

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta strojní**

**Ústav strojírenské technologie**

**Svařování otěruvzdorných ocelí metodou FCAW**

**Flux Cored Arc Welding of Wear Resistant Steels**

Bakalářská práce

Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Autor práce: **Miroslav Mládek**

Vedoucí práce: Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

---

**Praha 2016**

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro **Miroslava MLÁDKA**

Program: Výroba a ekonomika ve strojírenství

Obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství

Název: Svařování otěruvzdorných ocelí metodou FCAW

Název anglicky: Flux Cored Arc Welding of Wear Resistant Steels

### Zásady pro vypracování:

1. Popis typů, vlastností a svařitelnosti otěruvzdorných ocelí (se zaměřením na Hardox 450)
2. Popis technologie FCAW - princip, výhody, použití - popis přídavných materiálů (PM)
3. Porovnání vlivu vybraných PM na strukturu a mechanické vlastnosti svarového spoje
4. Zhodnocení výsledků experimentů

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

Konzultant: Rudolf Hrabina, IWT

Datum zadání bakalářské práce: 30.10. 2015

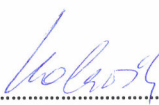
Termín odevzdání bakalářské práce: 15.1. 2016

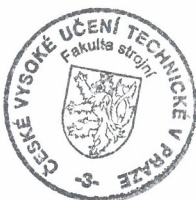
Neodevzdá-li student bakalářskou nebo diplomovou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské nebo diplomové práce. Pokud se však student řádně neomluvil nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student zapsat bakalářskou nebo diplomovou práci podruhé.

*Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou nebo bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové nebo bakalářské práci.*

Zadání bakalářské práce převzal dne: 4.11.2015

  
-----  
Student

  
-----  
Vedoucí ústavu  
Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE



  
-----  
Děkan  
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.

V Praze

dne 30.10. 2015



## **Prohlášení:**

**Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady uvedené v přirozeném seznamu.**

**Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).**

**V Praze dne .....**

**.....  
Podpis**



Poděkování:

Rád bych poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Kolaříkovi, Ph.D., IWE za ochotu, pomoc, cenné rady a především trpělivost, která mi byla věnována po celou dlouhou dobu tvorby této práce.

Mé poděkování patří také odbornému personálu dílen a laboratoří v areálu FS ČVUT v Praze.

Dále bych rád poděkoval mým rodičům taktéž za nekonečnou trpělivost a finanční i psychickou podporu v dosavadním studiu, které již mnozí začali právem přezdívat „nekonečný příběh“.

S poděkováním nesmím zapomenout na partu skvělých přátel, se kterými jsem měl tu čest se díky studiu na VŠ seznámit a kteří na mne nezanevřeli ani po jejich úspěšném absolvování a odchodu ze školy s magisterskými tituly (oni vědí...).



## **Anotace:**

*Název práce:* Svařování ořezvzdorných ocelí metodou FCAW

*Autor:* Miroslav Mládek

*Druh práce:* Bakalářská

*Vedoucí práce:* Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE,

*Anotace:*

Tato bakalářská práce je zaměřena na svařování ořezvzdorného materiálu Hardox 450 metodou FCAW, konkrétně pak na volbu přídatného materiálu, technologických podmínek a jejich vliv na výsledné mechanické vlastnosti svaru. Pro snadnější pochopení probíhajících dějů v materiálu během procesu svařování, je v teoretické části této práce proveden rozbor základního materiálu, od jeho výroby, přes dělení, svařování a použitelnost, až po jeho mechanické a chemické vlastnosti.

V praktické části je detailně popsáno provedení experimentálních svarů, z kterých byly odebrány zkušební vzorky a ty pak následně podrobeny mechanickým zkouškám (Příčná tahová zkouška, zkouška vrubové houževnatosti – Charpy a měření mikrotvrdomosti. V závěru byly všechny tyto experimenty zhodnoceny a vzhledem k mechanickým vlastnostem svaru, zvolena optimální kombinace technologických podmínek a přídatných materiálů.

*Klíčová slova:* Svařování, ořezvzdorné oceli, GMAW, svařitelnost,

*Rozsah práce:* 62

*Počet obrázků:* 25

*Počet tabulek:* 28

*Počet grafů:* 6

**Anotation:**

*Title:* Welding of a wear resistant steels using FCAW method

*Author:* Miroslav Mládek

*Theses:* bachelor

*Supervisor:* Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D., IWE

**Annotation:**

This thesis is focused on welding of a wear-resistant material Hardox 450 by using FCAW method, specifically the choice of a filler material, technological conditions and their effect on the mechanical properties of the weld. In order to better understand the ongoing processes in the material during the welding process, the theoretical part of this thesis analyses the basic material from its production through cutting and welding, its applicability and its mechanical and chemical properties.

The practical part describes in detail the design of the experimental welds, from which it was collected test samples which were subsequently subjected to a mechanical testing (transverse tensile test, notch toughness test (Charpy) and microhardness test). At the end of the theses, all these experiments are evaluated and given the mechanical properties of the weld, an optimal combination of technological conditions and additional materials is selected.

**Keywords:** welding, wear resistant steels, GMAW, weldability

*Range of the theses:* 62

*Number of images:* 25

*Number of tables:* 28

*Number of graphs:* 6



## Obsah

<b>1 ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>2 POPIS VLASTNOSTÍ A DRUHŮ OTĚRUVZDORNÝCH OCELOVÝCH PLECHŮ.....</b>	<b>12</b>
2.1 DRUHY OPOTŘEBENÍ.....	12
2.2 SEZNÁMENÍ SE SEZÁKLADNÍMI DRUHY OTĚRUVZDORNÝCH MATERIÁLŮ.....	14
2.3 SKUPINA OCELÍ HARDOX.....	14
2.3.1 Výroba otěruvzdorných materiálů v SSAB Oxelosund.....	15
2.4 VLASTNOSTI OCELÍ TYPU HARDOX.....	17
2.4.1 Hardox 400.....	17
2.4.2 Hardox 450.....	18
2.4.3 Hardox 500 a 550.....	19
2.4.4 Hardox 600.....	20
2.5 OSTATNÍ OTĚRUVZDORNÉ MATERIÁLY.....	20
<b>3 SVAŘITELNOST OCELÍ</b>	
<b>HARDOX.....</b>	<b>21</b>
3.1 TEORIE SVAŘITELNOSTI OCELÍ HARDOX.....	21
3.2 OBECNÉ ZÁSADY PŘI SVAŘOVÁNÍ OCELÍ HARDOX.....	22
3.3 SVAŘOVÁNÍ OCELÍ HARDOX AUSTENITICKÝM PŘÍDAVNÝM MATERIÁLEM.....	23
<b>4 METODA FCAW.....</b>	<b>24</b>
4.1 PRINCIP METODY A ZAŘÍZENÍ PRO JEJÍ REALIZACI.....	25
<b>5 PŘÍDAVNÉ MATERIÁLY VHODNÉ PRO SVAŘOVÁNÍ OTĚRUVZDORNÝCH PLECHŮ</b>	
<b>HARDOX 450 PLNĚNOU ELEKTRODOU METODOU FC.....</b>	<b>27</b>
5.1 OK TUBROD 14.03.....	28
5.2 FILARC 61.38SR.....	29
<b>6 VADY SVARU.....</b>	<b>30</b>
6.1 HARDOX 450 JAKO ZÁKLADNÍ MATERIÁL A JEHO SVAŘITELNOST.....	30
6.2 TVORBA TRHLIM A ZAMEZENÍ JEJICH VÝSKYTU.....	31





<b>7</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....</b>	<b>34</b>
	7.1 HARDOX 450 JAKO ZÁKLADNÍ MATERIÁL A JEHO SVAŘITELNOST.....	35
	7.1.1 Dělení materiálu a příprava svarových ploch.....	35
	7.1.2 Provedení zkušebních svarů.....	36
	7.1.3 Parametry svařování a výpočet tepelného příkonu.....	39
	7.2 KONTROLA SVAŘENCŮ (DEFEKOSKOPIE).....	40
	7.3 ZHOTOVENÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLÍSEK PRO MECANICKÉ ZKOUŠKY.....	41
	7.4 TAHOVÁ ZKOUŠKA.....	42
	7.4.1 Pracoviště pro provádění tahové zkoušky.....	43
	7.4.2 Postup provedení tahové zkoušky.....	44
	7.4.3 Vyhodnocení výsledků tahové zkoušky.....	45
	7.5 ZKOUŠKA TVRDOSTI.....	50
	7.5.1 Pracoviště pro měření tvrdosti a příprava vzorků.....	51
	7.5.2 Naměřené hodnoty tvrdosti.....	52
	7.6 ZKOUŠKA RÁZEM V OHYBU.....	55
	7.6.1 Popis provedení zkoušky.....	56
	7.6.2 Naměřené hodnoty rázové energie.....	56
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>57</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....</b>	<b>59</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ, JEDNOTEK A ZKRATEK.....</b>	<b>60</b>

# 1 Úvod

Tato bakalářská práce se bude zabývat problematikou svařování ořezavzdorných ocelových plechů z materiálu Hardox 450 vyráběného ve švédské ocelárně SSAB Oxelosund.

Motivací pro vznik této práce byla spolupráce Ústavu strojírenské technologie s firmou **F.X. MEILLER Slaný, s.r.o.**, jejíž hlavní náplní je výroba nástaveb na rámy nákladních automobilů. Převážnou většinu výrobků firmy tvoří korby nákladních automobilů přepravujících stavební materiály, sutě apod., pro něž je výše zmíněný materiál speciálně navržen.

Cílem práce je navrhnout vhodné přídavné materiály pro technologii FCAW (svařování elektrickým obloukem plněnou elektrodou), a ověřit jejich použitelnost pomocí experimentálně provedených zkušebních svaryů, dále provést zkoušky mechanických vlastností provedených svarových spojů a získané výsledky vyhodnotit.

Teoretická část této práce má za cíl přiblížit a podrobně rozebrat nejen výrobu, ale i technologické a mechanické vlastnosti jak základních, tak přídavných materiálů, včetně jejich výroby, zpracování a definovat vhodnost jejich použití. Popsat princip technologie FCAW a zdůraznit výhody plynoucí z jejího použití. V praktické části BP je popsán postup provádění samotného experimentu, od přípravy svarových ploch, přes vlastní svařování zvolenými typy PM, provedení defektoskopických zkoušek svarů, zkoušek mechanických vlastností, až po vyhodnocení celého experimentu.

# 2 Popis vlastností a druhů otěruvzdorných ocelových plechů

## 2.1 Druhy opotřebení

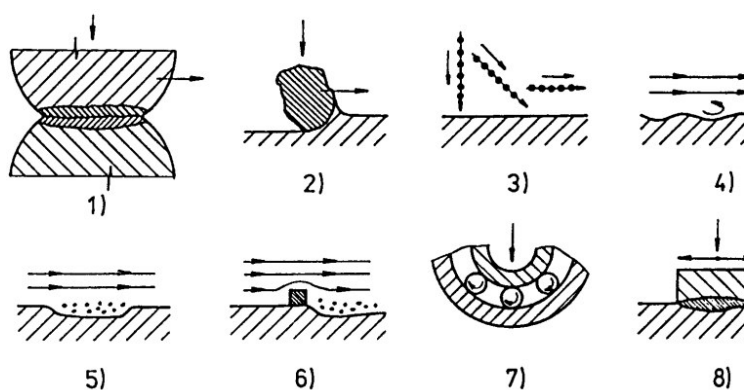
Jako opotřebení se označuje poškození užitkového předmětu, například strojní součásti, úbytkem materiálu z povrchu při vzájemném pohybu dvou nebo více materiálů, popřípadě při interakci materiálu s prostředím. Mezi hlavní typy opotřebení patří:

- 1- **Adhezní:** *charakteristické oddělováním a přemísťováním částic kovu mezi dvěma stykovými plochami, kdy v důsledku relativního pohybu funkčních povrchů dochází k porušování povrchových vrstev materiálů. Ke styku povrchů dochází prostřednictvím velkého množství kontaktních plošek za spolupůsobení velkých sil, vznikají plastické deformace a vytváří se mikrospoje. Vznik mikrospojů je doprovázen lokálním ohřevem materiálů a vzniká vhodné prostředí pro chemickou reakci kovu s okolním prostředím, která může dále zvýšit rychlost opotřebení.*
- 2- **Abrazivní:** *charakteristické oddělováním částic z funkčního povrchu působením tvrdého a drsného povrchu druhého tělesa – abrazivní částice. Typickým projevem abrazivního opotřebení je vznik rýh na povrchu funkční plochy, případně funkčních ploch, pokud abrazivní částice vnikne mezi dvě pohybuující se tělesa. Počet vzniklých rýh bude nepřímo úměrný velikosti abrazivní částice, šířka rýhy odpovídá přibližně 10 až 20 % průměru částice.*
- 3- **Erozivní:** *vzniká dopadem částice obsažené v proudícím médiu na povrch funkční plochy. Pokud má částice dostatečnou energii při dopadu, v závislosti na úhlu dopadu způsobí vytlačení nebo oddělení materiálu z funkční plochy. Částice může být unášena proudem kapaliny (čerpadla, turbíny), nebo proudem plynu (vzduchotechnika, ventilátory). Intenzita opotřebení je závislá na více faktorech, např. rychlost a úhel dopadu částice, chemické složení proudícího média, velikost, tvar a tvrdost částice.*
- 4- **kavitační:** *Kavitační opotřebení je charakterizováno oddělováním částic kovu z povrchu funkční plochy v místech zániku kavitačních „bublin“, vznikajících v kapalině. Ke kavitaci dochází v proudící kapalině v místech, kde se zvyšuje rychlost proudění a*

důsledkem je snížení tlaku kapaliny. Objeví se kavitační bubliny vyplněné párou (plynem), které ulpí na povrchu kovu a zaniknou implozí. V okamžiku zániku - implozi kavitační bubliny uvnitř kapaliny vzniká rázová vlna, která působí na povrch kovu naprosto devastujícím účinkem. Vznikají oblasti (velmi malé), kde tlak kapaliny dosahuje řádu 103 MPa a teploty v řádu až stovek stupňů. Je zjevné, že současné materiály nedokáží po delší dobu odolávat tomuto typu opotřebení a je nutné volit konstrukční postupy zabraňující nebo alespoň omezující možnost vzniku kavitace.

- 5- **Únavové:** vzniká postupnou kumulací poruch v povrchové vrstvě funkčních ploch. Vznikají postupně se rozšiřující oblasti mikrotrhlin, po jistém čase dochází k jejich „spojování“ a postupně vznikají rozsáhlejší oblasti únavového poškození. Únavové poškození vzniká při cyklickém namáhání součástí, pokud je namáhání pod mezí kluzu materiálu vzniká vysokocyklová únava, při namáhání nad mezí kluzu vzniká nízkocyklová únava.
- 6- **Vibrační:** vzniká vzájemnými kmitavými tangenciálními posuny funkčních ploch při spolupůsobení normálového zatížení. Amplitudy kmitavého pohybu mohou být i velmi malé, v řádu 1 až 100  $\mu\text{m}$ . Vibrační opotřebení je doprovázeno vznikem oxidů železa s typicky hnědočervenou nebo hnědočernou barvou. V praxi vzniká vibrační opotřebení u valivých ložisek, čepů, nalisovaných spojení náboje kola a hřídele. Budící kmity způsobující vibrace mohou být generovány vlastní prací stroje, taktéž vnějším zdrojem.

[11]



Obr 1: druhy poškození povrchu materiálu [12]

1 – Adhezivní, 2 – Abrazivní, 3,4 – erozivní, 5,6 – kavitační, 7 – únavové, 8 – vibrační

## **2.2 Seznámení se se základními druhy otěruvzdorných materiálů**

Oceli Hardox, Dillidur, Quard, ROC atd. patří do skupiny materiálů, které jsou díky svému chemickému složení a hlavně tepelnému zpracování velmi odolné abrazivnímu opotřebení. Tyto vlastnosti předurčují více zmíněnou řadu materiálů k použití v průmyslu a všude tam, kde dochází k silnému abrazivnímu opotřebení, například důlní průmysl, zemědělství, stavebnictví, recyklace odpadů apod. Kromě výborných mechanických vlastností (tvrdost, vrubová houževnatost, tažnost) má tato ocel také dobré technologické vlastnosti (svařitelnost, obrobitelnost a dobrá tvařitelnost za studena). Oceli řady Hardox se také s výhodou používají nejen jako nástrojové oceli, ale také jako konstrukční prvky strojů pro výše zmíněná průmyslová odvětví.

## **2.3 Skupina ocelí Hardox**

Oceli řady Hardox (Hardox 400, 450, 500, 550 a 600) jsou produkty s ochrannou známkou Švédské firmy SSAB Oxelösund AB, která tyto materiály dodává ve formě plechů různých tloušťek.

Jedná se o řadu otěruvzdorných materiálů s univerzálním použitím od méně zatížených až po extrémně namáhané funkční části strojů, po nichž je vyžadována především odolnost ve směru abrazivního zatížení.

Hlavní výhody použití švédských otěruvzdorných plechů spočívají ve spojení tří pro tyto materiály důležitých vlastností, kterými jsou: tvrdost, pevnost a houževnatost.

Precizní způsob výroby potažmo tepelného zpracování na kalících linkách, zaručuje konstantní tvrdost plechu v celém svém objemu, od nejtenčích plechů (3 mm) až po tabule o tloušťce 130 mm. Ze stejných technologických vlastností určité řady, např. (Hardox 400), tedy vyplývá, že se v závislosti na tloušťce daného typu materiálu bude měnit jeho chemické složení a tedy procenta legujících prvků tak, aby bylo dosaženo u plechů větších tloušťek lepší prokalitelnosti a aby tedy měly všechny tloušťky materiálů jedné typové řady stejné, nebo podobné mechanické vlastnosti. [11]



*Obr 2: Plechy připravené k distribuci [13]*

### **2.3.1 Výroba otěruvzdorných materiálů v SSAB Oxelosund**

Dalo by se říci, že Švédská ocelárna SSAB Oxelosund vyrábějící materiály typu Hardox a Weldox, svým způsobem předběhla dobu a stála již před více než 20 lety u začátku vývoje, rozšíření a zdokonalení výroby těchto materiálů. Díky jejím investicím do výzkumu v oblasti tepelného zpracování a následně do drahého kalíčního zařízení, si vybudovala stabilní místo na trhu s hutním materiálem. Kalení abrazi odolných ocelí unifikovaných řad Hardox, je prováděno odlišným způsobem, než byly doposud vyráběny otěruvzdorné oceli (např Vítkovická ČSN 14 320) tzn. že, nejsou kaleny konvenčním způsobem, ale je na nich prováděna technologie intenzivního zakalení v kalíčních linkách, která v materiálu dokáže i při minimálních obsazích legur a uhlíku efektivně vytvořit martenzitickou strukturu. Takto vzniklé oceli disponují vysokou tvrdostí za současné výborné svařitelnosti a to díky již zmíněnému malému procentu uhlíku, legur a tedy nízké hodnotě uhlíkového ekvivalentu.

Při samotné výrobě oceli je kladen důraz především na čistotu materiálu, nejvíce na obsah síry. Její podíl v materiálu je přísně hlídán a nesmí se dostat nad 0,02 %, proto hut' dováží železnou rudu pouze z dolů, o kterých je známo, že jejich ruda obsahuje malé procento nečistot a dále do tavby nepřidává železný šrot, který s sebou často nese riziko znečištění celé tavby. Tento fakt dopomáhá k tomu, že obě dvě vysoké pece v Oxelosund jsou schopny

produkovat vysoce čisté surové železo, které se dále zpracovává v konvertoru, následně prochází vakuováním a rafinací. Takto vyrobená ocel se dále dolegovává na předepsané chemické složení a odlévá do bram.

Další operací je válcování na mohutné a přesné válcovací stolici, kde se plechy válcují do požadované tloušťky v předepsaných tolerancích.

Vyválcované plechy pokračují z válcovny na tepelné zpracování tzn. Kalení + popuštění = zušlechťení.

Další jedinečnou technologií v SSAB je samotný proces kalení. Jedná se o proces, při kterém, jsou plechy vedeny válci kalícího lisu do oblasti sprchové komory, kde dochází k ochlazení plechů z kalící teploty na teplotu 20°C. Ochlazení zaručuje seskupení vodních trysek, do kterých je přiváděna filtrovaná voda, udržovaná na teplotě 20°, pod různým tlakem. Právě rozdílné výstupní rychlosti vody vycházejících z trysek zabezpečí rychlé a především rovnoměrné prokalení v celém průřezu materiálu. Schopnost kalícího zařízení velmi rychle ochladit ocel, na rozdíl od konvenčních způsobů kalení, (např. tabule tloušťky 25 mm proudem vody zchladne z 900°C na 20°C za cca 9 sekund) dává možnost i malému procentu legur vytvořit zákalnou strukturu v celém objemu a tak zachovat i dobrou svařitelnost dané oceli. [11]



*Obr 3: Kalení tabule plechu ve vodní sprše prováděné na kalící lince firmy SSAB Oxelosund [14]*

## 2.4 Vlastnosti ocelí typu Hardox

### 2.4.1 Hardox 400

Tento základní typ oceli z řady Hardox je díky své bezproblémové svařitelnosti a výborným hodnotám houževnatosti hojně používaný jako konstrukční i otěruvzdorný materiál současně. Číslo „400“ v označení tohoto materiálu značí přibližnou hodnotu tvrdosti plechu ve jednotkách Brinella. Stejný princip značení se používá pro celou tuto materiálovou řadu. [11]

Tabulka 1: Mechanické vlastnosti materiálu Hardox 400 [11]

	Tvrdost HB	Vrubová houževnatost KV - 40°C	Mez kluzu Re	Mez pevnosti Rm
Hardox 400	310 – 430	45	1000	1250



Obr 4: Použití Hardoxu 400 na konstrukční části lžice rypadla [11]



## 2.4.2 Hardox 450

Tento „přechodový“ typ mezi hardoxem 400 a hardoxem 500 byl vyvinut přednostně pro funkční plochy koreb nákladních automobilů a používá ho i firma F.X. Mailler ve Slaném. Vyrábějí se z něj s výhodou také tzv. samonosné vany, které nahradily klasické korby svařené z nosníků a následně vyložené plechem. Výhody těchto samonosných koreb jsou především omezení celkového počtu svarů a tím pádem snížení koncentrátů napětí a minimalizace vzniku potenciálních trhlin. Další výhodou je lepší rozložení dopadové energie při plnění korby, díky kterému nedochází k místním plastickým deformacím.

Hardox 450 se prezentuje především zvýšenou tvrdostí a otěruvzdorností za současného zachování velice příznivých hodnot houževnatosti a stále poměrně malým procentem legujících prvků potažmo uhlíkovým ekvivalentem  $CET = 0,35$ . Proto pro menší tloušťky plechů není nutné aplikovat před svařováním přehřev. [11]

$$\text{Pozn: } CET = C + (Mn + Mo)/10 + (Cr + Cu)/20 + Ni/40$$

Tabulka 2: Mechanické vlastnosti materiálu Hardox 450 [13]

	Tvrdost HB	Vrubová houževnatost KV - 40°C	Mez kluzu Re	Mez pevnosti Rm
Hardox 450	425 – 475	40	1200	1400



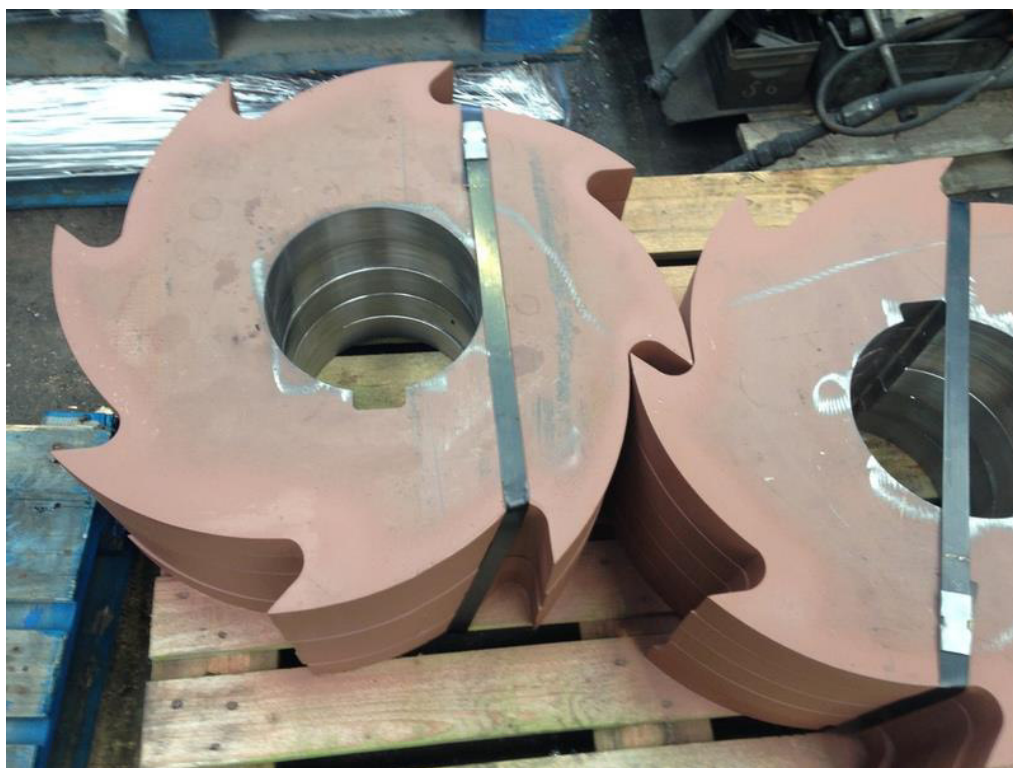
Obr 5: Korba nákladního automobilu vyrobená z Hardox 450 [13]

### 2.4.3 Hardox 500 a 550

Typy Hardoxu , které vynikají vysokou odolností proti opotřebení a s tvrdostí okolo 500 HB, jsou používány tam, kde dochází k intenzivnímu opotřebení vlivem abraze a zřídka také pro konstrukční účely. [11]

Tabulka 3: Mechanické vlastnosti materiálu Hardox 500 a 550 [11][13]

	Tvrdost HB	Vrubová houževnatost KV - 40°C	Mez kluzu Re	Mez pevnosti Rm
Hardox 500	470 - 530	30	1300	1550
Hardox 550	525 - 575	30	1400	1700



Obr 6: Výpalky z materiálu Hardox 550 [11]

#### 2.4.4 Hardox 600

Tvrdość 600 HB zaručená čistotou materiálu a docílená speciálním rafinačním procesem při výrobě dělá z tohoto Hardoxu jedinou komerčně vyráběnou ocel svého druhu na světě. Její extrémní tvrdość, která je srovnatelná pouze s některými druhy litiny či keramikou, je doplněna vysokou houževnatostí, a proto jsou běžně z tohoto materiálu konstruovány extrémně namáhané součásti, jako jsou korečky důlních rypadel či břity demoličních nůžek apod. [11]

Tabulka 4: Mechanické vlastnosti materiálu Hardox 600 [13]

	Tvrdość HB	Vrubová houževnatost KV - 40°C	Mez kluzu Re	Mez pevnosti Rm
Hardox 600	570 – 640	20	1650	2000



Obr 7: Břít dozerové radlice z materiálu Hardox 600 [12]

#### 2.4 Ostatní otěruvzdorné materiály

Ocelárna SSAB není jediným evropským producentem otěruvzdorného hutního materiálu, nicméně její postavení na trhu mezi ostatními výrobci není zanedbatelné.

Mezi konkurenční železárny, je možno mimo jiné, zařadit německou ocelárnu Dillinger Hutte s produkty Dillidur, což je otěruvzdorná ocel produkovaná taktéž ve více kategoriích tvrdości, ovšem pouze do 500 HB. [6][7]

Podobnou nabídkou na trhu disponuje i Belgický hutní gigant Quard se stejnojmennou řadou plechů a plátů Quard 400, 450 a 500.

Další významným výrobcem ořeruvzdorných ocelí je ocelárna Ruukki ve Švédsku. Jími dodávaný sortiment ocelí se zvýšenou odolností proti opotřebení představuje řada materiálů Raex 300, 400, 450 a 500 vyráběná v tloušťkách plechů 2 až 80 mm. V současné době tato železárna spadá do koncernu SSAB. [11][14][15]



*Obr 8: Válcování plechu v železárnách Ruukki [14]*

## **3 Svařitelnost ocelí Hardox**

### **3.1 Teorie svařitelnosti ocelí Hardox**

Jak už bylo výše popsáno, má různá tloušťka plechů, byť i jedné unifikované řady, například Hardox 400 různé chemické složení. Tento fakt nám tedy brání v aplikaci určité univerzálnosti postupů svařování.

K tomu, aby mohly být s jistotou stanoveny podmínky, za kterých se bude daná ocel určité tloušťky svařovat, je třeba znát dvě základní informace tzn.: typ, nebo-li označení materiálu, jeho tloušťku a mít k dispozici chemické složení, tedy např. materiálový list obsahující dokument kontroly, který je součástí každé dodávky materiálu a obsahuje mimo jiné i hodnotu uhlíkového ekvivalentu.

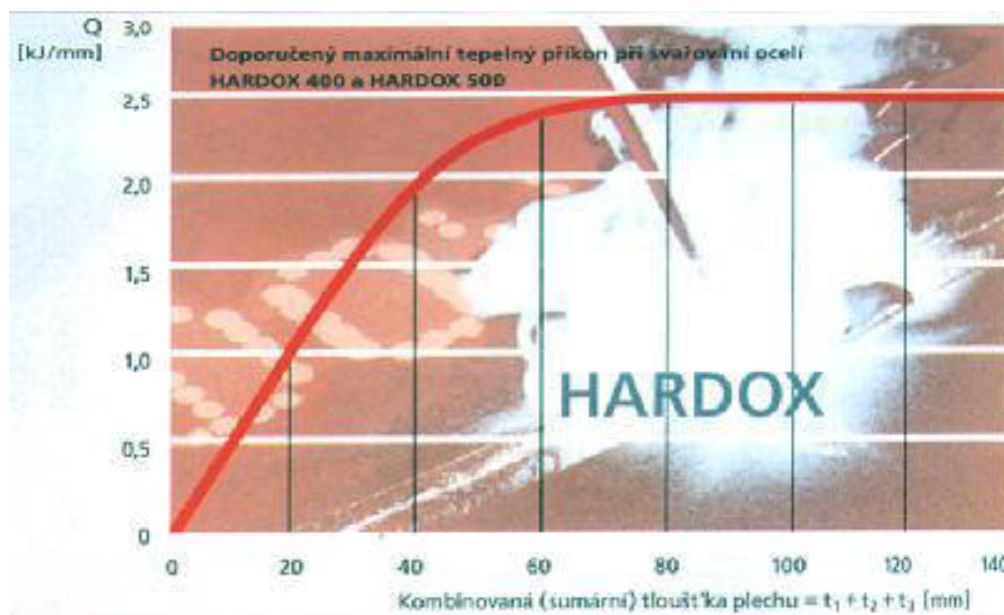
Máme-li přístup k těmto třem nezbytným údajům, v atestu (dokumentu kontroly) vyhledáme, nebo spočítáme hodnotu uhlíkového ekvivalentu CEV, která spolu s tloušťkou materiálu postačuje k navržení základních parametrů, potřebných pro tvorbu WPS. [3][11]

## 3.2 Obecné zásady při svařování ocelí Hardox

Souhrn obecných pravidel pro svařování (doporučených výrobcem SSAB Oxelosund).

1. Použít standartní tzn. „měkký“ přídavný materiál (např. OK 48.00 pro MMA, OK Autrod 12.51 pro MAG) viz kapitola 5. Účelem je, nesnažit se svařovat oceli Hardox na pevnost, která odpovídá jejich úrovni. Naopak čím měkčí přídavný materiál, tím lépe bude absorbovat vnitřní napětí svarového spoje, což zaručí lepší vrubovou houževnatost.
2. Dbát na to, aby se v průběhu svařování nedostal do svarového spoje vodík a svar nedegradoval. To znamená vybírat elektrody se zaručeným obsahem vodíku (do 5ml/100 g), odstranit (vysušit) kondenzovanou vlhkost, zbytky barev, mastnoty a další nečistoty.
3. Postup svařování by měl být, pokud je to možné, plánován takovým způsobem, abychom svařovali směrem k volným koncům a umožnili tak vznikajícímu pnutí „uniknout“ ze svarového spoje. Zde je nutno si uvědomit, že vzhledem ke své pevnosti může ocel Hardox absorbovat až trojnásobek pnutí než klasický konstrukční materiál. Pokud neumožníme tomuto napětí se realizovat drobnou plastickou deformací na volném konci (nebo v měkkém přídavném materiálu), může znamenat vyšší riziko vzniku trhlin.
4. Nepoužívat žíhání na snížení pnutí po svařování. Oceli Hardox při žíhání nad 250 - 300 °C začínají ztrácet svou tvrdost – popouštějí se.
5. Pokud je doporučen předehřev, je nutno jej aplikovat i při stehování. Dále je doporučeno používat minimální dálku stehu 50 mm. Při stehování je náchylnost oceli na vznik trhlin vyšší než při samotném svařování. Vzhledem k malé délce stehu je rychlost ochlazování takto vzniklého svarového spoje mnohem rychlejší, než u masivního svaru.

6. Doporučené maximální tepelné příkony se pohybují v rozmezí 0,5 až 2,5 kJ/mm a jsou uvedeny v grafu č. 1.[11][3][14]



graf 1: Doporučené tepelné příkony pro svařování hardoxu (vztaženo na tloušťku plechu)[11]

### 3.3 Svařování ocelí Hardox austenitickým přídatným materiálem

Řadu výhod do oblasti svařování ořezavzdorných plechů přináší také provádění svaru vysoce legovaným austenitickým přídatným materiálem. Tento přídatný materiál se vzhledem k velké tažnosti a houževnatosti s výhodou používá:

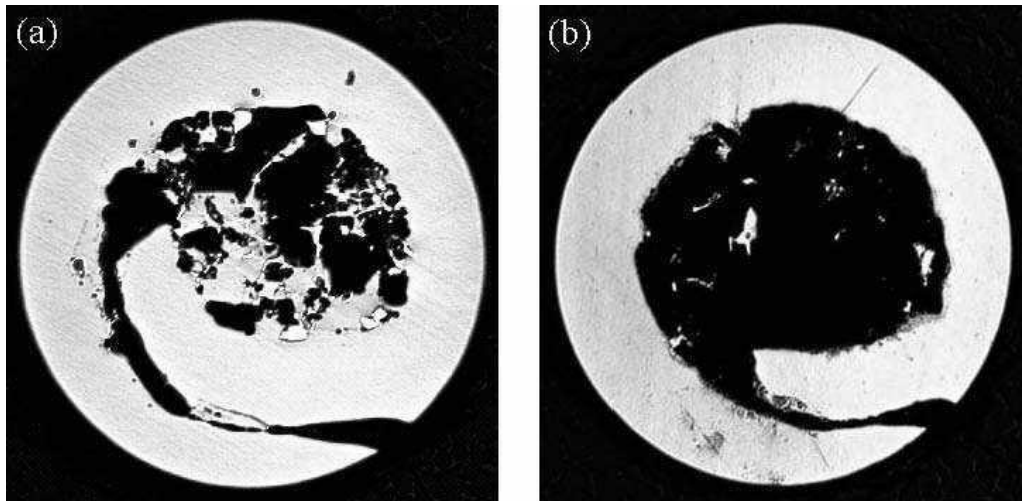
1. Při provádění takových svarů, kdy druh a tloušťka materiálu přímo podmiňuje použití předehřevu, ale z nějakých důvodů ho nelze aplikovat
2. Při svařecích pracích montážního typu, či opravách zařízení, u kterých je obtížné dodržet výrobcem dané podmínky při svařování (vlhkost, zima, nečistoty)
3. Obzvláště vhodné pro použití při svařování „neznámého“ Hardoxu, nebo při konstrukci svařované z více typů ořezavzdorných materiálů.
4. Dále jsou austenitické materiály zatím jediným možným přídatným materiálem při svařování oceli Hardox 600 tlouštěk nad 20 mm.

Nevýhodou tohoto PM je ovšem nižší pevnost. [11][3][14]



## 4 Metoda FCAW

Tato metoda svařování principiálně vychází z metody MAG a umožňuje provádět svary poloautomatickým, nebo plně automatizovaným způsobem. Jedná se v podstatě o svařování plněnou elektrodou (často lidově nazývanou „trubičkový drát“), kdy díky plnivu, metoda kombinuje výhody MAG a MMA svařování.



Obr 9: průřez plněnou elektrodou a) bazické plnivo b) rutilové plnivo[9]

Drát plného průřezu je zde nahrazen přídatným materiálem ve formě tenkostěnné trubičky plněné různými druhy struskotvorných, kovových nebo jiných plniv. Jedná se o kovový plášť vyplněný požadovanou směsí. Na začátku výroby plněné elektrody (trubičkového drátu) je obvykle páska, která se nejdříve tvaruje do tvaru písmene "U", do ní se potom ukládá tavidlo a legující materiály a nakonec se páska v sérii formovacích kladek uzavírá.

Podle typu plniva je tedy možné přídatné materiály vhodné pro metodu FCAW rozdělit na trubičky:

- 1) Plněné tavidlem a struskotvornými přísadami – umožňují svařování i bez ochranného plynu
  - Bazické
  - Rutilové

- 2) Plněné ocelovým práškem
- Vysoko výtěžné
  - Legující svarovou lázeň

Použití plněných elektrod je tedy možné shrnout do následujících bodů:

- Podle typu základního materiálu,
- podle aplikace,
- podle adjustáže (cívky, velkokapacitní balení...),
- podle typu náplně (rutilové, bazické, s přísadou kovového prášku),
- podle způsobu ochrany (inertní plyn, aktivní plyn, vlastní plynná ochrana).

[3][9][10]

## 4.1 Princip metody a zařízení pro její realizaci

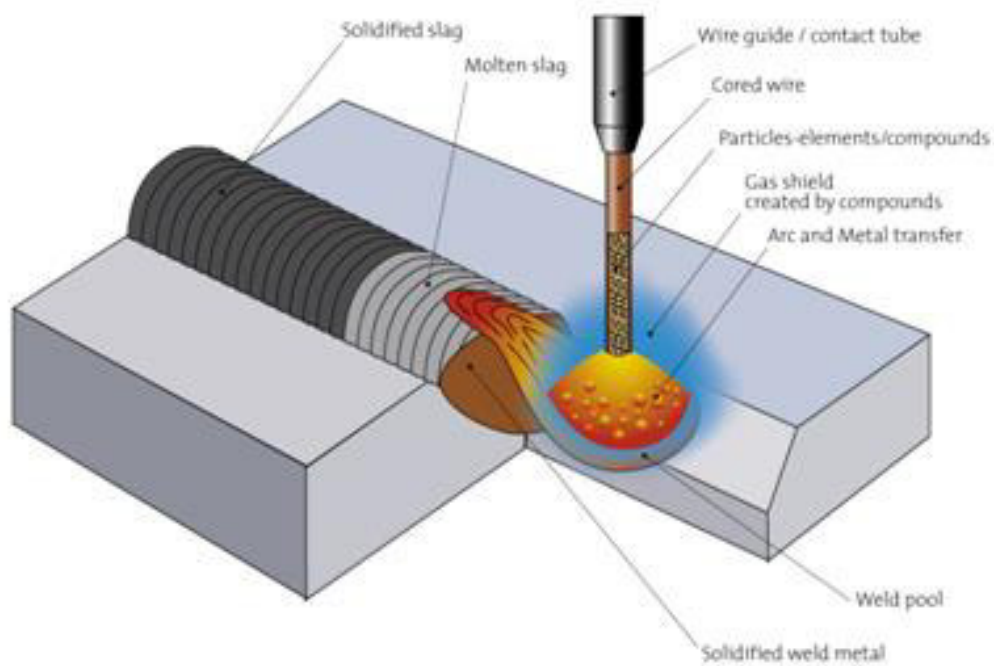
Jedná se o poloautomatickou metodu obloukového svařování, při které hoří oblouk mezi ZM a plněnou elektrodou přiváděnou do svarové lázně podávacím zařízením. Jako každá metoda obloukového svařování, potřebuje i tato metoda, dostačující ochranu svarové lázně. Ta je zabezpečována přívodem ochranného plynu do místa prováděného svaru buďto z externí tlakové lahve, nebo z centrálního rozvodu. V případě použití plněné elektrody s vlastní ochranou, vzniká clona ochranného plynu bránící přístupu okolní atmosféry spalováním a odpařováním plynotvorných přísad z plniva elektrody. Ochrana je dále vyvozena i struskou, která na povrchu svaru příznivě formuje kresbu svaru a je snadno odstranitelná.

Nevýhody této metody spočívají v důsledné přípravě svarových ploch, malé operativnosti při svařování v polohách a u svařování kořenových vrstev tupých spojů nutnosti použití kořenových podložek (např. keramických).

Naopak výhody jsou: možnost využití stejných zdrojů svářecího proudu jako u metod MIG, MAG, což podstatně snižuje náklady na použití tohoto způsobu svařování. Další



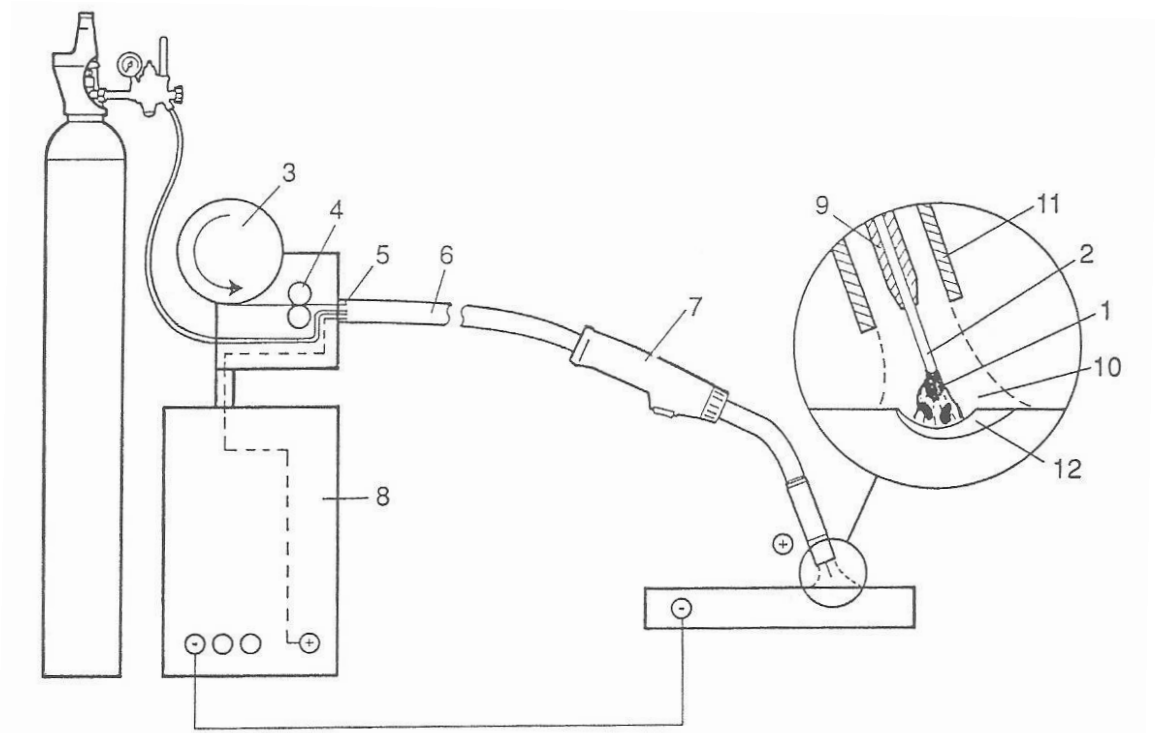
nespornou výhodou je možnost provádění svarů v montážních podmínkách (i za méně příznivých povětrnostních podmínek). A díky složení náplně elektrody vyšší odtavovací výkon až o 30%. [1][4][9][18]



Obr 10: Zobrazení principu vzniku svarového spoje metodou FCAW [9]

Weld pool – svarová lázeň, Solidified weld metal – ztuhlý svarový kov, Arc and metal transfer – el. Oblouk a přenos svarového kovu v oblouku, Gas shield created by compounds – plynová ochrana svaru, Contact tube – kontaktní špička, Cored wire – plněná elektroda, molten slag – roztavená struska, solidified slag – ztuhlá struska

Zařízení pro svařování, tedy zdroj svařovacího proudu se nijak neliší od svařovacích zdrojů pro metodu MIG/MAG viz obr 11. Při přechodu na plněnou elektrodu je pouze třeba v podávacím zařízení zdroje vyměnit podávací kladky elektrody, které jsou konstrukčně mírně odlišné od kladek pro plný ocelový drát. Drážka v kladce má půlkulatý tvar a je opatřena příčnými vroubkami. Tyto vroubky zabezpečují spolehlivé podávání plněné elektrody i za sníženého přítlaku, který je třeba dodržet, aby se elektroda nedeformovala. [4][9][18]



Obr 11: Schéma zařízení pro svařování metodami MIG/MAG a FCAW [9]

1 – elektrický oblouk, 2 – přídavný materiál, 3 – zásobník PM, 4 – mechanismus podávání PM, 5 – konektor pro připojení svářecího hořáku, 6 – tělo svářecího hořáku, 7 – rukověť, 8 – zdroj svářecího proudu, 9 – kontaktní špička, 10 – ochranná atmosféra, 11 – hubice hořáku, 12 – svarová lázeň

## 5 Přídavné materiály vhodné pro svařování otěruvzdorných plechů Hardox 450 plněnou elektrodou metodou FCAW

S ohledem na fakt, že Hardox 450 nevyžaduje žádné speciální aplikace z pohledu složení PM, je nejčastěji volen PM z kategorie nízkolegovaných konstrukčních ocelí (např již zmiňované OK Autrod 12.51).

Je zřejmé, že v katalozích jednotlivých výrobců je nabízeno velké množství PM tohoto typu a proto je tato část věnována pouze PM použitých při provedení praktické části této práce.

## 5.1 OK TUBROD 14.03

OK Tubrod 14.03 je plněná elektroda s kovovým práškem legovaným Ni a Mo a poskytující svarový kov vysoké pevnosti s dobrou vrubovou houževnatostí i při teplotách -40°C. Jako ochranný plyn se používá směs Ar + 20% CO<sub>2</sub>. [8][14][5]

Tabulka 5: klasifikace OK Turborod [8][14]

ESAB	EN ISO 18276-A	AWS A5.28
OK TUBROD 14.03	T 69 4 Mn2NiMo M M 2T 69 4 Mn2NiMo M M 2	E110C-G

Tabulka 6: Chemické složení OK Turborod [8][14]

Chemická značka	C	Si	Mn	Ni	Mo
PZ6138 SR	0.07	0.6	1,7	2.3	0.6

Tabulka 7: Mechanické vlastnosti OK Turborod [8][14]

ESAB	R <sub>p</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	A <sub>5</sub> (%)	CVN (J)/-40°C
14.03	757	842	23	71

Tabulka 8: Doporučené svařovací parametry OK Turborod [8][14]

Průměr drátu (mm)	1.2	1.4	1.6
I (A)	100-320	120-380	140-450
U (V)	16-32	16-34	18-36



Obr 12: Balení PM výrobce ESAB Vamberk [8]

## 5.2 FILARC 61.38 SR

Jedná se o přídatný materiál plněný rutilovým práškem, který zlepšuje operativní vlastnosti svarové lázně a zaručuje dobrou ovladatelnost při svařování v polohách. Je vyvinut přednostně pro svařování ocelových plechů větších tloušťek a zaručuje houževnatost až do  $-60^{\circ}\text{C}$ .

Tento PM je určen pro použití v kombinaci se směsným ochranným plynem Ar + CO<sub>2</sub>.

Elektroda se odtavuje bez rozstříku a pracuje výhradně ve sprchovém přenosu, není proto problém docílit plochých svarů s dobrou smáčivostí k základnímu materiálu.

Tenká vrstva křehké rutilové strusky je z povrchu svaru snadno odstranitelná díky hladké kresbě svaru. [8][14]

Tabulka 9: klasifikace Filarc 61.38SR[8][14]

FILARC	EN ISO 17632-A	AWS A5.29
PZ6138 SR	T 46 6 1Ni P M 1 H5	E81T1-Ni1M J

Tabulka 10: Chemické složení SK Filarc 61.38SR[8][14]

Chemická značka	C	Si	Mn	Ni	P	S
PZ6138 SR	0.048	0.37	1.24	0.84	0.010	0.007

Tabulka 11: Mechanické vlastnosti SK Filarc 61.38SR[8][14]

FILARC PZ	R <sub>p</sub> (MPa)	R <sub>m</sub> (MPa)	A <sub>5</sub> (%)	CVN (J)/-60°C
6138SR	544	613	26	91

Tabulka 12: Údaje ukládání Filarc 61.38SR[8][14]

I (A)	V (m/min)	Rychlost odtavování (kg/h)
170	6.0	2.5
250	11.0	4.2
300	14.5	5.6

## 6 Vady svaru

### 6.1 Hardox 450 jako základní materiál a jeho svařitelnost

Svařitelnost, je schopnost materiálu vytvářet metalurgické spojení s homogenním nebo heterogenním charakterem. Tato vlastnost je popsána pomocí ekvivalentů, tedy vzorců vztahujících vliv chemického složení materiálu právě na svařitelnost. V praxi jsou nejčastěji používány 2 typy vzorců uhlíkových ekvivalentů a to parametr CET (viz vzorec 2), který je určen pro uhlíko-manganové typy ocelí, je založen na rozsáhlém empirickém zkoumání. Druhý parametr CEV (viz vzorec 1) je vhodné použít při výpočtech týkajících se svařování nízkolegovaných vysoko-pevnostních ocelí. Oba dva ekvivalenty jsou popsány normou ČSN EN 1011-2. Při kontrole svařitelnosti pomocí parametru CEV, za předpokladu, že tloušťka ZM je menší než 25mm, obsah uhlíku je menší než 0,2% a  $CEV \leq 0,45$  není svařitelnost nijak podmíněna a je možno svařovat bez předehřevu.

V experimentu byl použit jako ZM otěruvzdorná ocel firmy SSAB HARDOX 450. Tato ocel má velmi příznivé mechanické i technologické vlastnosti viz kapitola 2.4.2. Tabulka 12 ukazuje procentuální zastoupení prvků v ZM a výsledné uhlíkové ekvivalenty CET a CEV. [4][11][12][13]

Tabulka 13: Výsledky spektrální chemické analýzy oceli Hardox 450 [11]

	C [%]	Cr [%]	Mn [%]	Mo [%]	Si [%]	S [%]	P [%]	CEV[%]	CET[%]
Udáváno výrobcem	96,0	0,5	1,6	0,25	0,7	0,01	0,03	0,47	0,44
Naměřeno	96,98	0,19	1,04	0,13	0,75	0,09	0,03	0,45	0,34

Porovnáním hodnot udávaných výrobcem a hodnot naměřených je zřejmé, že se zastoupení prvků Cr, S, Mn a Mo poměrně výrazně liší, avšak výsledné hodnoty CEV a CET byly vypočteny (pomocí vzorců č. 1 a 2) pouze s minimálními rozdíly. Důvodem může být výrobcem uváděné tolerované rozmezí procentuálního zastoupení jednotlivých prvků. [1][3]

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} [\%] \quad (1)$$

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40} [\%] \quad (2)$$

## 6.2 Tvorba trhlin a zamezení jejich výskytu

Trhliny tvořící se ve svarových spojích můžeme podle způsobu vzniku rozdělit do čtyř základních skupin (**za tepla, za studena, lamelární a žíhací**). Největším rizikem v tomto případě jsou první dva uvedené příklady a proto jsou v textu popsány podrobněji.

### Trhliny za tepla

Vznikají jak ve svarovém kovu tak v TOO v průběhu tuhnutí (krystalizace) za vysokých teplot (u ocelí nad 650°) vlivem snížení tažnosti a souvisí s poruchami na hranicích zrn při ochlazování. Vznikají ve svarovém kovu v průběhu tuhnutí (jedná se o tzv. krystalizační) nebo ve vysokoohřátém podhousenkovém pásmu v TOO nebo ve svarovém kovu při několikavrstvém svařování (pak se jedná o likvační trhliny) poslední trhliny jsou polygonizační, ty jsou charakteristické, pro vysokolegované austenitické oceli a slitiny niklu. Metalurgické příčiny vzniku: nečistoty S, P (tvoří s uhlíkem nízkotavitelné sulfidy a fosfidy).[3]

Náchylnost spoje k trhlinám za tepla lze informativně určit parametrickými rovnicemi. Jednou z nich je výpočet parametru H.C.S. (*Hot Cracking Sensitivity*), je to základní ukazatel náchylnosti praskání za tepla a vypočte se podle rovnice (3). Existují i jiné parametry, například nové evropské normy pracují s parametrem U.C.S. (Unit of Crack Susceptibility) uvedeným v rovnici (4)

*Parametr H.C.S [17].:*

$$H.C.S. = \frac{C \cdot \left( S + P + \frac{Si}{25} + \frac{Ni}{100} \right) \cdot 10^3}{3 \cdot Mn + Cr + Mo + V} [\%] \quad (3)$$

Ocel je náchylná v případě že:  $H.C.S > 1,6$  pro nízkolegované oceli

*Parametr U.C.S.:*

$$U.C.S. = 230 \cdot C + 190 \cdot S + 75 \cdot P + 45 \cdot Nb + 40 \cdot Ni + 12,3 \cdot Si + 5,4 \cdot Mn [\%] \quad (4)$$

Pro běžné obsahy legujících prvků v ořezávacích ocelích hodnoty menší než 10 UCS vyjadřují vysokou odolnost a nad 30 nízkou odolnost proti praskání.

## Opatření k zamezení vzniku trhlin za tepla

- Snížení měrného příkonu (změna parametrů nebo metody svařování)
- Používat přídatný materiál o vysoké čistotě (snížit obsah S, P)
- Změna koeficientu svaru (nepoužívat housenky s velkým tvarovým koeficientem svaru a malým průřezem)
- Omezit deformace a napětí použitím vhodných technik svařování
- Optimální geometrii svarových ploch

## Trhliny za studena

Vznikají při nízkých teplotách (cca do 200 °C). Mohou vzniknout ve všech oblastech svarového spoje, nejčastěji však v podhousenkové oblasti svarových spojů (ale mohou být i v kořenu). Nejjednodušším způsobem se dají hodnotit pomocí uhlíkového ekvivalentu, případně lze také použít parametrické rovnice, např. parametr praskavosti  $P_W$ , který zahrnuje vliv chemického složení, difuzního vodíku a tuhosti svařovaného spoje, viz rovnice (5). [3]

Díky nízké hodnotě uhlíkového ekvivalentu jsou oceli Weldox a Hardox odolnější proti vzniku trhlin za studena než řada jiných vysoce pevných ocelí.[3][12]

*Parametr praskavosti  $P_W$  [3]:*

$$P_W = P_{CM} + \frac{H_{D(GI)}}{60} + \frac{K}{40 \cdot 10^4} [\%] \quad (5)$$

$$K = K_0 \cdot t [N/mm \cdot mm] \quad (6)$$

kde:

$P_{CM}$  uhlíkový ekvivalent (CEV(1))

$K$  intenzita tuhosti

$K_0$  měrná tuhost (pro tupý spoj  $K_0=69$ )

$H_{D(GI)}$  obsah dif. vodíku stanoveného glycerinovou zkouškou

$t$  tloušťka svařovaného materiálu[mm]



### **Hlavní příčina vzniku:**

- přítomnost vodíku ve svarovém kovu
- přítomnost struktury citlivé na účinek vodíku (martenzit, bainit)
- přítomnost tahových zbytkových napětí

### **Opatření k zamezení vzniku trhlin za studena**

- Snížení obsahu vodíku (technologie, volba PM, skladování – sušením apod.)
- Aplikace přehřevu, dohřevu a svar provádět vyšším měrným příkonem
- Minimalizování vzniku zbytkových pnutí a deformací vhodnou technikou svařování
- Vyvarovat se ostrých vad – především v kořenové oblasti spoje (studené spoje, neprůvary, zápaly...) [18]

## **7 Experimentální část**

Praktická část této bakalářské práce, je koncipována jako několik na sebe navazujících činností, které mají za cíl stanovit nejvhodnější přídavný materiál pro svařování ocelí typu Hardox 450 pomocí metody FCAW. Experiment byl prováděn v souladu s normou pro kvalifikaci svařovacího postupu (včetně následného vyhodnocení) ČSN EN ISO 15614-1- Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů (v omezeném rozsahu).

Experiment byl realizován v laboratorních a dílenských prostorech Fakulty Strojní ČVUT v Praze, Ústavu strojírenské technologie za přispění zástupců firmy ESAB Vamberk, člen konsorcia s.r.o., jejíž přídavné materiály byly pro experiment použity.

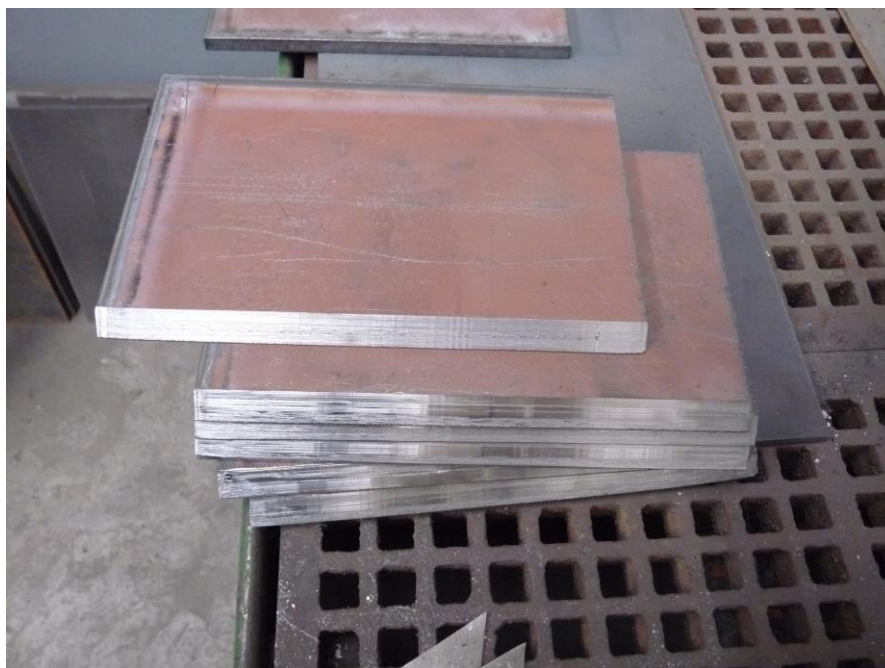
### **7.1 Provedení svaru na zkušebních vzorcích**

Jak již bylo několikrát zmíněno, jako základní materiál pro pokusný vzorek byl stanoven otěruvzdorný plech Hardox 450 o tloušťce 8 mm. Hemické složení a mechanické vlastnosti uvedeny v kapitole 2.4 Mechanické vlastnosti ocelí typu Hardox.

### 7.1.1 Dělení materiálu a příprava svarových ploch

Zvolený materiál je dodáván v tabulích normalizovaných rozměrů, s povrchovou úpravou zamezující degradaci povrchu při přepravě a skladování, které však bylo pro potřeby experimentu nutné nadělit na desky s velikostí odpovídající zkušebnímu svařenci (390 x 390 mm), podle normy ČSN EN ISO 15607 Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů. Dělení ZM na požadovaný rozměr bylo realizováno kyslíko-acetylenovým plamenem.

Z důvodu znehodnoceného a tvarově nevhodného povrchu vzniklého při dělení ohřívacím plamenem a proudem řezacího kyslíku, bylo nutné hrany vzorku v místě budoucího svaru dále obrobít. Přípravu svarových ploch respektive jejich tvar, pro metodu FCAW popisuje norma ČSN EN ISO 9692 – 1. Dle této normy byly svarové plochy zkušebních vzorků obrobeny hoblováním a byl na nich vytvořen úkos tvaru V s vrcholovým úhlem 30°.

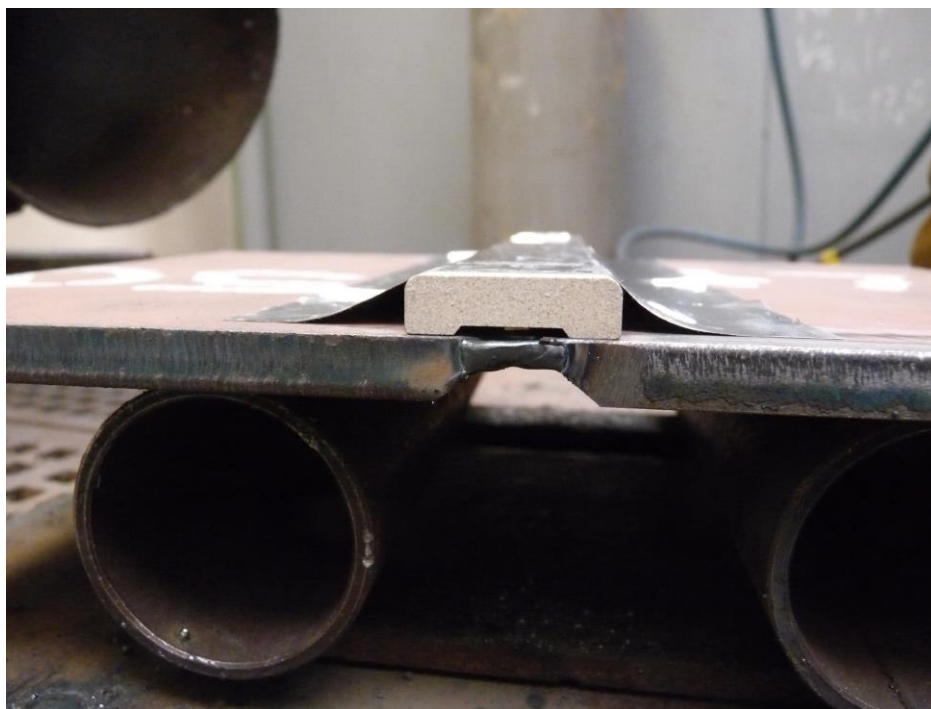


*Obr 13: Zkušební vzorky připravené k provedení experimentu*

### 7.1.2 Provedení zkušebních svarů

Metoda FCAW vyžaduje při provádění jednostranných, tupých, „V“ svarů, z důvodu formování kořene a jeho lepší ochrany před okolní atmosférou, použití keramických kořenových podložek. Před aplikováním podložek bylo provedeno sestehování svařence na

měděném příložném plechu. Po ustavení svařence do polohy PA (označení podle ČSN EN ISO 6947) s již nainstalovanou kořenovou podložkou typu OK backing rectangular bylo možné přistoupit k provedení samotného svarového spoje.



*Obr 14: Sestehovaný zkušební vzorek s aplikovanou kořenovou podložkou*

Po důkladné přípravě byly svařecím zdrojem od výrobce ESAB typu **Origo MIG C3000i, MA23** zhotoveny tři zkušební svarové spoje a to výše představenými přídatnými materiály Filarc PZ61.38SR a OK Turborod 14.03.

Jako ochranný plyn byl zvolen Corgon 18 (82% Ar, 18% CO<sub>2</sub>) dodávaný firmou Linde Group.

Jedním z požadavků na experiment, bylo zkoumání vlivu vneseného tepla na základní materiál a jeho dopad na mechanické vlastnosti provedeného spoje včetně TOO. Proto byly jednotlivé vzorky svařeny rozdílným počtem vrstev s důrazem na nepřekročení teploty interpass stanovené na 180°C.



*Obr 15: Kořenová vrstva svaru – lící strana vzorku*

Při použití přídavného materiálu OK Tubrod 14.03, bylo nutné z povrchu svaru po svařování odstranit strusku, vzniklou roztavením plniva elektrody. Tento úkon u vzorku svařeného elektrodou plného průřezu odpadá. V obou případech byla po ztuhnutí svarového kovu odstraněna keramická kořenová příložka. Díky tomu se urychlilo chladnutí vzorku a zkrátila se doba potřebná k ochlazení zkušebního svařence na teplotu interpass.





*Obr 16: Kořenová vrstva svaru po odstranění podložek – rub vzorku*



*Obr 17: Krycí vrstva třívrstvého svaru po odstranění strusky*

### 7.1.3 Parametry svařování a výpočet tepelného příkonu

Vzorec pro výpočet tepelného příkonu:

$$q = \frac{\eta \cdot U \cdot I}{1\,000 \cdot v} = \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{mm}} \right] \quad (7)$$

q	Tepelný příkon $\left[ \frac{\text{kJ}}{\text{mm}} \right]$
$\eta$	účinnost svařovacího zdroje
U	napětí [V]
I	proud [A]
v	rychlost svařování [mm/min]

Tabulka 14: Parametry svařování vzorku č. 1

#### Vzorek číslo 1 - (3 vrstvy)

-	Kořenová vrstva	Výplňová vrstva	Krycí vrstva
U[V]	14,7	24	24
I[A]	230	270	267
V[mm/min]	140	160	160
S[mm/min]	4,8	6,0	6,0
q[kJ/mm]	1,15	1,94	1,92

Tabulka 15: Parametry svařování vzorku č. 2

**Vzorek číslo 2 - (8 vrstev)**

-	Kořenová vrstva	Výplň 1	Výplň 2	Výplň 3	Výplň 4	Výplň 5	Výplň 6	Krycí vrstva
U[V]	25,0	26,0	26,8	26,5	27,0	27,0	27,0	27,0
I[A]	193	198	203	221	239	239	270	267
V[mm/min]	140	160	160	160	160	160	160	160
S[mm/min]	4,8	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
q[kJ/mm]	1,15	1,54	1,63	1,75	1,93	1,93	1,94	1,92

Tabulka 16: Parametry svařování vzorku č. 3

**Vzorek číslo 3 - (6 vrstev)**

-	Kořenová vrstva	Výplňová vrstva 1	Výplňová vrstva 2	Výplňová vrstva 3	Výplňová vrstva 4	Výplňová vrstva 5
U[V]	25,0	26,0	26,8	26,5	27,0	27,0
I[A]	193	198	203	221	239	226
V[mm/min]	140	165	165	165	165	165
S[mm/min]	8	9	9	9	9	9
q[kJ/mm]	1,65	1,49	1,58	1,70	1,87	1,77

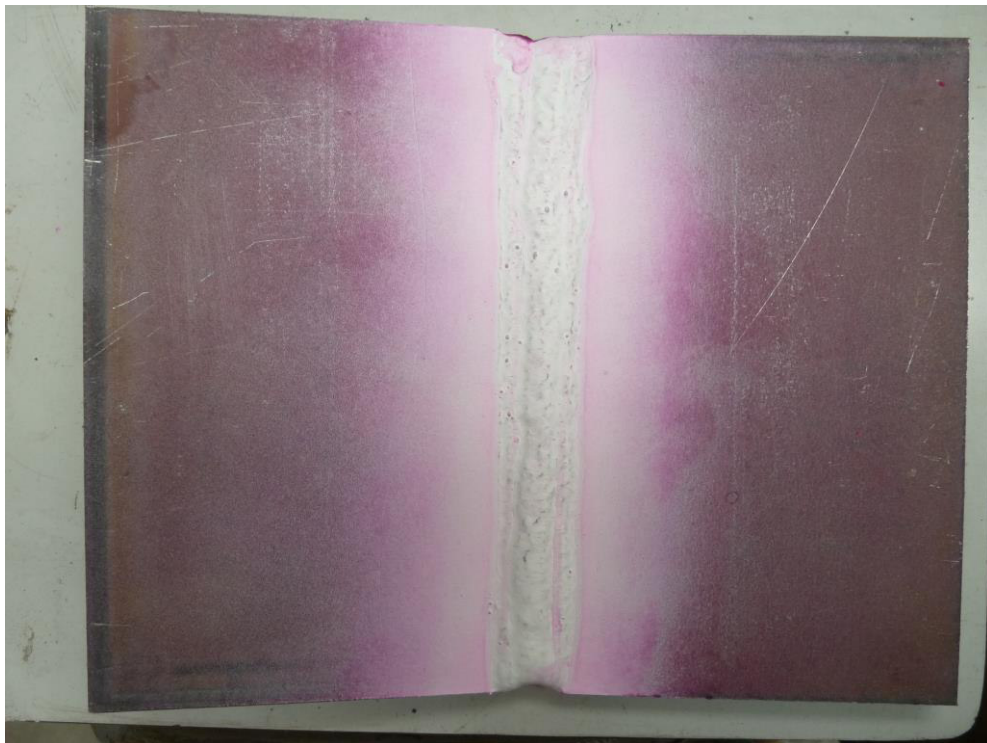
## 7.2 Kontrola svařenců (defektoskopie)

Pro důvěryhodnost zkoušek mechanických vlastností materiálu svarového spoje, provedených na zkušebních tělískách odebraných ze svařence, bylo nutné na každém svarovém spoji provést defektoskopické zkoušky, které by odhalily případné vady svaru. Za tímto účelem byly provedeny 2 metody:

- Vizuální zkouška
- Penetrační zkouška

(Penetrant: PT OVERCHECK – RED, Lot: 0900017294; Čistič: OVERCHECK REMOVER Lot: 0900021860; Vývojka: OVERCHECK – WHITE, Lot: 0900029838)

Obě tyto zkoušky vyloučily u všech svařenců povrchové vady, díky čemuž, bylo možno přistoupit ke zhotovení zkušebních tělísek pro mechanické zkoušky.



Obr 18: Penetrační zkouška s negativním výsledkem nalezení trhliny



## 7.3 Zhotovení zkušebních tělísek pro mechanické zkoušky

Ze svařence, tedy desky 390 x 390 mm, jejímž středem prochází svar, bylo ke zjištění mechanických vlastností svaru a TOO, nutné vyhotovit normalizovaná tělíska pro jednotlivé destruktivní zkoušky (Příčná zkouška tahem, zkouška rázem v ohybu – Charpyho kladivo a měření mikro-tvrdomosti).

Vzhledem k možnému tepelnému ovlivnění po tepelném dělení (laserovým paprskem, plazmovým obloukem, nebo kyslíko-acetylenovým plamenem) a následného zkreslení výsledků výše zmíněných laboratorních zkoušek, byla zvolena varianta dělení materiálu vodním paprskem s abrazivem. Za tímto účelem byla oslovena pražská firma Zukov, kde bylo na CNC stroji jejich vlastní výroby, provedeno vyřezání samotných zkušebních těles.

*Tabulka 17: Parametry použité při řezání vzorků*

<i>Typ abraziva</i>	<i>GMA GARNET 80</i>
<i>Tlak vodního paprsku</i>	<i>3 200bar</i>
<i>Posuv</i>	<i>145 mm/min</i>

Tlak vodního paprsku v kombinaci se zvolenou řeznou rychlostí, měl za následek poměrně nekvalitní řeznou stopu jak po stránce rozměrové, tak i vztaženo na kvalitu povrchu. Tato skutečnost mohla do určité míry ovlivnit výsledky provedených laboratorních zkoušek.

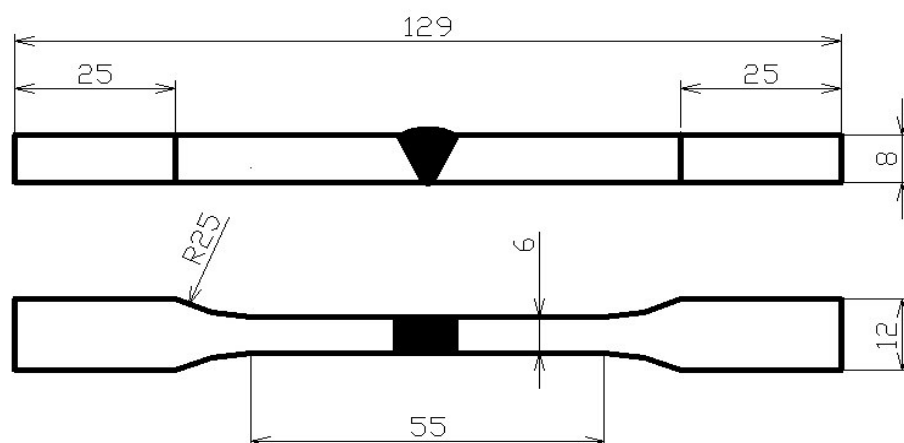


Obr 19: Zkušební tělesa po vyříznutí vodním paprskem

## 7.4 Tahová zkouška

Příčná tahová zkouška je základní zkouškou při zjišťování mechanických vlastností materiálu. Její princip spočívá v tom, že je vzorek zkoušeného materiálu, normalizovaného tvaru vystaven jednoosému tahovému zatížení. Toto zatížení po čas zkoušky narůstá a je zaznamenávána zatěžující síla v závislosti na prodloužení vzorku. Zatěžující síla narůstá od nulové, či mírně předepjaté  $F_0=100\text{N}$ , až do přetržení vzorku. Rozměry zkušební tyčinky jsou uvedeny na obrázku č. 19.

Zjišťované parametry při této zkoušce jsou mez pevnosti, mez kluzu a tažnost.



Obr 20: Rozměry zkušebního tělesa pro realizaci Tahové zkoušky

### 7.4.1 Pracoviště pro provádění tahové zkoušky

Tato laboratoř je vybavena zkušebním strojem LabTest Model 5.100SP1 kompatibilním s PC a softwarem Test & Motion pro zaznamenávání údajů získaných při průběhu zkoušky a jejich následného vyhodnocení.

Jako upínací zařízení byly použity samosvorné upínací klínové čelisti, o kapacitě tahové síly až 600 kN. Pro měření prodloužení zkoumaného vzorku je stroj vybaven laserovým extenzometrem.

Tabulka 18: Parametry stroje LabTest Model 5.100S

Technická data	5.100SP1
Jmenovité zatížení [kN]	100
Max. zkušební rychlost [mm/min]	600
Přesnost řízení rychlosti [%]	±0,5
Rozlišení příčnicku [μm]	1
Tuhost rámu [mm/N]	1,6x10 <sup>-6</sup>
rozpětí sil [kN]	500-600
Přesnost měření síly [%]	±0,3 z hodnoty v rozsahu
Přesnost dráhy [μm]	1 - ČSN EN 9513
Přesnost měření napětí [%]	±0,5 průtahoměru



*Obr 21: Zkušební stroj LabTest Model 5.100SP1*

#### **7.4.2 Postup provedení Tahové zkoušky**

Ze třech zkušebních svarů bylo odebráno celkem devět kusů vzorků, po třech z každého svařence. Každý z těchto vzorků byl následně podroben tahové zkoušce.

Před upnutím konkrétního kusu do čelistí stroje byly u každého vzorku individuálně změřeny délky stran obdélníkového průřezu a hodnoty zaznamenány do softwaru přístroje.

Pro přesné změření prodloužení pokusné trhací tyčinky, bylo nezbytné na každý zkušební vzorek nainstalovat dvě pomocné reflexní značky, umožňující laserovému extenzometru zaznamenávat aktuální změnu délky. Tímto způsobem bylo při experimentu přezkoumáno všech devět vzorků.

### 7.4.3 Vyhodnocení výsledků Tahové zkoušky

Pro vyhodnocení dat získaných z jednotlivých experimentů byly použity následující vzorce a zkratky:

*Smluvní mez kluzu:*

$$R_{p0,2} = \frac{F_{p0,2}}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (8)$$

*Mez pevnosti v tahu:*

$$R_m = \frac{F_m}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (9)$$

*Tažnost:*

$$A = \frac{(l_u - l_0)}{l_0} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (10)$$

$F_{p0,2}$  síla potřebná pro dosažení trvalé hodnoty deformace 0,2 %

$F_m$  maximální dosažená síla před přetržením tyče [N]

$S_0$  plocha průřezu vzorku před zatížením [mm<sup>2</sup>]

$L_0$  počáteční změřená délka zkušební tyče [mm]

$L_u$  měřená délka vzorku po přetržení [mm]

$a_0$  tloušťka zkušebního tělesa před deformací [mm]

$b_0$  šířka zkušebního tělesa před deformací [mm]

## Vzorek číslo 1:

Tabulka 19: Specifikace vzorku číslo 1

Základní materiál	Hardox 450
Přídavný materiál	PZ61.38SR
Počet vrstev/Průměr elektrody [mm]	3/1,2

Tabulka 20: Hodnoty výsledků tahové zkoušky vzorku číslo: 1

<i>N</i>	<i>a<sub>0</sub></i>	<i>b<sub>0</sub></i>	<i>L<sub>0</sub></i>	<i>R<sub>p0,2</sub></i> [N/mm <sup>2</sup> ]	<i>F<sub>p0,2</sub></i> [N]	<i>R<sub>m</sub></i> [N/mm <sup>2</sup> ]	<i>F<sub>m</sub></i> [N]	<i>A</i> [%]
A	8	6,19	50,2	414	20531, 0	511	27310, 0	11,49
B	8	5,96	50,25	449	21409, 70	575	27432, 50	11,78
C	8	6,1	50,4	419	20462, 60	544	26540, 70	11,11

## Vzorek číslo 2:

Tabulka 21: Specifikace vzorku číslo 2

<b>Základní materiál</b>	<b>Hardox 450</b>
<b>Přídavný materiál</b>	<b>PZ61.38SR</b>
<b>Počet vrstev/Průměr elektrody [mm]</b>	<b>8/1,2</b>

Tabulka 22: Hodnoty výsledků tahové zkoušky vzorku číslo: 2

<i>N</i>	<i>a<sub>0</sub></i>	<i>b<sub>0</sub></i>	<i>L<sub>0</sub></i>	<i>R<sub>p0,2</sub></i> [N/mm <sup>2</sup> ]	<i>F<sub>p0,2</sub></i> [N]	<i>R<sub>m</sub></i> [N/mm <sup>2</sup> ]	<i>F<sub>m</sub></i> [N]	<i>A</i> [%]
<i>A</i>	8	5,9	50,18	448	21943,2	605	28543, 7	11,24
<i>B</i>	8	6,2	50,57	444	22012, 6	592	29344, 20	11,89
<i>C</i>	8	5,97	50,3	471	22498, 50	591	28219, 80	11,79

## Vzorek číslo 3:

Tabulka 23 : Specifikace vzorku číslo 3

<b>Základní materiál</b>	<b>Hardox 450</b>
<b>Přídavný materiál</b>	<b>OK Tubrod 14.03</b>
<b>Počet vrstev/Průměr elektrody [mm]</b>	<b>6/1,6</b>

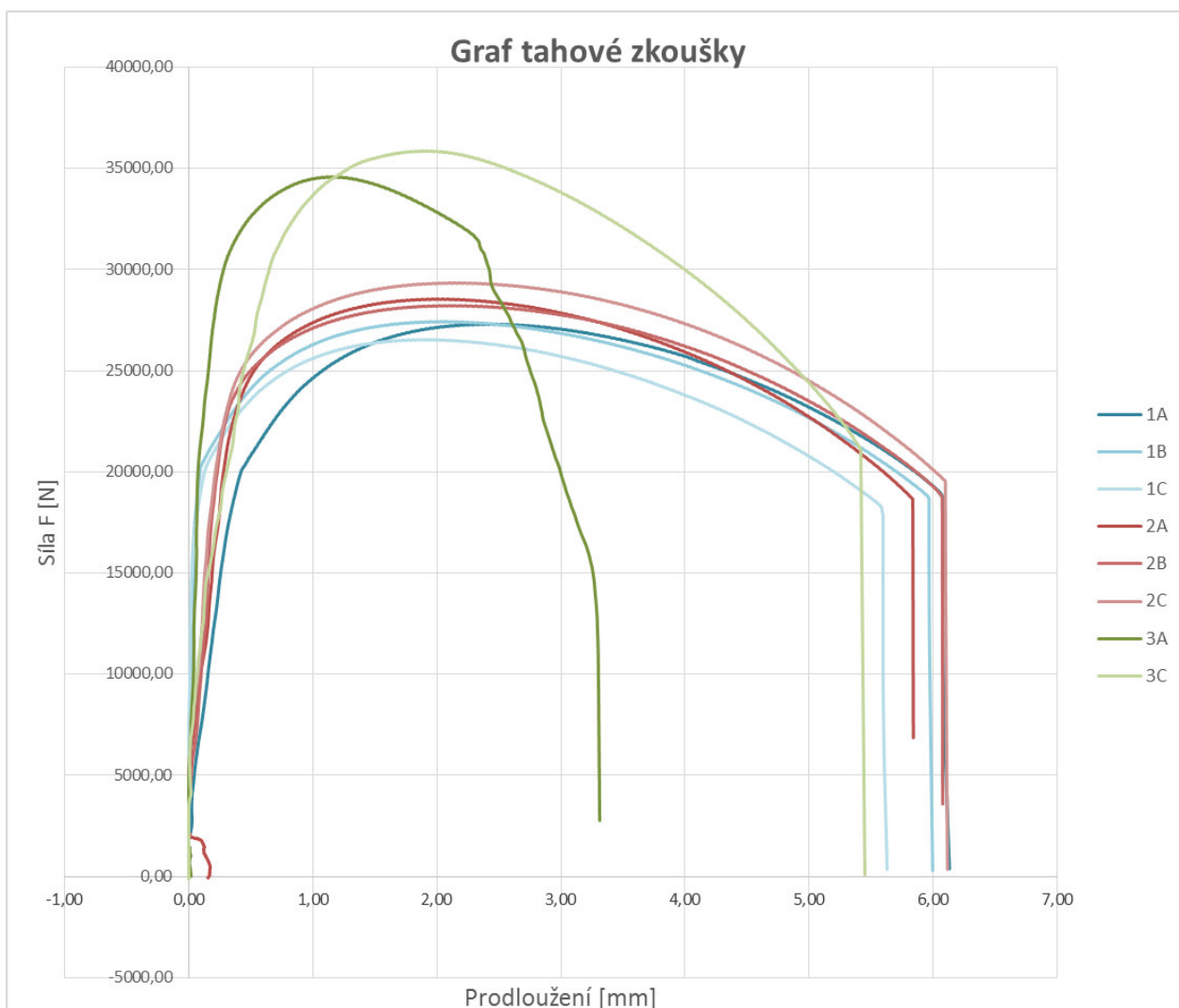
Tabulka 24: Hodnoty výsledků tahové zkoušky vzorku číslo: 3

<i>N</i>	<i>a<sub>0</sub></i>	<i>b<sub>0</sub></i>	<i>L<sub>0</sub></i>	<i>R<sub>p0,2</sub></i> [N/mm <sup>2</sup> ]	<i>F<sub>p0,2</sub></i> [N]	<i>R<sub>m</sub></i> [N/mm <sup>2</sup> ]	<i>F<sub>m</sub></i> [N]	<i>A</i> [%]
<i>A</i>	8	6,26	50,35	563	28178, 30	691	34586, 2	6,5
<i>B</i>	-	-	-	-	-	-	-	-
<i>C</i>	8	6,18	49,98	499	24677, 7	725	35862, 70	10,31

Většina vzorků vykazuje při destruktivní zkoušce tahem reálné hodnoty, kromě zkušební tyčinky označení B ze třetího vzorku. Při zatěžování zkušebního tělesa došlo k prokluzu upínací části normalizované trhací tyčinky v dolní kleštině a tím pádem ke zkreslení údajů naměřených při této zkoušce. Proto nejsou tyto hodnoty brány v potaz při vyhodnocování zkoušky, i když by se za výsledek zkoušky měla považovat průměrná hodnota minimálně za tří měření.

Měřicím přístrojem vygenerované údaje tahové zkoušky všech devíti zkušebních těles byly pro názornost zpracovány do grafu, kde se zřetelně ukazují rozdílné mechanické vlastnosti jednotlivých svarů. Markantní odlišnost křivek třetího vzorku (zelená barva) od vzorků jedna (modrá barvy) a vzorků 2 (červená barva), je způsoben především odlišným přídavným materiálem respektive jeho odlišnými mechanickými vlastnostmi.





Graf č. 2: Výsledky tahové zkoušky – Pracovní diagram

## 7.5 Zkouška tvrdosti

Tvrдость, je definována jako odpor daného materiálu odolávat vniknutí cizího tělesa. Z této definice vyplývá, že tvrdší materiál zanechá vryp v materiálu měkčím, avšak naopak toto tvrzení neplatí. Na základě těchto poznatků, bylo vymyšleno, ustanoveno a normalizováno několik postupů a typů zkoušek tvrdosti.

Pro účel tohoto experimentu byla vybrána zkouška tvrdosti podle Vickerse, kterou popisuje norma pro hodnocení svarových spojů ČSN EN 1043-2 . Její princip spočívá v tom,

že je daným časem a zatížením, do povrchu zkoušeného materiálu, vtiskován diamantový čtyřboký jehlan určitého tvaru a velikosti. Následně se měří délky úhlopříček vtisku a jejich velikosti se podle vzorce č. 11 přepočítají na hodnotu tvrdosti podle Vickerse HV. [19]

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (11)$$

F *síla vtlačování [N]*

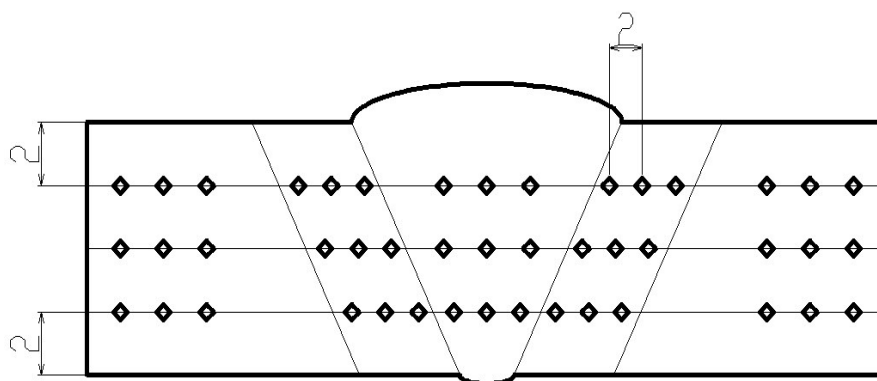
d *úhlopříčka vtisku [mm]*

### 7.5.1 Pracoviště pro měření tvrdosti a příprava vzorků

Měření tvrdosti bylo provedeno v laboratořích FS ČVUT na stolním mikro-tvrdoměru značky Buehler. Tvrdost byla měřena ve stupnici Vickerse HV1 (zatížení 1 kg).

Vzorky z materiálu o tloušťce 8 mm bylo třeba nejprve upravit a to několikařávkovým broušením. Hrubý povrch, který na hranách zkušební vzorku při řezání zanechal vodní paprsek, bylo třeba zbrousit až do kvalitního lesklého povrchu, aby bylo následně možno pod mikroskopem správně změřit úhlopříčky kontrolních vpichů.

Kontrolní vpichy byly umístěny tak, aby obsáhly oblast základního materiálu, tepelně ovlivněné oblasti i svarového kovu. Rozmístění vpichů je znázorněno na obrázku č. 22.



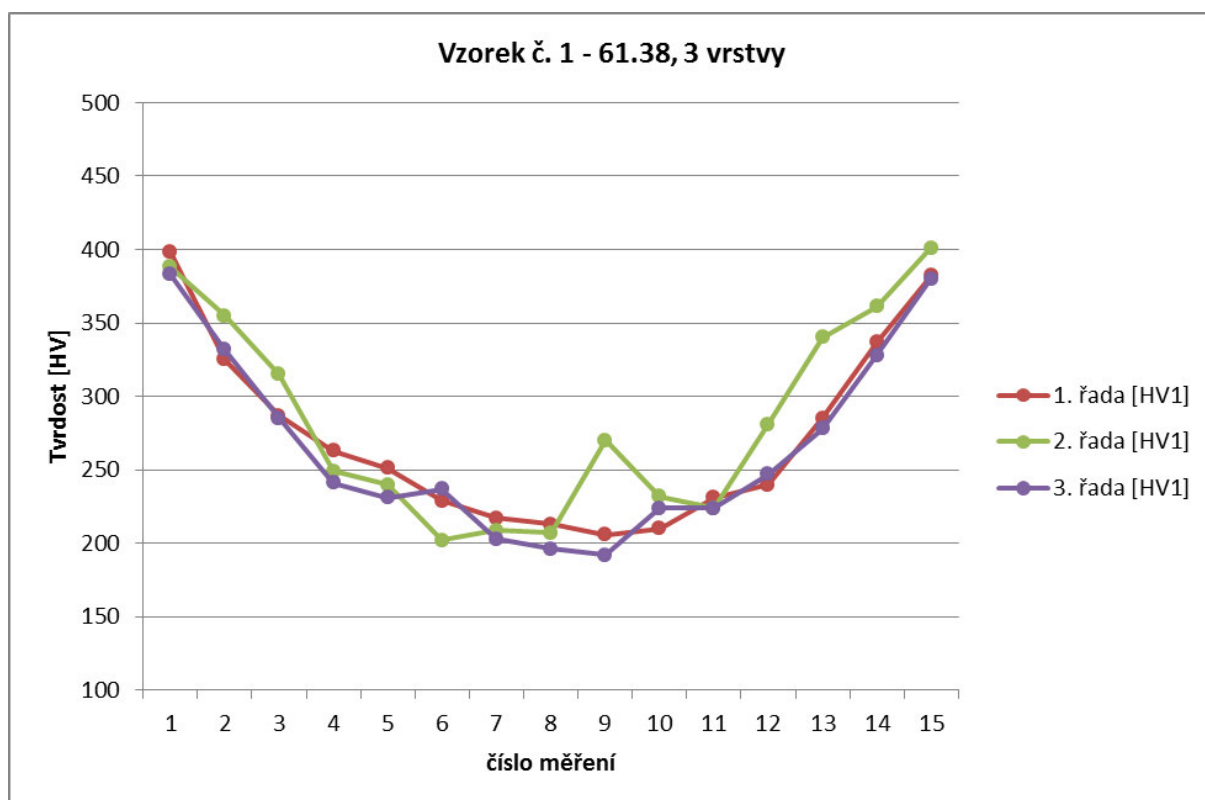
Obr 22: Schéma rozmístění vpichů při měření tvrdosti

## 7.5.2 Naměřené hodnoty tvrdosti

### Vzorek číslo 1:

Tabulka 25: Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku číslo 1

	ZM levá			TOO levá			SK			TOO pravá			ZM pravý		
číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1. řada [HV1]	398	325	287	263	251	229	217	213	206	210	231	240	285	337	382
2. řada [HV1]	388	355	315	249	240	202	209	207	270	232	224	281	340	361	401
3. řada [HV1]	383	332	285	241	231	237	203	196	192	224	224	247	278	328	380
Průměrná hodnota [HV1]	389	338	295	251	240	222	209	205	222	250	226	256	301	342	387

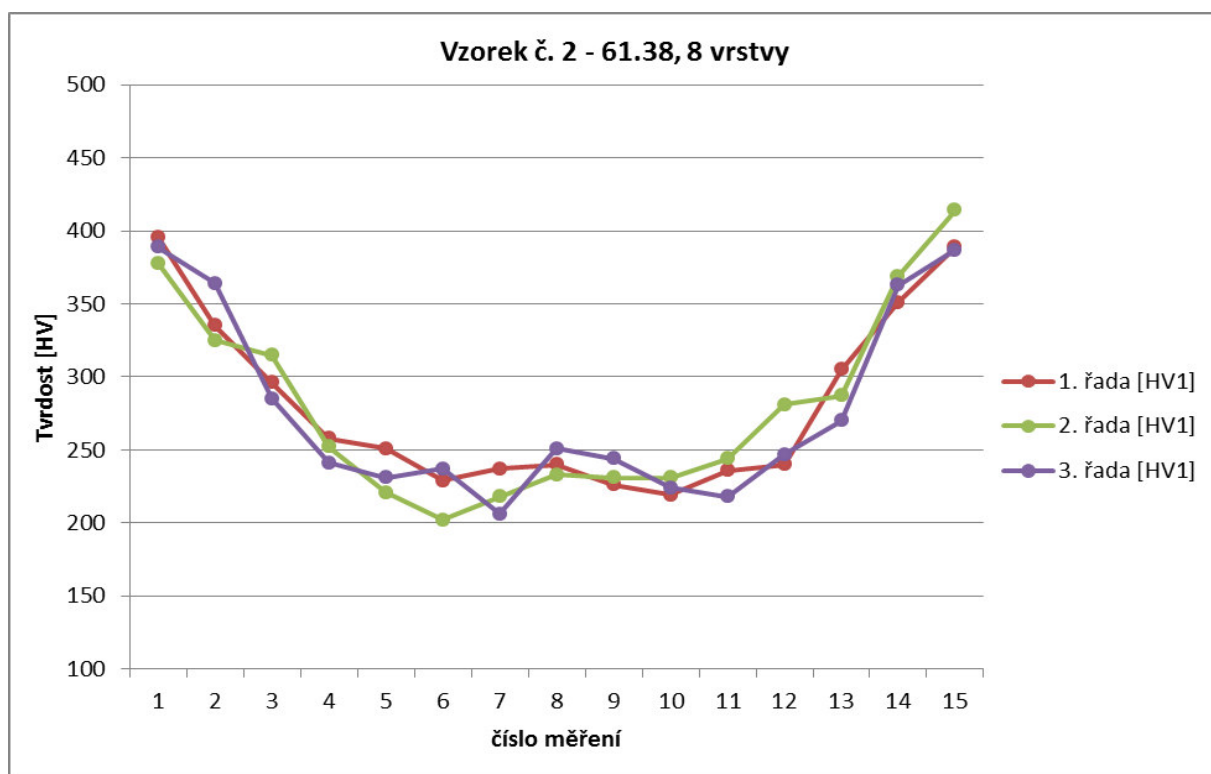


Graf č. 3: Hodnoty tvrdosti získané ze vzorku číslo 1

## Vzorek číslo 2:

*Tabulka 26: Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku číslo 2*

číslo měření	ZM levá			TOO levá			SK			TOO pravá			ZM pravý		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<b>1. řada [HV1]</b>	396	335	296	258	251	229	237	240	226	219	236	240	305	351	389
<b>2. řada [HV1]</b>	378	325	315	252	221	202	218	233	231	231	244	281	287	369	414
<b>3. řada [HV1]</b>	389	364	285	241	231	237	206	251	244	224	218	247	270	363	387
<b>Průměrná hodnota [HV1]</b>	387	341	298	251	234	222	220	241	233	224	232	256	287	361	396

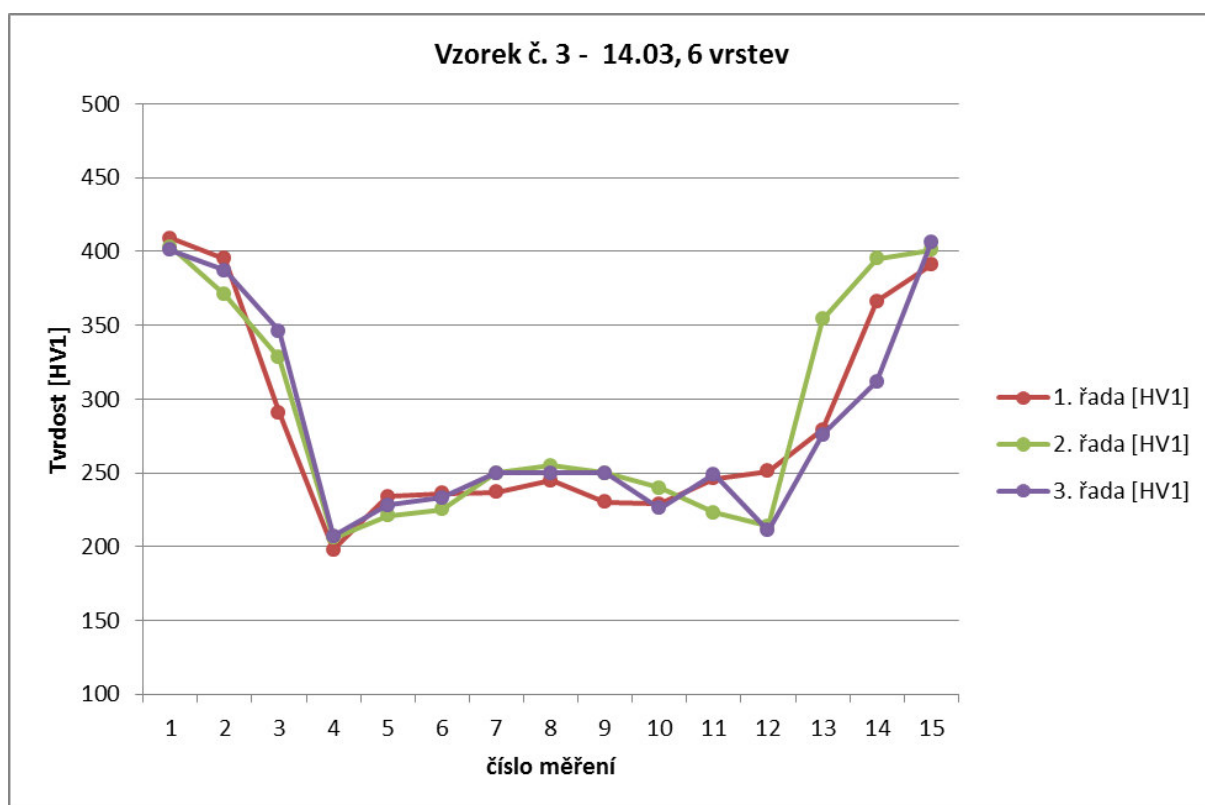


*Graf č. 4: Hodnoty tvrdosti získané ze vzorku číslo 2*

## Vzorek číslo 3:

	ZM levá			TOO levá			SK			TOO pravá			ZM pravý		
číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1. řada [HV1]	409	395	291	198	234	236	237	245	230	229	246	251	279	366	391
2. řada [HV1]	403	371	328	206	221	225	250	255	250	240	223	214	354	395	401
3. řada [HV1]	401	387	346	207	228	233	250	250	250	226	249	211	276	312	406
Průměrná hodnota [HV1]	404	384	321	204	283	231	246	253	243	231	239	225	269	357	398

*Tabulka 27: Naměřené hodnoty tvrdosti vzorku číslo 3*

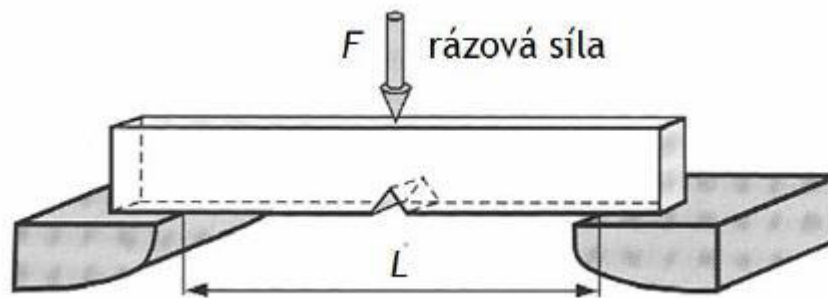


*Graf č. 5: Hodnoty tvrdosti získané ze vzorku číslo 3*

## 7.6 Zkouška rázem v ohybu

Zkouška rázem v ohybu je definována jako zatěžování tělesa rázem, tedy silou koncentrovanou do velmi krátkého časového období. S rostoucí rychlostí deformace se totiž materiály stávají křehčími a už při malém průhybu se mohou tělesa deformovat, nebo porušit. Proto se lom materiálu vzniklý rázem, jeví jako křehký, i když je daný materiál z kategorie houževnatých. Tento jev je způsoben tím, že materiál nemá dostatek času absorbovat tolik energie v tak krátkém časovém okamžiku.

Rázová houževnatost je zavedena jako kinetická energie rázového kladiva (provádí se na Carpyho kladivu), potřebná k přeražení zkušebního tělesa, vztažená na původní plochu průřezu zkušební vzorku s vrubem.



Obr 23: Schéma působení rázové deformace metodou Charpy



*Obr 24: Zkušební stroj - Charpyho kladivo*

### **7.6.1 Popis provedení zkoušky**

Zkušební tělesa byla stejně tak, jako tělesa pro tahovou zkoušku, ze vzorků svarů odebrána vodním paprskem a jejich tvar a rozměry odpovídaly normě ČSN EN 10045-1.

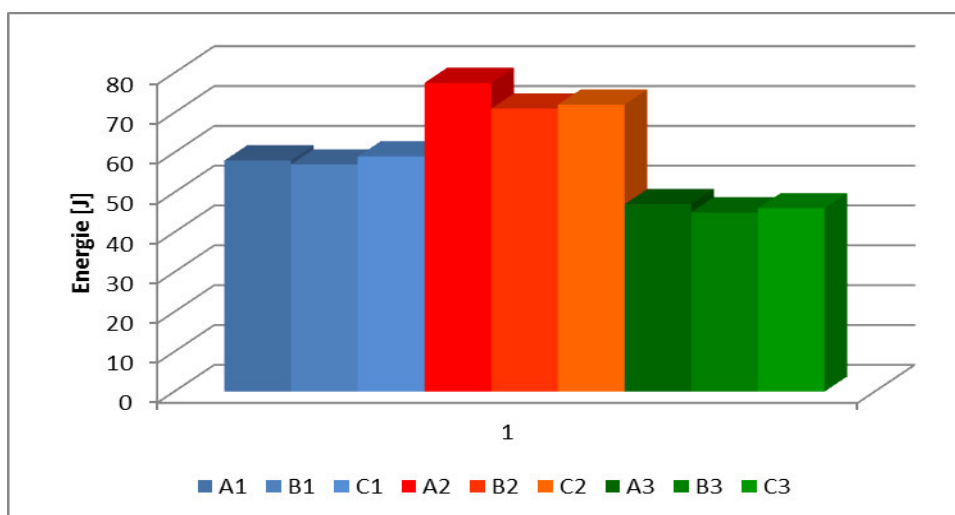
V každém z těles byl ze strany krycí vrstvy svaru proveden vrub normalizovaného tvaru „V“ s vrcholovým úhlem  $45^{\circ}$  a konstantní hloubce 2 mm. Obr.22.

Následovalo označení vzorků, jejich ustavení do opěrných čelistí a samotná zkouška. Experiment byl prováděn na čistě mechanickém stroji v laboratořích FS ČVUT. Vlastní zkoušení proběhlo při teplotě  $20^{\circ}\text{C}$

## 7.6.2 Naměřené hodnoty rázové energie

Tabulka 28: Naměřené hodnoty nárazové práce potřebné pro přeražení zkušebních vzorků

	Vzorek číslo 1			Vzorek číslo 2			Vzorek číslo 3		
Označení zkušebního vzorku	A1	B1	C1	A2	B2	C2	A3	B3	C3
Naměřená Nárazová práce [J]	<b>58</b>	<b>57</b>	<b>59</b>	<b>77,5</b>	<b>71</b>	<b>72</b>	<b>47</b>	<b>45</b>	<b>46</b>



Graf č. 6: Porovnání rázové práce potřebné k přeražení vzorků

Výsledky zkoušky odpovídají reálným hodnotám, při čemž nejlepší výsledky vykazuje vzorek číslo 2, tedy přídavný materiál 61.38, svar vařen na 8 vrstev. Dobré mechanické vlastnosti vzorku 2 jsou v porovnání se vzorkem 1, který byl svařován za stejných technologických podmínek, stejným PM, ale menším počtem vrstev (viz kapitola 7.1.2 provedení zkušebních svarů) zapříčiněny omezením vneseného tepla do svařence.





*Obr 25: Detail lomu zkušebního vzorku*

## 8 Závěr

Firmou F.X. Meiller Slaný s.r.o., byl zadán požadavek na experimentální zjištění typu vhodného přídavného materiálu pro svařování otěruvzdorných plechů Hardox 450 metodou FCAW . Je to metoda obloukového svařování v ochranné atmosféře, kde hoří oblouk mezi ZM a do svaru přiváděnou plněnou elektrodou. Ke svaření daného ZM byly tedy k porovnání vybrány dva druhy přídavného materiálu (OK 14.03 a 61.38SR) a po následném provedení svarů kvalifikovaným odborníkem a kontrole jejich jakosti následovaly zkoušky mechanických vlastností odebraných zkušebních vzorků. Popisu ZM, PM a metody svařování se detailně věnuje teoretická část této práce.

V praktické části BP je dopodrobna zaznamenán postup svařování a technologické podmínky pro každý zkušební svar, včetně obrazové dokumentace. Dále jsou v praktické části popsány principy zkušebních metod mechanických vlastností materiálů, se všemi naměřenými výslednými hodnotami, pečlivě zaznamenanými v tabulkách a pro přehlednost promítnuty do grafů.

Z výsledků experimentů vyplývá, že na mechanické vlastnosti svarového spoje nemá vliv pouze druh přídavného materiálu, ale podstatnou měrou jsou ovlivňovány i technologickými podmínkami, při kterých byl svarový spoj vytvořen. Jako nejvýhodnější kombinace výše zmíněných podmínek svařování se ukázala varianta svařování Hardoxu 450, tloušťky 8 mm, přídavným materiálem 61.38SR a to na osm vrstev s dodržením teploty interpass 180<sup>0</sup>C. Výhody této varianty (vzorek číslo 2) ale značnou měrou eliminují špatné ekonomické výsledky. Svařování vícevrstvého (osmivrstvého) svaru je velice zdlouhavé, náročné po energetické stránce a proto v praxi nepřijatelné.

Jako alternativní variantu je možno zvolit vzorek č. 1, tedy méně vrstvé svary za použití téhož PM 61.38SR, které ovšem nevykazují tak výhodné hodnoty vrubové houževnatosti jako první případ, ale po ekonomické stránce jsou v praxi uplatnitelné a výsledky jsou vyhovující. Co se týče tahové zkoušky, má tento svar jen zanedbatelně nižší hodnoty  $R_e$  a  $R_m$ , než vzorek č. 2. Naměřená tvrdost je u tohoto vzorku nejnižší, což je výhodné pro to, že svarový kov s menší pevností lépe absorbuje pnutí svařence.

Vzorek číslo 3, kde byl použit PM OK 14.03 (svařeno na 6 vrstev), vyniká dobrými výsledky v tahovém namáhání avšak nejnižší naměřené hodnoty vrubové houževnatosti a

tvrdost srovnatelná se vzorkem číslo 2, z něj činí materiál vhodný pro použití pouze v těch případech, kdy je kladen důraz na pevnost v tahu a kdy svar není velkou měrou zatěžován rázy.

Experimentální část prokázala výhodnost použití metody FCAW především u kratších svarů, hlavně z důvodu manuálního vedení hořáku, náročnosti přípravy svarových ploch, vyšší ceny PM a nízkých pořizovacích nákladů svářecích zdrojů a příslušenství.

Vzhledem k tomu, že firma F.X. Meiller Slaný s.r.o. z materiálu Hardox 450 vyrábí korby nákladních automobilů, na kterých jsou prováděny i dlouhé svary, bylo by při zvýšení objemu výroby vhodné, volit hospodárnější a pokud možno automatizovatelnou technologii svařování.

## Seznam použité literatury

1. KOLEKTIV AUTORŮ. *Perspektivní materiály*. 3. vyd. Praha: ČVUT, 2008. ISBN 978-80-01-04167-3.
2. KOLEKTIV AUTORŮ. *Technologie I: Slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy*. Druhé vydání. Praha: ČVUT, 5/2006. ISBN 80-01-02351-6.
3. KOLEKTIV AUTORŮ. *Materiály a jejich svařitelnost*. 2. vydání. Ostrava: ZEROSS, 1/2001. ISBN 80-85771-85-3.
4. KOUKAL, Jaroslav; ZMYDLENÝ, Tomáš. *Svařování I*. 1. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2005. 98 s.
5. <http://www.linde-gas.cz/cs/index.html>
6. <http://www.dillinger.de/dh/produkte/marke/dillidur/index.shtml.en>
7. <http://quard.eu.nlmk.com/home>
8. <http://www.esab.cz/cz/cz/products/index.cfm?fuseaction=home.product&productCode=410215&tab=1>
9. <http://www.schinkmann.cz/obloukove-svarovani-plnenou-trubickovou-elektrodou>
10. <http://www.china-weldnet.com/English/information/II-1535-04.htm>
11. <http://www.hardox.com/>
12. <http://www.hardox.com/Handling/Preheating1/>
13. <http://www.hardox.com/en/Handling/Welding1/>
14. <http://www.ssab.com/en/Products--Services/Service--Support/Technical-support/Knowledge-Service-Center/Joining/Welding-Hardox/>
15. <http://www.winfa.sk/oteruvzdorne-vysokopevne-ocel/palene-polovyrobky>
16. <http://tzs.kmm.zcu.cz/povrchy3.pdf>
17. <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/TU/TU/4kapitola.pdf>
18. KOLEKTIV AUTORŮ. *Technologie svařování a zařízení*. 1. vydání. Ostrava: ZEROSS, 8/2001. ISBN 80-85771-81-0.
19. [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM\\_11.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_11.pdf)

## Seznam použitých symbolů, jednotek a zkratek

CEV	uhlíkový ekvivalent	[%]
CET	uhlíkový ekvivalent	[%]
Re	mez kluzu	[MPa]
Rm	mez pevnosti	[MPa]
A	tažnost	[%]
q	tepelný příkon svařování	[kJ/mm]
TOO	tepelně ovlivněná oblast	
SK	svarový kov	
H.C.S.	Hot Cracking Sensitivity	
U.C.S.	Unit of Crack Susceptibility	
PM	přídavný materiál	
t	tloušťka svařovaného materiálu	[mm]
P <sub>w</sub>	parametr praskavosti	[%]
η	součinitel účinnosti metody svařování	
U	napětí na oblouku	[V]
I	svařovací proud	[A]
v	svařovací rychlost	[mm/min]
FCAW	Flux-Cored Arc Welding	
MIG	Metal Inert Gas	
MAG	Metal Activ Gas	
F <sub>p0,2</sub>	síla, při které dosáhne trvalá deformace hodnoty 0,2 % počáteční měřené délky zkušební tyče, [N]	
F <sub>m</sub>	největší síla před přetržením tyče, [N]	
S <sub>0</sub>	počáteční plocha příčného průřezu, [mm <sup>2</sup> ]	

$L_0$	počáteční měřená délka zkušební tyče, [mm]
$L_u$	konečná měřená délka zkušební tyče po přetržení, [mm]
$a_0$	počáteční tloušťka plochého zkušebního tělesa[mm]
$b_0$	počáteční šířka zkoušené délky plochého zkušebního tělesa[mm]