující ochlazování proběhlo největší rychlostí. Matematický popis celého teplotního cyklu je možný, ale není nutný, neboť jeho průběh se dá jednoznačně specifikovat buď rychlostí chladnutí za určité teploty $v_r(T)$, nebo dobou chladnutí v určitém intervalu teplot (t_{T_1/T_2}), viz obr. 13. Platí pouze za podmínek, že ve zvoleném intervalu teplot neprobíhá fázová transformace, neboť uvolněné latentní teplo by výsledek zkreslilo. Proto se u svařitelných ocelí počítá nebo měří doba chladnutí v intervalu 800-500°C.“[3]



„Obr. 13 Závislost doby ochlazování $t_{8/5}$ a rychlosti chladnutí $v_r(T)$ na průběhu teplotního cyklu.“[3]

„Na obr. 13 jsou naznačeny tři druhy teplotních cyklů odpovídající různým podmínkám svařování. Protože uhlíkové a nízkolegované oceli mají odlišné složení a mají zhruba stejné fyzikální vlastnosti, průběh teplotního cyklu je závislý pouze na velikosti přivedeného tepla Q_s a na rychlosti odvedení, tzn. Je funkcí Q_s , tloušťky plechu, geometrii svaru a výchozí teploty plechu T_0 . Podobný průběh teplotního cyklu může mít svar tenkého plechu při nízkým Q_s nebo tlustého plechu při vysokým Q_s .“[3]

„Výpočet doby chladnutí $t_{8/5}$ nebo rychlosti chladnutí $v_r(300)$ je poměrně rychlý a spolehlivý. Větším problémem je, jakým způsobem dát výsledky výpočtu do souvislosti a daným konkrétním materiálem, neboť zatím není dostatek pokladů pro objektivní rozhodování. Pokud tyto podklady jsou, dá se z nich sestavit optimální rozmezí rychlosti ochlazování (oblast mezi rychlostí, kdy hrozí opožděné trhliny a rychlosti, kdy se nepřipustně zhorší vlastnosti TOO; viz Obr. 13). Optimální dobu nebo rychlost chladnutí je možno považovat za důležitý parametr, který jediným číslem charakterizuje materiál.“[3]



„Obr. 14 Optimální rozmezí rychlosti ochlazování "[3]

5. Svařování metodou TIG

„Jedná se o metodu obloukového svařování netavicí se wolframovou elektrodou v ochranném inerním plynu – TIG (Tungsten Inert Gas), nebo často také nazývané WIG (Wolfram Inert Gas - Německy) či GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) nabízí velmi kvalitní sváry. Při svařování metodou TIG hoří oblouk mezi netavicí se elektrodou a základním materiálem. Příkladný materiál ve formě tyčí se přivádí ručně, nebo automaticky do oblasti oblouku. Elektroda a tavná lázeň je chráněna před okolní atmosférou inerním plynem o vysoké čistotě, minimálně 99,995%. Jako inerní plyn se používá argon, helium nebo jejich směs "[5]

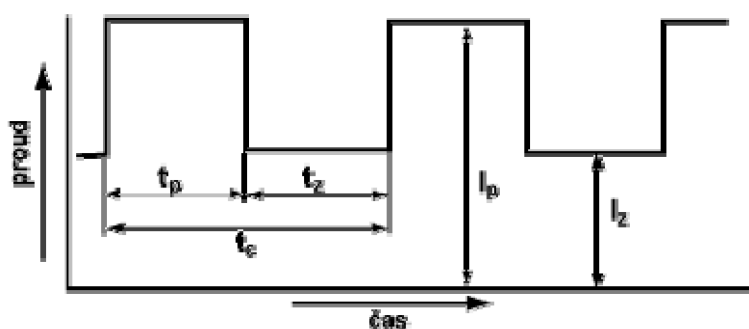
„TIG svařovací metoda se stala velmi populární tam, kde je potřeba velmi kvalitních svárů, operativnost použití, automatizace svařovacího procesu, robotizace atd. TIG metoda umožňuje svařování celé řady materiálů jako uhlíkové a nerezavějící oceli, titan, měď, mosazi, hliník a jeho slitiny, hořčík a jeho slitiny."[5]

„Metoda a svářečky TIG se rozlišují použitým svařovacím proudem na dva druhy. TIG DC a TIG AC / DC. DC - stejnosměrným proudem se svařují oceli,

nerezové oceli a barevné kovy mimo hliníku. AC - střídavým proudem, který má obdélníkový průběh se svařuje hliník a slitiny hliníku."[5]

„V současnosti se pro svařování metodou TIG používají invertní zdroje proudu řízené mikroprocesorem. Jejich přednosti jsou malá váha, vysoký výkon a především velmi kvalitní a stabilní svařovací proud. Pro příležitostné svařování metodou TIG DC je možné používat také svařovací usměrňovače."[5]

„Svářečky TIG DC pracují se stejnosměrným svařovacím proudem, který může být konstantní, nebo impulsní. Impulsní proud mění svoji velikost (pulsuje) mezi maximální a minimální hodnotou (Amp) ve zvolené frekvenci (Hz). Používá se z důvodu větší stability hoření oblouku při svařování slabých materiálů velmi malým proudem."[5]



„Obr. 15 Průběh impulsního proudu "[5]

„U svářeček TIG AC/DC (střídavý a stejnosměrný proud) má střídavý svařovací proud obdélníkový průběh "Square Wave" u kterého dochází ke změně polarity oblouku bez kolísání nastavené hodnoty proudu. Oblouk stabilně hoří a změnou symetrie proudu je možné měnit hloubku průvaru a vyplavování nečistot."[5]

5. 1. Wolframová elektroda – výběr a její příprava

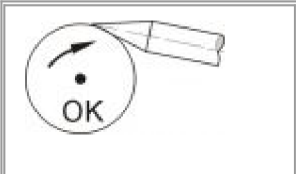

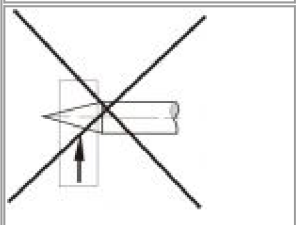

„Protože má wolfram nejvyšší teplotu tavení mezi kovy (3.420 °C) jsou elektrody používané pro svařování metodou TIG vyráběny z wolframu čisté bez příměsí o čistotě 99,9 %W, nebo legované oxidy kovu thoria - (Th), lanthanu (La), ceru (Ce), zirkonu (Zr) nebo yttria (Y), které jsou v elektrodě rovnoměrně rozptýleny. Přísada oxidů snižuje teplotu ohřevu elektrody o 1000°C, zvyšuje životnost, zlepšuje se zapalování oblouku a jeho stabilitu. Wolframová elektroda není spotřebovávaná během svařovacího procesu, ačkoliv se vyskytuje vypalování, eroze a ubývání elektrody – tzv. „Burn-off“ efekt. Elektrody jsou chemicky čištěné, broušená na optimální rozměr a následně leštěné z důvodu optimálního tepelného vedení. Průměry elektrod jsou od 0,5mm do 6,4mm. Nejběžněji jsou používány průměry od 2 - 3,2mm – dle použití. Délka elektrod je od 75-610mm, nicméně nejčastěji jsou používány 50, 75, 150 a 175mm.“[7]

„Rovněž způsob broušení je velmi důležitým faktorem úspěšného TIG svařování: Wolframové elektrody je nutné před použitím připravit, přesněji zbrousit do špičky. Hlavním prvkem určujícím úhel zbroušení je svařovací proud, kterým budeme svařovat.“[7]

	Úhel (°)	Svařovací proud (A)
	30	0-30
	60-90	30-120
	90-120	120-250

„Obr. 16 Úhel broušení pro různý svařovací proud“[7]

„Správnou volbou wolframové elektrody a její přípravou ovlivníme vlastnosti a geometrii svařovacího oblouku a životnost elektrody. Elektrodu je nutné jemně brousit v podélném směru dle obr. 16 níže.“[7]

		Jemné a rovnoměrné broušení elektrody v podélném směru – trvanlivost až 17 hodin
		Hrubé a nerovnoměrné broušení v příčném směru - trvanlivost 5 hodin

„Obr. 17 Správné broušení elektrody“[7]

5.2 Přídavné materiály

„Složení legur přídavného materiálu a typu obalu, ochranný plyn, popřípadě tavidlo určují vlastnosti svarového kovu. V zásadě musí být splněny dvě podmínky pro dosažení kvalitativně hodnotných svarových spojů jemnozrnných ocelí:

- a) dosažení minimální hodnoty pevnosti a tažnosti základního materiálu ve spoji
- b) svarové spoje musí být provedeny bezchybně

Přídavné materiály se volí s ohledem na požadované hodnoty svarového kovu, musí odpovídat podmínkám svařování (vnesené teplo, přechodová teplota) a eventuálnímu tepelnému zpracování. Proto musí tyto materiály zajistit, aby se při daných podmínkách svařování, které jsou určeny základním materiálem, konstrukcí a výrobními podmínkami, zamezilo vzniku vad typu studených trhlin a trhlin za horka.“[8]

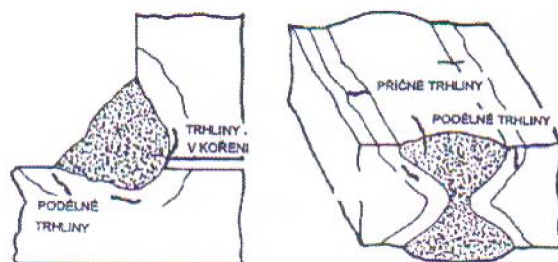
„Tab. 5 TIG svařovací dráty pro svařování jemnozrnných ocelí“[7]

Obchodní značení	Označení norem				Chemická analýza					
	Klasifikace				(střední hodnoty) [%]					
přídavného materiálu	EN		ASME/SFA		C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo
OE-Mo	12070	W Mo Si	5.28	ER 80 S-G	0,10	1,1	0,6			0,5
OE-CrMo1	12070	W Cr Mo 1 Si	5.28	ER 80 S-G	0,10	1,0	0,6	1,1		0,5
OE-CrMo2	12070	W Cr Mo 2 Si	5.28	ER 90 S-G	0,08	1,1	0,6	2,6		1,0
OE-CrMo5	12070	W Cr Mo 5	5.9	ER 502	0,06	0,5	0,45	5,8		0,6
OE-Ni38R	12070	W 426 W3Ni1	5.28	ER 80 S-G	0,14	1,4	0,6		1,2	P,S
OE-2,5Ni	12070	W 466 W2Ni2	5.28	ER 80 S-Ni2	0,10	1,3	0,6		2,5	P,S

6. Studené trhliny

„Studené trhliny jsou defekty, které vznikají při nízkých teplotách asi pod 200°C. Vyskytují se nejčastěji v podhousenkové oblasti svarových spojů ocelí. Mohou se ale i vyskytovat v kořenové oblasti, koncových oblastech spojů, tak i ve svarovém kovu. Orientací mohou být podélné, příčné, přes všechny oblasti svarového spoje. Studené trhliny jsou transkrystalického charakteru, povrch je lesklý, neoxidovaný, na rozdíl od trhlín za horka. Hlavní příčinou vzniku studených trhlín je vzájemné působení tří faktorů:

- přítomnost vodíku ve svarovém spoji;
- přítomnost struktury citlivé na účinek vodíku;
- přítomnost tahových (kontrakčních) zbytkových napětí; "[1]



„Obr. 18 Typy studených trhlin"[1]

„Zdrojem vodíku ve svaru je nejčastěji atmosférická vlhkost, vlhkost z obalu elektrod příp. tavidel, svařovací dráty po povrchové úpravě. Rozpustnost a rozložení vodíku ve svarovém kovu závislé na teplotě, konstrukci a typu vměstků, mikropórů a dislokací. Vodík difunduje v souladu s deformačními procesy ve svaru a s přeměnou $\gamma \rightarrow \alpha$ do TOO dle obr. 17. Obsah vodíku ve svarovém kovu měříme obvykle rtuťovou a glycerinovou zkouškou. Náchylnost oceli na vzniku studených trhlin úzce souvisí s prokalitelností, resp. transformačním zkřehnutím. Souhrnný vliv chemického složení na náchylnost oceli na zakalení v TOO, a tím i na náchylnost vzniku trhlin za studena lze vyjádřit uhlíkovým ekvivalentem [3.1]."[1]

„Transformační zkřehnutí TOO je dané chemickým složením oceli, aplikovaným svařovacím cyklem, který je vyjádřen např. časem ochlazování $t_{8/5}$. Průběh svařovacího cyklu lze ovlivnit změnou technologie svařování, změnou svařovacích parametrů, použitím přehřevu a dohřevu." [1]

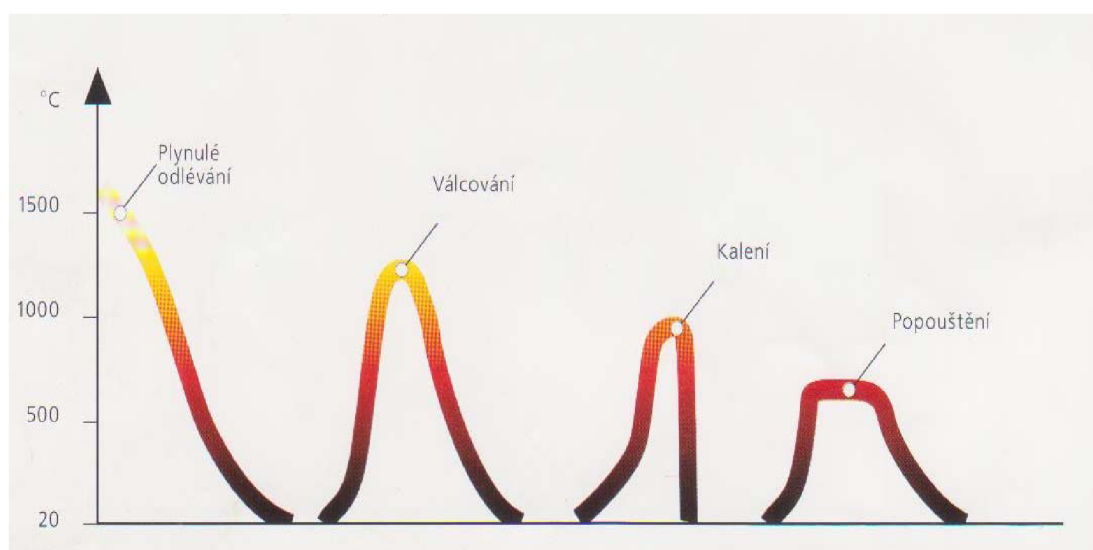
7. Materiál na experimenty

„Pro experiment je použit materiál značky Weldox od firmy SSAB. Weldox jsou konstrukční vysokopevné otěruvzdorné plechy s mezemi kluzu od 420 do 1111 MPa. Jejich podstata je v dosažení daného pevnostního stupně při zachování co nejlepší svařitelnosti.“[4]

„Pro dosažení vysokých kvalit tohoto materiálu je zapotřebí dodržet výrobní proces, který je založen na kvalitní železné rudě a na moderním plynulém odlévání oceli. Tyto výchozí podmínky jsou základem pro dobrý konečný produkt. Materiál je ohříván na teplotu 1200°C a poté válcovaný na kvarto stolicí na požadovanou tloušťku a mikrostrukturu, která je nejlépe vhodná pro následný proces ochlazování.“[4]

„Plechý určené pro kalení a popouštění jsou poté ochlazovány na vzduchu a přepraveny do kalírny. Plechý jsou prudce ochlazený z teploty 900°C na pokojovou teplotu proudem vody v kalícím lisu.“[4]

„Pro následné popouštění na 580 až 650°C mají plechý Weldox vysokou pevnost, jednotnou ve všech místech plechu, dobrou houževnatost a výbornou opracovatelnost a technologičnost. Intenzivní kalení v proudu vody ve válcovém kalícím lisu můžeme eliminovat množstvím legujících přísad, potřebných k dosažení daného pevnostního stupně intenzitou kalícího procesu. Takto je dosaženo nízkých hodnot uhlíkového ekvivalentu CET, což má příznivý vliv na svařitelnost.“[4]



"Obr. 19 Teplotní průběh při výrobě oceli a dalších úpravách,„[4]

„Konkrétní materiál bude Weldox 700, jedná se konstrukční ocel určenou pro aplikace, kde jeho vysoká pevnost umožňuje ušetřit hmotnost. Celkově je největší podíl vysokopevných ocelí používán na mobilní jeřáby. Současné požadavky na nosnost těchto zařízení jsou takové, že u výložníků mobilních jeřábů se používají většinou oceli o mezi kluzu $Re = 900$ až 960 MPa místo kdysi původního standardu s $Re = 700$ MPa. Aby mobilní jeřáb o kapacitě např. 500 tun mohl vyjet na silnici (limity zatížení náprav, celková hmotnost), používají se oceli s $Re = 700, 900$ a 960 MPa z důvodů vylehčení konstrukce i na ostatních částech tohoto výrobku. Materiál tohoto složení se používá pro dopravníky, důlní výztuže, zkušební rámy pro letecké motory a zemědělské stroje. " [4]

7.1 Chemické a mechanické vlastnosti

Tab. 6. Chemické složení WELDOX 700

C	Si	Mn	P	S	B	Nb	cr	V	Cu	Ti	Al	Mo	Ni	N
max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	max	min	max	max	max
%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0,20	0,60	1,60	0,020	0,010	0,005	0,04	0,70	0,09	0,30	0,04	0,015	0,70	2,0	0,015

Tab. 7 Mechanické vlastnosti WELDOX 700

Tloušťka plechu (mm)	Mez kluzu Rp0,2 min N/mm ²	Pevnost tahu R _m N ² /mm
4 - 50	700	780-930
50 - 100	650	780-930

7.2 Experimentální část práce

Pro stanovení vlivu vneseného tepla na vybrané vlastnosti svaru byla použita ocel WELDOX 700 o tloušťce 5 mm. Typické chemické složení oceli je uvedeno v tab. 6. Je to jemnozrnná mikrolegovaná ocel, jejíž výrobní postup znázorňuje obr. 19. Její výrobce (SSAB) uvádí pro tloušťku 4 až 50 mm smluvní mez kluzu R_{P02} hodnotu 700MPa, mez pevnosti 780 až 930MPa. Ocel je svařitelná, do součtové tloušťky 40 mm se nepředehřívá, od 40 do 90 mm je doporučená teplota předehřevu 75⁰C, od 90 do 110 mm se předehřívá na 100⁰C a od 110 do 130 mm na 150⁰C. Uvedené teploty platí pro svařování s tepelným příkonem (specifickým vneseným teplem) 1,7kJ.mm⁻¹, s obsahem vodíku ve svarovém kovu do 5ml. 100g⁻¹.

Jako zdroj tepla byl použit hořák TIG firmy FRONIUS a svařovací zdroj MAGIC WAVE stejné firmy. K zajištění konstantní rychlosti hořáku byl použit automatický pojezd, (viz obr. 20)



Obr. 20 Automatický pojezd.

Bylo provedeno 9 nátavů (ohřevů) různými parametry bez přehřevu zkušebních plechů a bez přídavného materiálu. U každého nátavu byla vypočítána hodnota specifického vneseného tepla, dokumentována makro a mikrostruktura, změřen průběh tvrdosti a provedeny tahové zkoušky.

Specifické vnesené teplo je počítané ze vztahu:

$$Q_s = \eta \frac{U \cdot I}{10^3 \cdot v_s} \left[\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1} \right] \quad (7.2)$$

kde: η je účinnost přenosu tepla (pro svařování TIG má hodnotu 0,65)

U napětí na oblouku (V)

I proud (A)

v_s postupná rychlost zdroje tepla ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

7.3 Nátav č. 1

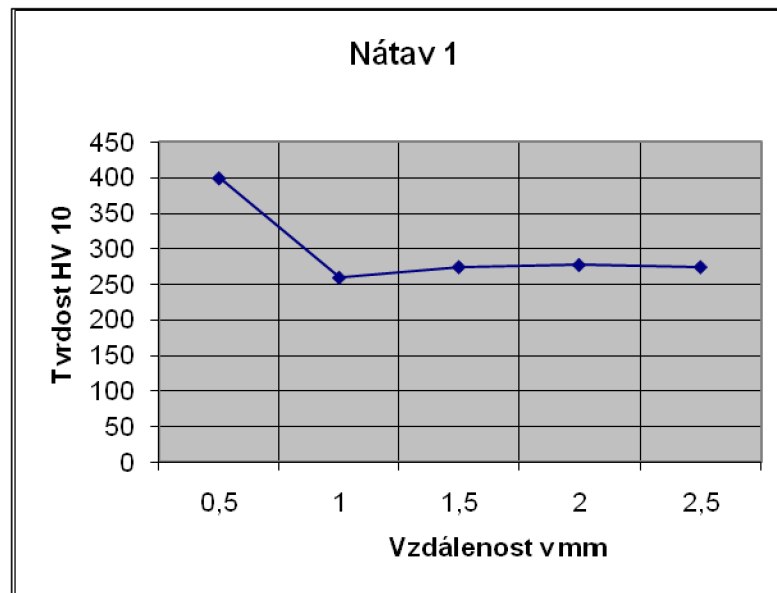
Parametry oblouku: $U = 8,3 \text{ V}$, $I = 30 \text{ A}$, $v_s = 0,5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Vzdálenost elektrody od povrchu plechu $l = 2 \text{ mm}$.

Vnesené teplo $Q_s = 0,324 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$; vypočteno podle vztahu 7.2.

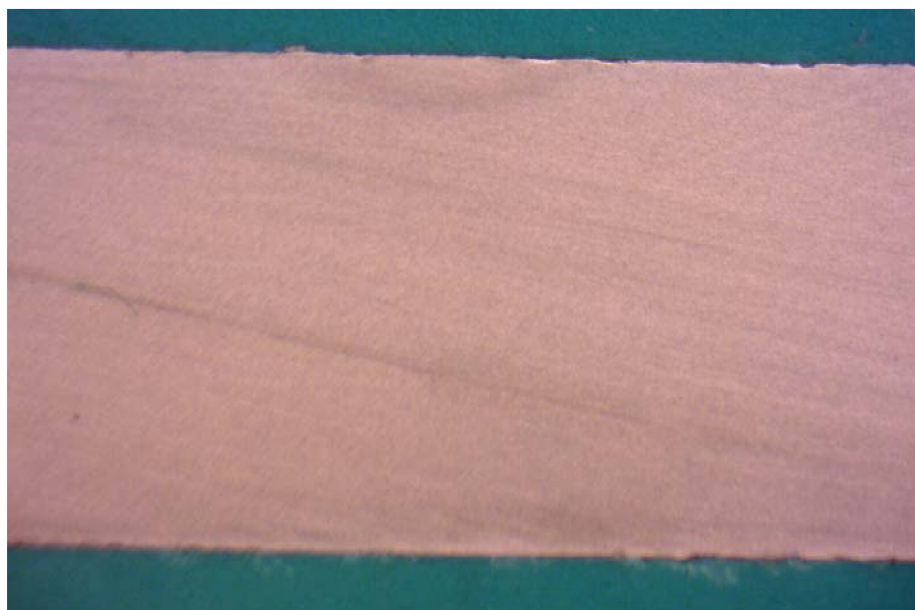
Tab. 8 Naměřené hodnoty

Vzdálenost [mm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5
Tvrdość HV 10	0	399	259	274	277	274

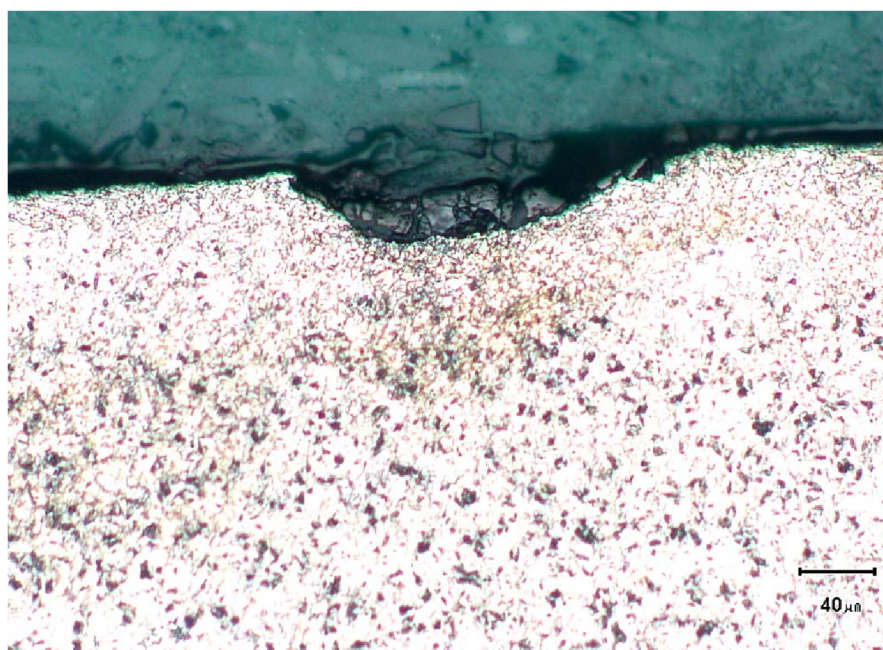
Graf. 1. Závislost tvrdosti na vzdálenosti



Na zkušebním vzorku č.1 je zřejmé, že svařovací proud je příliš malý a tím pádem nedochází k dostatečnému provaření vzorku (viz obr. 21). Materiál není nataven, TOO téměř neznatelná



Obr. 21 Nátav č. 1 (makro).



Obr. 22 Nátav č. 1 (mikro).

TOO o šířce cca 0,06mm tvoří jen pásmo částečné překrytalizace. Chybí jak pásmo přehřátí, tak pásmo normalizace.

7.4 Nátav č. 2

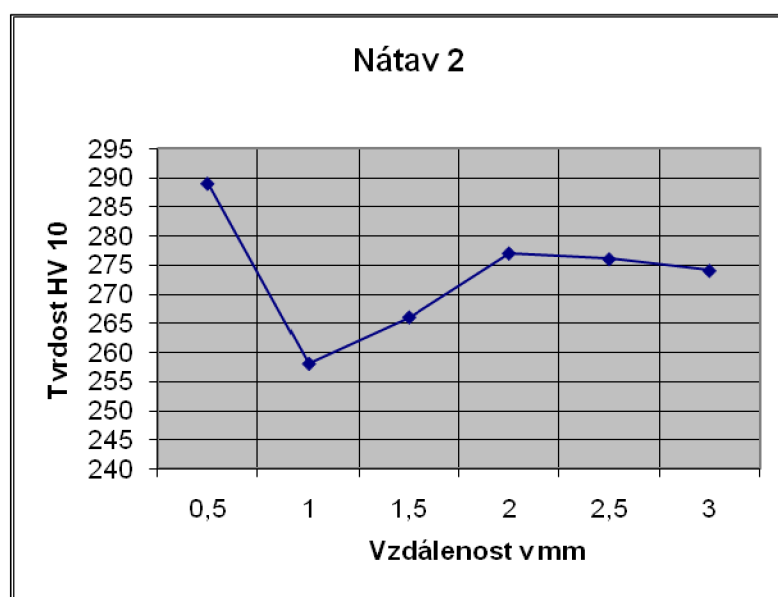
Parametry oblouku: $U = 9,4 \text{ V}$, $I = 30 \text{ A}$, $v_s = 0,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $l = 2 \text{ mm}$.

Vnesené teplo $Q_s = 0,366 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$; vypočteno podle vztahu 7.2.

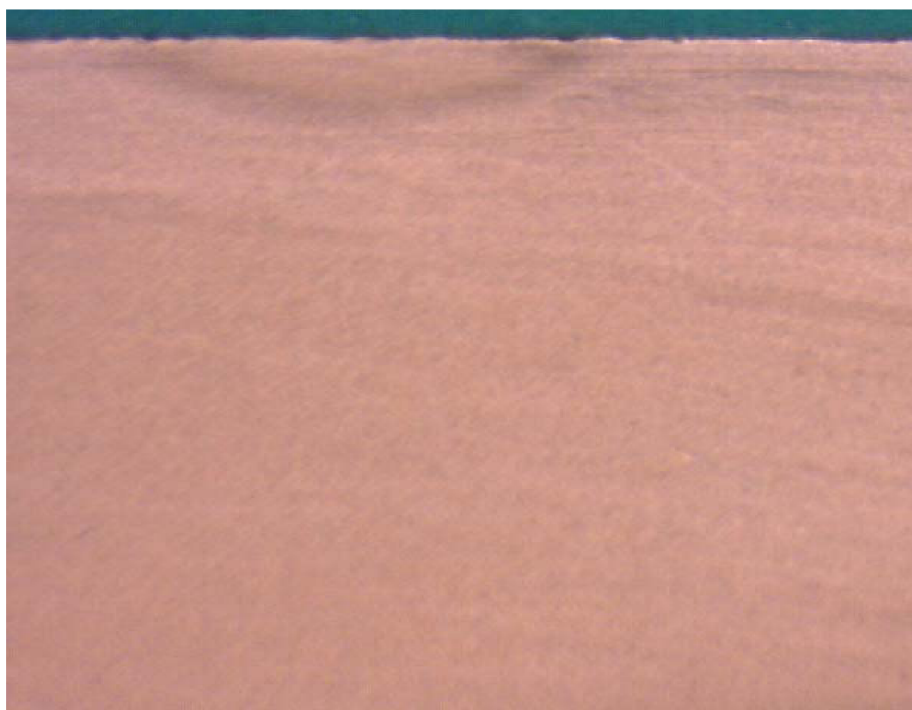
Tab. 9. Naměřené hodnoty

Vzdálenost [mm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3
Tvrdość HV 10	0	289	258	266	277	276	274

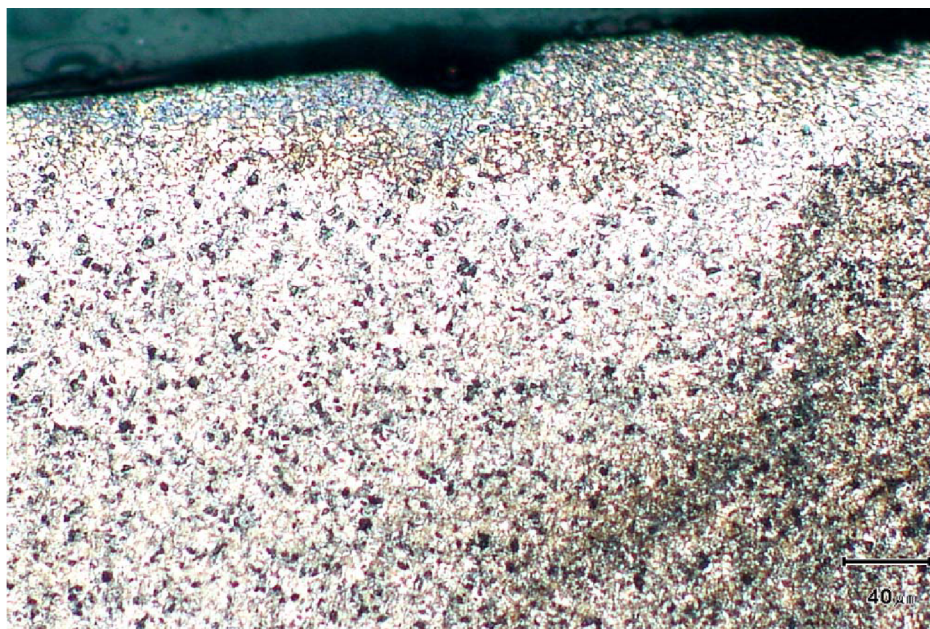
Graf. 2. Závislost tvrdosti na vzdálenosti



U zkušebního vzorku č.2 nastala stejná situace jako u předchozího vzorku č.1. Mlívem malého vneseného tepla nedochází jak k natavení, TOO je již zřetelná. (viz obr. 23).



Obr. 23 Nátav č. 2 (makro).



Obr. 24 Nátav č. 2 (mikro).

Na obrázku 24 je vidět nepatrný objem taveniny, TOO je tvořena pásmem normalizace a pásmem částečné rekrystalizace.

7.5 Nátav č. 3

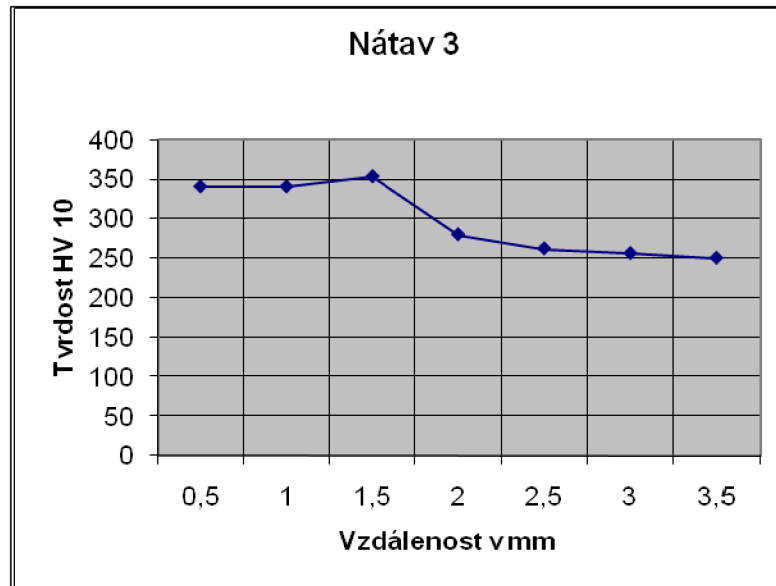
Parametry oblouku: $U = 10,8 \text{ V}$, $I = 50 \text{ A}$, $v_s = 0,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $l = 2 \text{ mm}$.

Vnesené teplo $Q_s = 0,702 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$; vypočteno podle vztahu 7.2.

Tab. 10. Naměřené hodnoty

Vzdálenost [mm]	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
Tvrdość HV 10	0	341	341	354	280	262	256	250

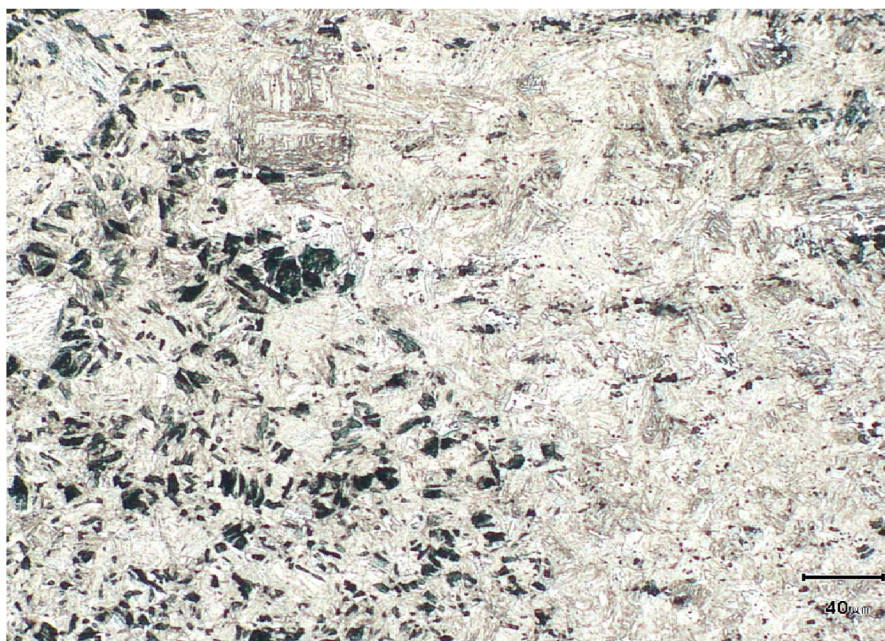
Graf. 3. Závislost tvrdosti na vzdálenosti





Obr. 25 Nátav č. 3 (makro).

Povrch je bez taveniny, TOO je tvořena už i s pásmem přehřátí, začínajícím hrubým zrnem. Hloubka TOO je asi 1mm.



Obr. 26 Nátav č. 3 (mikro).

7.6 Nátav č. 4

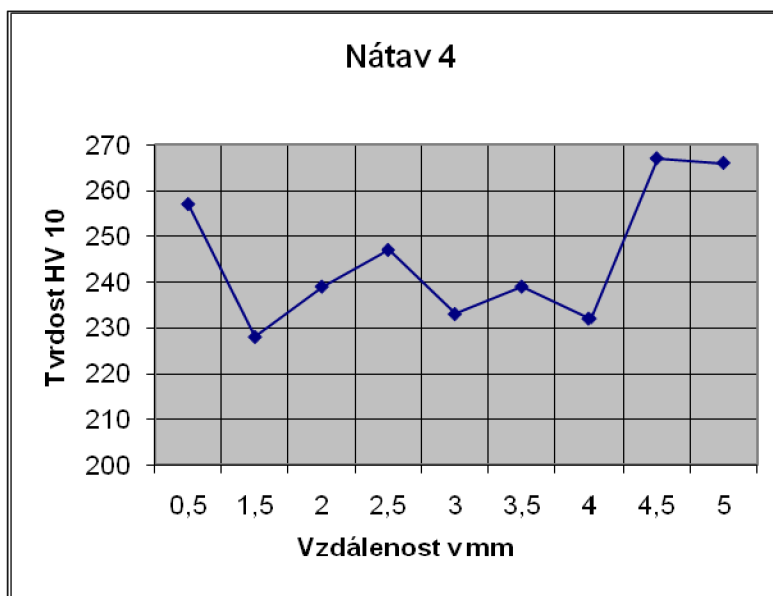
Parametry oblouku: $U = 11,6 \text{ V}$, $I = 70 \text{ A}$, $v_s = 0,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $l = 2 \text{ mm}$

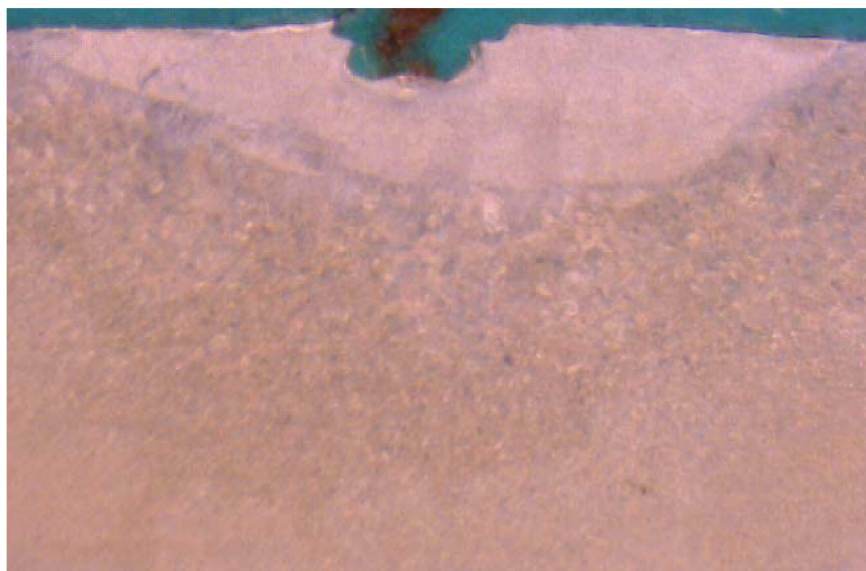
Vnesené teplo $Q_s = 1,056 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$; vypočteno podle vztahu 7.2.

Tab. 11. Naměřené hodnoty

Vzdálenost [mm]	0	0,5	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Tvrdość HV 10	0	257	228	239	247	233	239	232	267	266

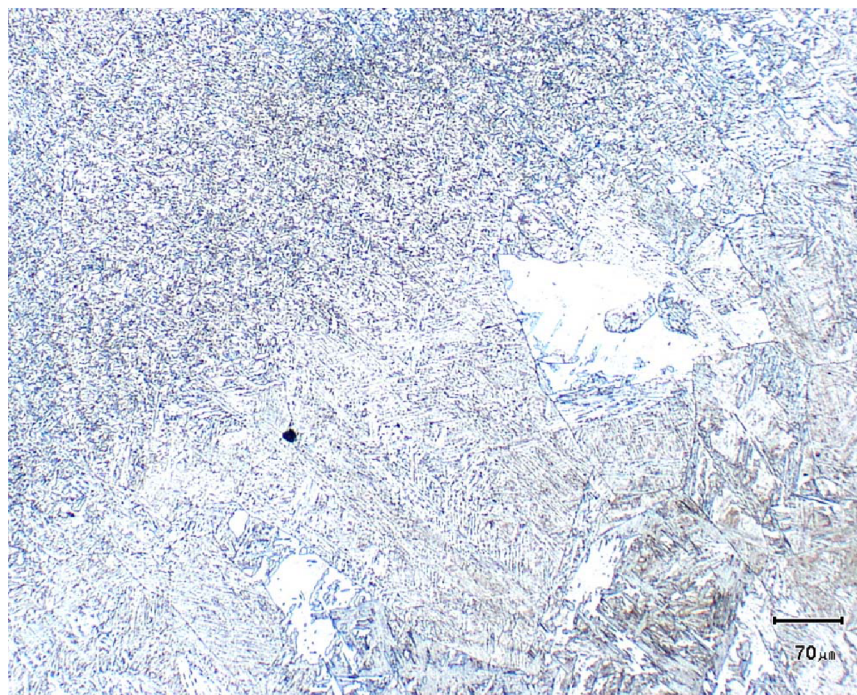
Graf. 4. Závislost tvrdosti na vzdálenosti





Obr. 27 Nátav č. 4 (makro).

Povrch vzorku je nataven do hloubky přibližně 1mm, pod hranicí tavení je TOO široká 2mm.



Obr. 28 Nátav č. 4 (mikro).

Hranice taveniny (zleva na hoře) a přehřátého hrubozrnného pásma TOO (vpravo dole).

7.7 Nátav č. 5

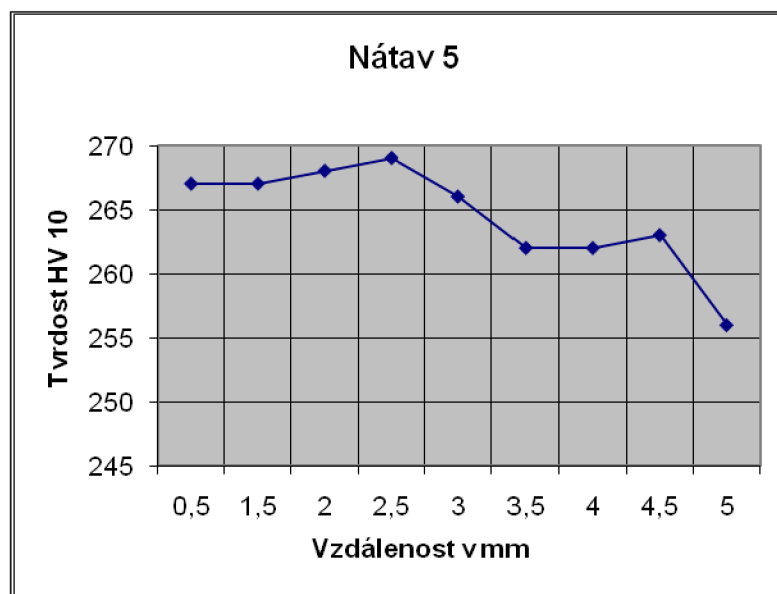
Parametry oblouku: $U = 12,9 \text{ V}$, $I = 90 \text{ A}$, $v_s = 0,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $l = 2 \text{ mm}$

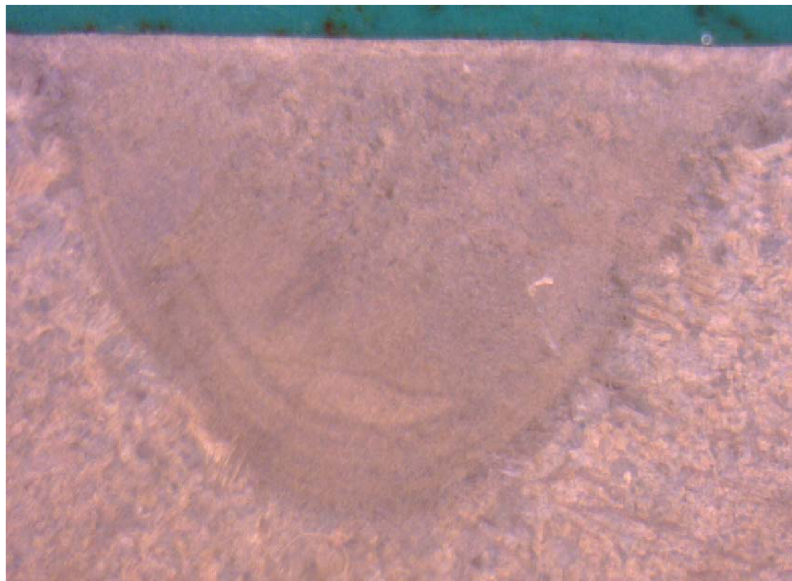
Vnesené teplo $Q_s = 1,509 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$; vypočteno podle vztahu 7.2.

Tab. 12. Naměřené hodnoty

Vzdálenost [mm]	v	0	0,5	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Tvrdość HV 10	0	0	267	267	268	269	266	262	262	263	256

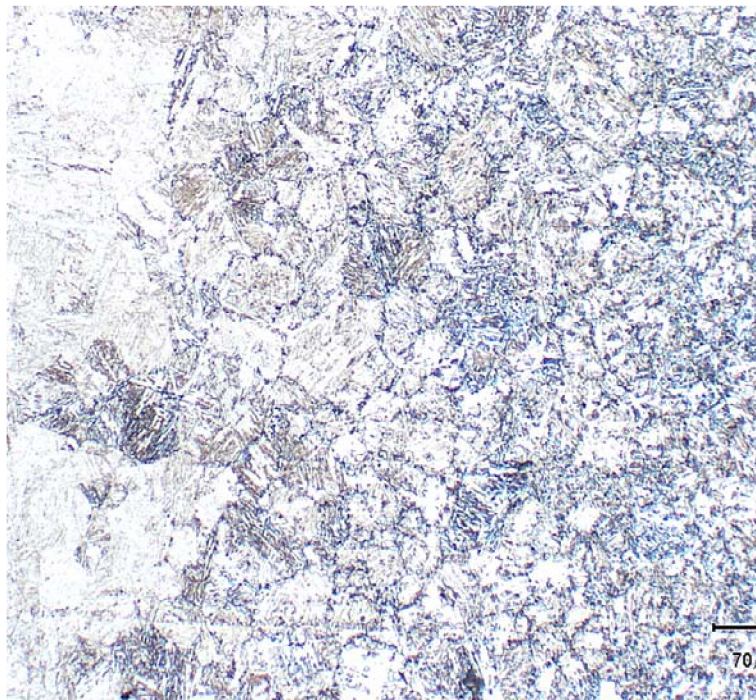
Graf. 5. Závislost tvrdosti na vzdálenosti





Obr. 29 Nátav č. 5 (makro).

Tavenina zasahuje téměř celou tloušťku vzorku. Zřetelné je zde velmi hrubé zrno v přehřátém pásmu TOO.



Obr. 30 Nátav č. 5 (mikro).

TOO: přechod mezi přehřátým pásmem a pásmem normalizace.

7.8 Nátav č. 6

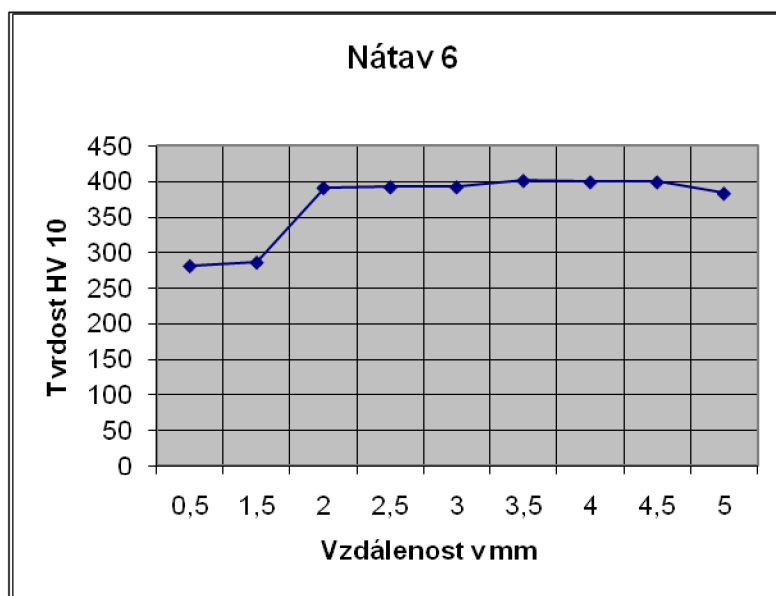
Parametry oblouku: $U = 13,4 \text{ V}$, $I = 100 \text{ A}$, $v_s = 0,5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$, $l = 2 \text{ mm}$

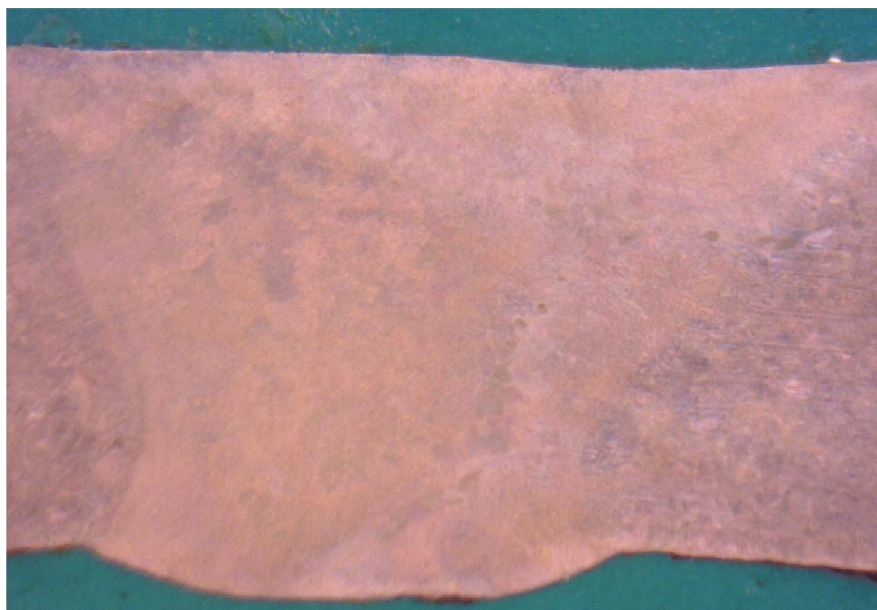
Vnesené teplo $Q_s = 1,742 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$; vypočteno podle vztahu 7.2.

Tab. 13 Naměřené hodnoty

Vzdálenost η]	v	0	0,5	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Tvrdość HV 10		0	281	286	391	392	392	401	399	399	383

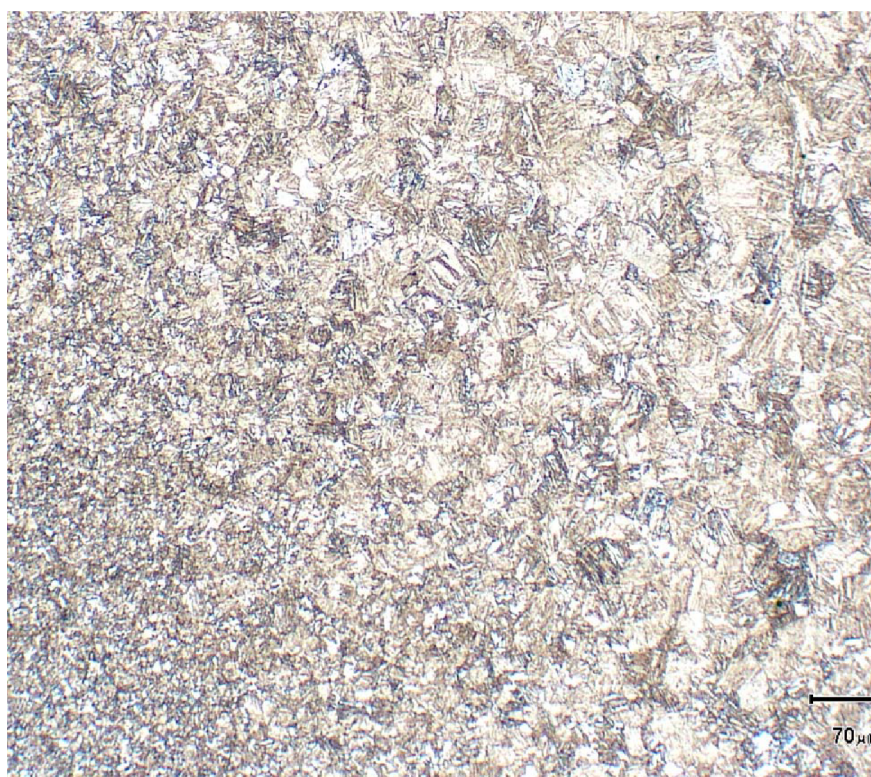
Graf. 6. Závislost tvrdosti na vzdálenosti





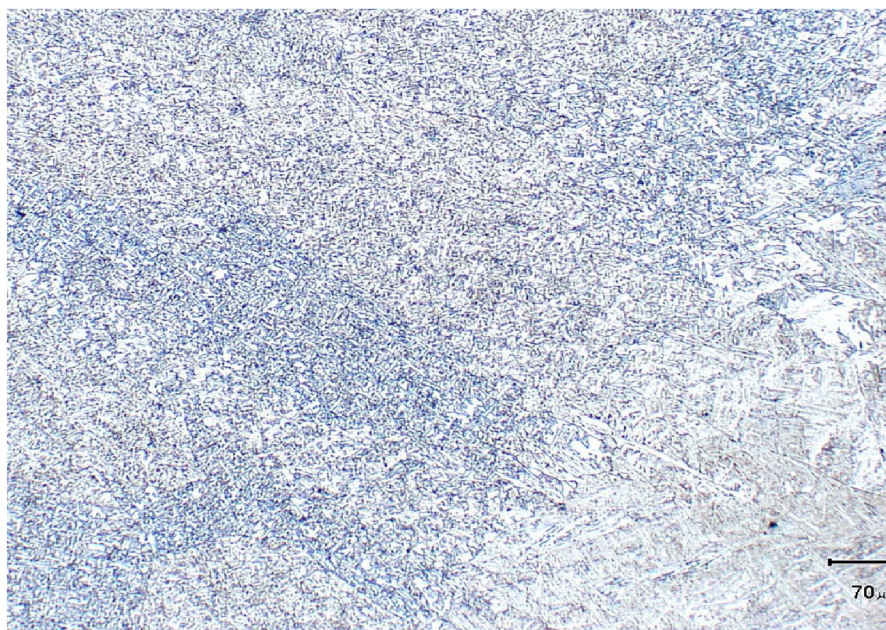
Obr. 31 Nátav č. 6 (makro).

Celá tloušťka vzorku je protavena, o čem svědčí propadlý kořen.



Obr. 32 Nátav č. 6 (mikro).

Přechod mezi pásmem normalizace (vlevo) a pásmem přehřátí (vpravo).



Obr. 33 Nátav č. 6 (mikro). Hranice mezi taveninou (vlevo) a pásmem přehřátí

7.9 Shrnutí výsledků experimentů

Z fotodokumentace makrovýbrusů je zřejmé, že menší vnesené teplo, než bylo použito u nátavu 5 ($1,5 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$) není pro svařování této oceli tloušťky 5 mm možno použít. U „nátavu“ 1 a 2 (viz obr. 21 a obr. 23) k natavení vůbec nedošlo, změny ve struktuře jsou nepatrné, téměř žádné. U nátavu č. 3 (viz obr. 25) nebyl materiál také nataven, přesto je již na obr. 26 zjevné zhrubnutí zrna. Nátavy 4, 5 a 6 už obsahují svarový kov, nátav č. 4 však v tak malém objemu, že pro svařování není použité vnesené teplo dostatečné. U nátavu č. 6 (viz obr. 31) je materiál protavený v celé tloušťce ($Q_s = 1,742 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$). Je zde zřejmý propadený kořen. Pro svařování zadané tloušťky se jako optimální jeví parametry použité u vzorku 5 i s ohledem na tvar svarové plochy (l, styčná mezera 1 mm).

Měření tvrdosti jednotlivých nátavů bylo prováděno vždy od povrchu nahřívané plochy v ose kolmé na povrch. Výsledky měření jsou však tak rozdílné, že z nich není možné stanovit jednoznačný závěr. Proto byla experimentální část práce doplněna dalšími nátavy (Nátavy 7,8 a 9), u nichž

byla pozornost zaměřena na metalografii a některé mechanické vlastnosti tepelně ovlivněné oblasti.

Nátav 7

Parametry oblouku: $I = 120 \text{ A}$, $l = 2 \text{ mm}$, $v_s = 3 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ($0,5 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$)

Vnesené teplo $Q_s = 2,28 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$; vypočteno podle vztahu 7.2.

Nátav 8

Parametry oblouku: $I = 80 \text{ A}$, $U = 12,8 \text{ V}$, $l = 2 \text{ mm}$, $v_s = 3 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$,

Vnesené teplo $Q_s = 1,33 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$; vypočteno podle vztahu 7.2.

Nátav 9

Parametry oblouku: $I = 95 \text{ A}$, $U = 13,2 \text{ V}$, $l = 2 \text{ mm}$, $v_s = 3 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$

Vnesené teplo $Q_s = 1,63 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$; vypočteno podle vztahu 7.2.

Z jednotlivých nátavů byly zhotoveny vzorky pro metalografické hodnocení makro a mikrostruktury, pro měření tvrdosti a pro tahovou zkoušku. Nátav č. 7 nebyl do hodnocení zahrnut, vnesené teplo bylo příliš velké a svar se propadl.

7.10 Tahová zkouška

Pro tahové zkoušky byla z každého provedeného nátavu pomocí vzduchové plazmy vyřezána tři tělíska o rozměrech 5×10 (cca) $\times 180 \text{ mm}$. Po odstranění otřepů byla podrobena tahové zkoušce na trhacím stroji ZD 40. (obr. 35.). Záznam zkoušek je uveden na obr. 36 a 37.



Technické parametry:

- Výrobce: HBM /SRN/
- Měřicí rozsah: $8 \div 400 \text{ kN}$
- Chyba měření síly: $1/100$ jmenovitého rozsahu síly, tj. $\pm 1 \%$ odpovídá třídě přesnosti 1
- Měřicí rozsah měření dráhy: $0 \div 280 \text{ mm}$
- Chyba měření dráhy: $\pm 0,01 \text{ mm}$

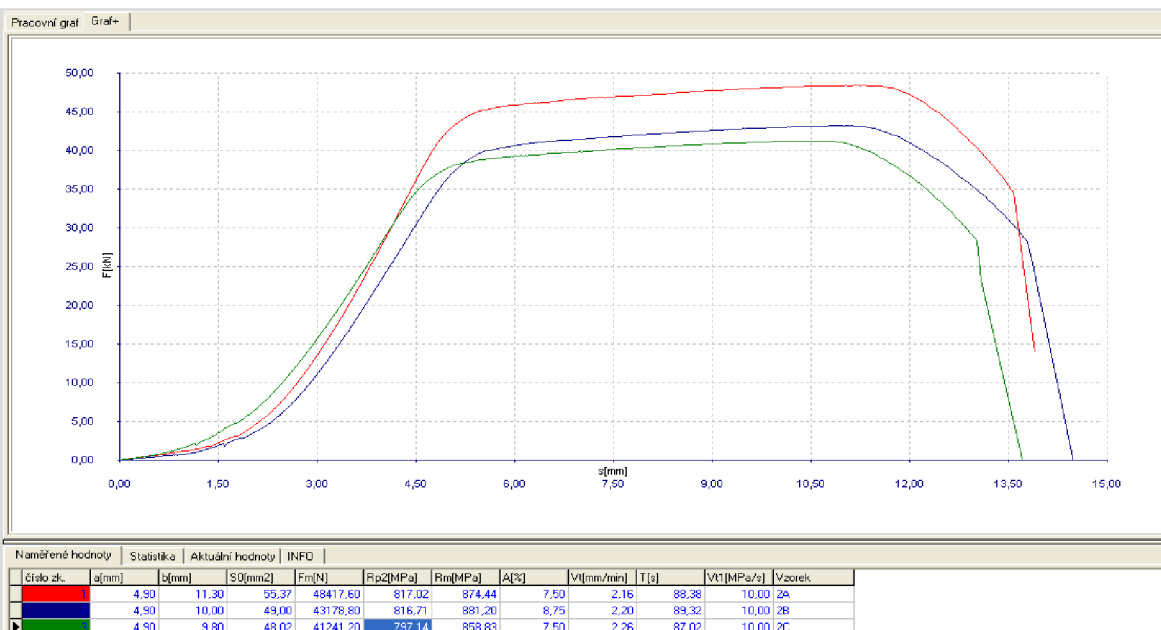
Obr. 35 Trhací stroj ZD 40.

Všechna zkušební tělíška byla přetržena ve stejném místě, vzdáleném přibližně 9 mm od osy nátavu, jak dokazuje obr 38. K přetržení dochází v oblasti tepelně neovlivněného základního materiálu, což je typické pro svařitelné vysokopevnostní oceli tohoto typu. V oblasti svaru, (tj. svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti) dochází ke zpevnění. Běžné svařitelné oceli se porušují v TOO v přehřátém pásmu, tam, kde se vyskytuje nejhrubší struktura. Všechny vzorky se vyznačují přijatelnou tažností (7 až 9%) a mezí kluzu vždy vyšší (více jak o 100 MPa), než jakou udává výrobce (viz. tabulka 7). Rozptyl výsledků měření je minimální.

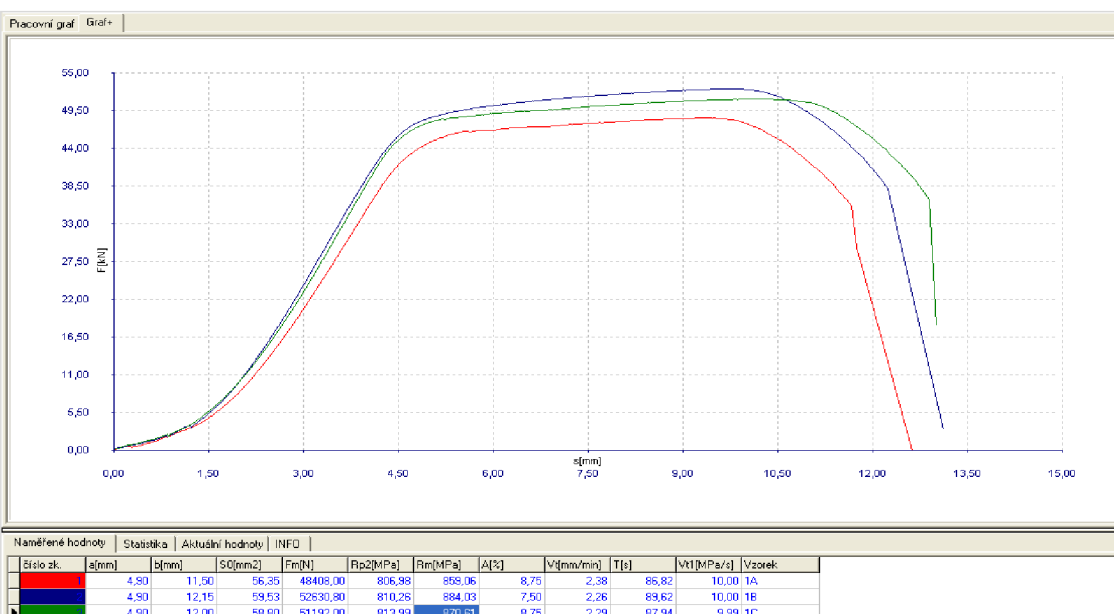
Z výsledků tahové zkoušky lze stanovit následující dílčí závěry:

- svařování oceli WELDOX 700 5mm tlusté nevyžaduje předehřev,
- ocel není při této tloušťce citlivá na velikost vneseného tepla

Při svařování větších tlouštěk (výrobce udává 40 mm a více) by se stala rozhodujícím faktorem rychlost ochlazování, tj. teplotní gradient z místa svařování do relativně studeného základního materiálu. V tom případě by hrozil výskyt křehkých struktur v TOO a nebezpečí vzniku studených trhlin. Pro tyto tloušťky by bylo vhodné hodnocení doplnit o zkoušku s dynamickým charakterem zatěžování – zkoušku rázem v ohybu. Svařování tlouštěk nad 40 mm vyžaduje předehřev.



Obr. 36 Tahový diagram nátavu 8.



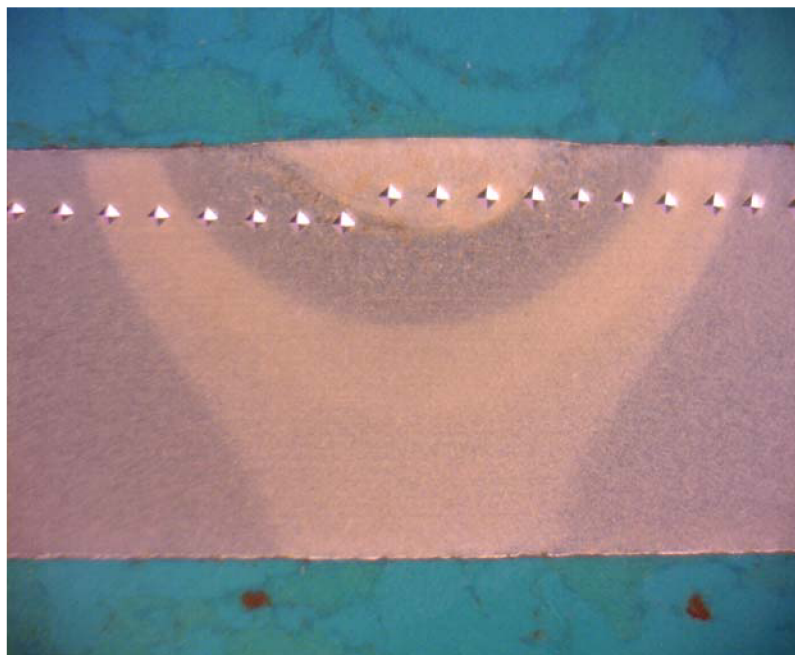
Obr. 37 Tahový diagram nátavu 9.



Obr. 38. Vzorky po zkoušce tahem.

7.11 Metalografické hodnocení a měření tvrdosti

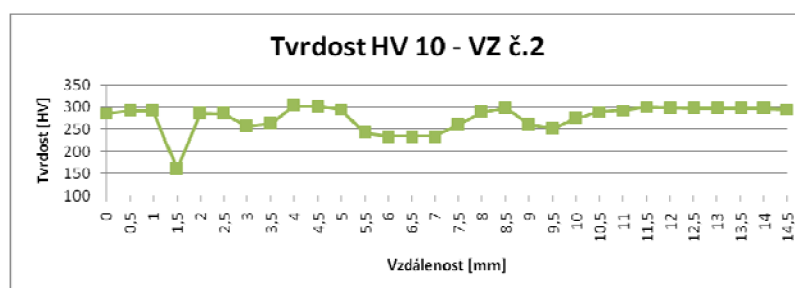
Pro zjištění tvrdosti byla použita Vickersova zkouška. Podstata spočívá vtlačování diamantového pravidelného čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136° do zkoušeného tělesa. Po odlehčení se měří úhlopříčka vtisku (viz obr 39)



Obr.39 Nátav č.8 - makrostruktura TOO.

U nátavů 8 a 9 bylo provedeno měření tvrdosti v linii rovnoběžné s povrchem od tepelně neovlivněného základního materiálu přes TOO, svarový kov, opět TOO do základního materiálu tak, jak je zřejmé z obr. 39. Naměřené hodnoty odpovídají jednotlivým pásmům TOO. Základní neovlivněný materiál je stejně tvrdý jako přehřáté hrubozrnné pásmo v TOO (300 HV). Nejmenší tvrdost vykazuje svarový kov, mírný pokles tvrdosti je patrný také v pásmu normalizace na okraji TOO.

Oba nátavy mají shodné výsledky tvrdosti v pásmech TOO.



Obr. 40 Průběh tvrdosti nátavu č. 8.



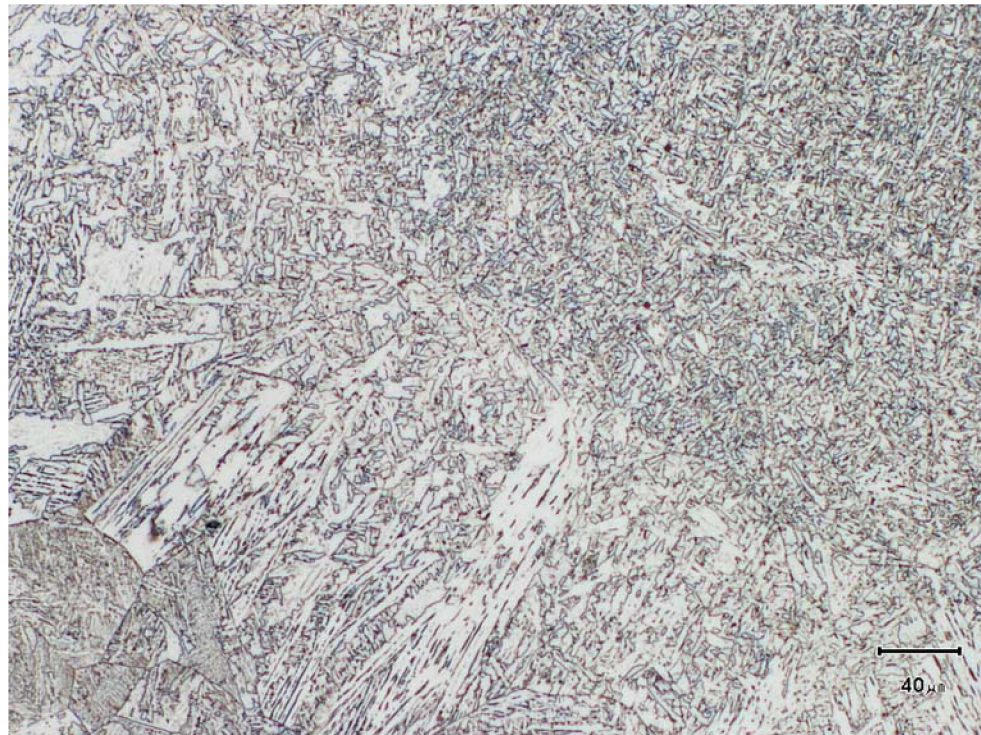
Obr. 41 Tepelně neovlivněný základní materiál. Jemná feriticko perlitická struktura. Leptáno Nitalém 1%.



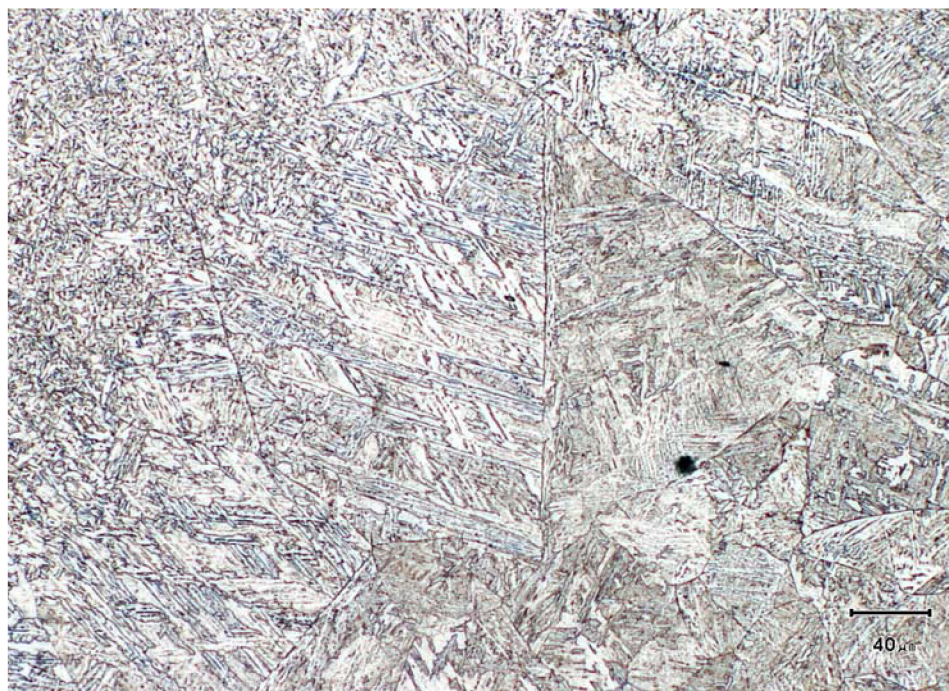
Obr. 42 Přechod do pásma vyšších teplot – pásmo normalizace. Leptáno Nitalém 1%.



Obr. 43 Přechod do pásma přehřátí se vyznačuje hrubnutím zrna. Leptáno Nitalém 1%.



Obr 44 Přejchod TOO – svarový kov. ZM se vyznačuje velmi hrubým zrnem s feritickými jehlicemi. Leptáno Nitalem 1%.



Obr. 45 Některá zrna v přehřátém pásmu TOO v blízkosti hranice ztavení mají v průměru až 0,3 mm. Leptáno Nitalem 1%.

8. Závěr

Diplomová práce se věnuje sledování vlivu velikosti vneseného tepla na vlastnosti jemnozrnné svařitelné oceli WELDOX 700.

Pro přesné dávkování vneseného tepla do materiálu bylo použito synergického svařovacího zdroje MAGIC WAVE a TIG hořáku firmy FRONIUS. Byly provedeny zkušební nátavy s ohřevem materiálu bez přídavného materiálu proměnnými proudy při konstantním posuvu hořáku za konstantní vzdálenosti hořáku od povrchu základního materiálu.

Jednotlivé nátavy byly rozřezány na zkušební tělíska pro metalografické hodnocení makro a mikrostruktury, pro měření tvrdosti a pro zkoušku tahem.

Z výsledků provedených experimentů vyplývá, že vhodnými parametry pro svařování oceli WELDOX 700 tloušťky 5 mm jsou parametry nátavu 5, tj. svařování specifickým vneseným teplem $1,5 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$. Experimenty také prokázaly, že u oceli Weldox 700 tloušťky 5mm není nebezpečné poškození struktury vyšším vneseným teplem, to znamená, že není citlivá na její zhrubnutí. Při zkouškách tahem všechny vzorky praskaly v tepelně neovlivněném základním materiálu. Proti běžným ocelím, kdy hrubozrnná struktura je limitující pro pevnost svarového spoje, WELDOX 700 v přehřátém pásmu dosahuje stejné tvrdosti, nebo se i zpevňuje.

Je možno předpokládat, že u větších tlouštěk se bude ve větší míře projevovat vliv rychlosti ochlazování TOO. Limitující pro pevnost spoje jsou tvrdší základné struktury. V těch případech by bylo vhodné testování spoje doplnit o zkoušky rázem v ohybu.

9. Použitá literatura

1. Kolektiv autorů. *Technologie svařování a zařízení*. Ostrava: ZEROSS 2001. 395 s. ISBN 80-85771-81-0
2. Václav Pilous a kolektiv autorů. *Vysokopevné Mikrolegované Jemnozrné oceli a jejich svařitelnost*. Plzeň 1999.
3. Jan Žák, Miroslav Novák. *Teorie svařování*. Brno 1988
4. *Firemní materiály SSAB*
5. Kolektiv autorů: *Technologie svařování*, Studijní opory VUT
6. *Zásady a technické podmínky pro použití vysokopevných a oteruvzdorných ocelí, včetně svařování*. [1. 4. 2010]. [online]. Dostupné na WWW.
www.tesydo.cz/.../technicke.../zasady-a-technicke-podminky-pro-pouziti-vysokopevných-a-oteruvzdorných-oceli.doc
7. *Wolframová elektroda – výběr a její příprava*. [online]. Dostupné na WWW.
<http://www.aek-svareci-technika.cz/odbornik-radi-metoda-tig.html>
8. *Svařování vysocepevných jemnozrných ocelí*. Omnitech. . [online]. Dostupné na WWW.
http://www.omnitechweld.cz/cze/clanky/svarovani_vysocepevných_jemnozrných_oceli2.
9. *Nové nízkouhlíkové oceli feritické báze a jejich vzájemná svařitelnost*. KONSTRUKCE. [3.12.2009]. [online]. Dostupné na WWW.
www.konstrukce.cz/clanek/nove-nizkouhlikove-oceli-feriticke-baze-a-jejich-vzajemna-svaritelnost/

10. Seznam příloh

Příloha 1 Technický list jemnozrnné oceli Weldox 700,



WELDOX 700

EXTRA HIGH STRENGTH STRUCTURAL PLATE

WELDOX 700 is a general structural steel with a minimum yield strength of 700 N/mm² intended for applications where its high strength permits weight savings to be made. The plate has very good cold bending properties and very good weldability. WELDOX 700 can be obtained with guaranteed impact toughness at temperatures down to -60°C (-76°F). WELDOX 700 totally fulfils the requirements on the corresponding steel grades and qualities according to EN 10 137 part 1 and 2.

APPLICATIONS	Dumptrucks, mobile cranes, loaders, industrial trucks, lorries, trailers, bulldozers, excavators, forestry, buckets, cranes, railway waggons, dolphins, penstocks, pipes, bridges, steel buildings, offshore structures, fans, pumps, lifting equipment etc.															
DESIGNATION	WELDOX 700 D with impact testing at -20°C (-4 °F). Corresponds to S 690 Q WELDOX 700 E with impact testing at -40°C (-40 °F). Corresponds to S 690 QL WELDOX 700 F with impact testing at -60°C (-76 °F). Corresponds to S 690 QL1															
CHEMICAL COMPOSITION (ladle analysis)	C*	Si*	Mn*	P	S	B*	Nb*	Cr*	V*	Cu*	Ti*	Al* total	Mo*	Ni*	N	CEV typical value %
	max %	max %	max %	max %	max %	max %	max %	max %	max %	max %	max %	min %	max %	max %	max %	
	0,20	0,60	1,60	0,020	0,010	0,005	0,04	0,70	0,09	0,30	0,04	0,015	0,70	2,0	0,015	¹⁾
	¹⁾ The steel is fine grained and microalloyed to a total of at least 0,040% with Al, V, Nb, Ti or equivalent elements															
	typ CEV, for information															
	¹⁾ WELDOX 700 D och E. t - 7 mm 0,56															
	7,1 - 20,0 0,41															
	20,1 - 45,0 0,46															
	45,1 - 102,0 0,56															
	102,1 - 130 0,64															
	WELDOX 700 F 5,1 - 80 0,56															
	CEV = C + $\frac{Mn}{6}$ + $\frac{Cr + Mo + V}{5}$ + $\frac{Ni + Cu}{15}$ ^{*)} Intentional alloying elements.															
MECHANICAL PROPERTIES	Plate thickness mm		Yield strength R _{0,2} min N/mm ²				Tensile strength R _m N/mm ²				Elongation ¹⁾ A ₅ min A ₅₀ min ²⁾ % %					
	4-50		700				780-930				14 18					
	(50)-100		650				780-930				14 18					
	(100)-130		630				710-900				14 18					
	¹⁾ For transverse test pieces. Values for longitudinal test pieces are 2 units higher.															
	²⁾ Testing by agreement.															
IMPACT PROPERTIES	Minimum values of impact energy for tests on transverse ¹⁾ and Charpy V test pieces. Minimum values of impact energy in J at test temperatures ²⁾ in °C															
	Steel grade	0	-20	-40	-60											
	WELDOX 700 D	30	27	-	-											
	WELDOX 700 E	35	30	27	-											
	WELDOX 700 F	40	35	30	27											
	¹⁾ Unless otherwise agreed, transverse impact testing according to EN 10 137 option 3 will apply. If only longitudinal impact testing shall apply, it has to be specified in the order.															
	²⁾ If the test temperature is not specified, the test will be carried out at the lowest test temperature.															
TESTING	Testing in accordance with EN 10 137-1 and EN 10 137-2.															
DELIVERY CONDITION	Quenched and tempered, Q.															
DIMENSIONS	WELDOX 700 is supplied in plate thicknesses of 4-130 mm. More detailed information on dimensions is provided in our brochure E-40. Certain width restrictions may apply.															
TOLERANCES	According to EN 10 029. - Tolerances on thickness according to Class A. - Tolerances on flatness according to Class N. (Normal tolerances)															
SURFACE FINISH	According to EN 10 163-2. - Requirements according to Class A. - Repair conditions according to Subclass 1. Repair by welding is allowed, option 14 according to EN 10 137-2.															