



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

## PLAZMOVÉ ŘEZÁNÍ VYSOKOPEVNOSTNÍCH OCELÍ

PLASMA CUTTING OF HIGH STRENGTH STEELS

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Šmak

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček

BRNO 2021

# Zadaní bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	<b>Martin Šmak</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce:	<b>Ing. Jaroslav Kubíček</b>
Akademický rok:	2020/21

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 bakalářské práce:

## Plazmové řezání vysokopevnostních ocelí

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vysokopevnostní oceli jsou v současné době využívány v celé řadě náročných dynamicky zatížených konstrukcí. Dělení ocelí větších tloušťek je možné jedině tepelným procesem a protože řezání kyslíkem výrazně snižuje mechanické vlastnosti okolí řezu je preferováno řezání plazmou až do tloušťky 150 mm. Bakalářská práce řeší vliv procesu řezání plazmou na velikost tepelného ovlivnění u různých druhů ocelí.

### Cíle bakalářské práce:

- vypracovat literární studii na tepelné dělení plazmou,
- vyhodnotit parametry a podmínky řezání, které mají vliv na kvalitu řezu a ovlivnění řezaného materiálu,
- navrhnout parametry pro experimentální ověření vlivu řezání na vysokopevnostní oceli,
- provést a vyhodnotit experiment.

### Seznam doporučené literatury:

OLSON D.L. a kolektiv autorů. ASM Handbook. Welding, brazing, and soldering Volume 6, Materials Park, Ohio, 2011. ISBN-13978-1-61503-133-7.

KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3.

KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0.

KOLEKTIV AUTORŮ. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení, 1. vyd. Zeross, Ostrava 1999, 249s. ISBN 80-85771-70-5.

KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Dělení je jednou ze základních operací při zpracování oceli a výrobě produktů. Dělení vysokopevnostních ocelí nicméně představuje významný technologický problém, jelikož při použití řady metod dělení dochází ke vnesení značného množství tepla do materiálu. To může vést k výraznému ovlivnění mechanických vlastností oceli.

Tato práce je zaměřena na využití plazmového řezání pro dělení vysokopevnostních ocelí. Teoretická část práce pojednává o technologii výroby ocelí a používaných metodách jejich dělení a o technologii plazmového řezání. Jsou diskutovány parametry ovlivňující proces plazmového řezání a jejich možný vliv na kvalitu řezu. Dále je pojednáno o tepelně ovlivněné oblasti při použití plazmy pro dělení oceli.

V rámci experimentální části byl sledován vliv plazmového dělení materiálu na tvrdost vybraných druhů vysokopevnostních ocelí. Pro experimenty byly použity tři druhy vysokopevnostní oceli: ARMOX 500 T, STREX 650 MC E a XAR®450. Řezy byly prováděny ve dvou různých rychlostech řezání. Byla vyhodnocena velikost tepelně ovlivněné oblasti a změna tvrdosti materiálu v různých částech řezu.

Práce ukazuje, že při korektním zvolení parametrů je plazmové řezání vhodné pro dělení vysokopevnostních ocelí. Je ukázán a diskutován vliv použití této metody na změnu mechanických vlastností vybraných druhů vysokopevnostních ocelí.

## **KLÍČOVÁ SLOVA:**

Vysokopevnostní ocel; plazma; plazmové řezání; tvrdost; tepelně ovlivněná oblast

## **ABSTRACT**

Cutting of steel is one of the fundamental operations within steel processing and steel product manufacturing. The cutting of high-strength steels represents a significant technological problem since the application of many methods produces an extensive amount of heat that is introduced into the material. The heat may significantly impact the mechanical properties of the steel.

The thesis is focused on the application of the method of plasma cutting on high-strength steels. In the theoretical part of the present thesis, the common methods of cutting of steel and the plasma cutting technology are described. The parameters influencing the process of plasma cutting and their impact on the quality of the section are discussed. Furthermore, the concept of a heat-affected zone in the context of the plasma cutting method is concerned.

The experimental part deals with the influence of plasma cutting on the hardness of certain types of high-strength steels. Three types of high-strength steels were used for the experiments: ARMOX 500 T, STREX 650 MC E, and XAR®450. The sections were performed with two different cutting speeds. The size of the heat-affected zone and the hardness in the different areas of the section were evaluated.

The results show that the plasma cutting is suitable for cutting of high-strength steels if appropriate parameters are selected. The influence of this method on the mechanical properties of certain high-strength steels is shown and discussed.

## **KEYWORDS:**

High-strength steel; plasma; plasma cutting; hardness; heat-affected zone

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

ŠMAK, Martin. *Plazmové řezání vysokopevnostních ocelí* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132396>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 21. 5. 2021

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Jaroslavu Kubíčkoví za odborné vedení a pomoc při zpracování experimentálních laboratorních měření. Dále bych poděkoval panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D. za vedení přípravného kurzu.

V Brně dne 21. 5. 2021

.....  
Podpis

# OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>1 OCELI A JEJICH VLASTNOSTI</b> .....	<b>10</b>
<b>1.1 Rozdělení ocelí</b> .....	<b>10</b>
<b>1.2 Oceli vyšších pevností</b> .....	<b>11</b>
<b>1.3 Tepelně ovlivněná oblast u VP ocelí</b> .....	<b>15</b>
<b>2 DĚLENÍ MATERIÁLŮ</b> .....	<b>16</b>
<b>3 PLAZMOVÉ ŘEZÁNÍ</b> .....	<b>20</b>
<b>3.1 Princip metody</b> .....	<b>20</b>
<b>3.2 Zařízení pro řezání plazmou</b> .....	<b>23</b>
<b>3.3 Parametry řezání plazmou a jejich vliv na vlastnosti řezu</b> .....	<b>25</b>
<b>3.4 Přesná plazma s vysokým rozlišením – technologie HyDefinition®</b> .....	<b>26</b>
<b>3.5 Tepelně ovlivněná oblast VP ocelí při plazmovém řezání</b> .....	<b>27</b>
<b>4 EXPERIMENT</b> .....	<b>28</b>
<b>4.1 Základní materiály pro experimenty</b> .....	<b>28</b>
<b>4.2 Příprava zkušebních těles</b> .....	<b>28</b>
<b>4.3 Měření tvrdosti</b> .....	<b>31</b>
<b>4.4 Měření šířky TOO</b> .....	<b>33</b>
<b>4.5 Vyhodnocení provedených měření</b> .....	<b>36</b>
<b>5 ZÁVĚR</b> .....	<b>37</b>

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

Přílohy



## ÚVOD [1, 2]

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku plazmového dělení plechů z moderních vysokopevnostních ocelí.

Cílem práce je seznámení s podstatou vysokopevnostních (VP) ocelí, vypracování přehledu základních metod a postupů, používaných pro dělení ocelí, se zaměřením za plazmové řezání. Dalším cílem je hodnocení vlivu tepelného ovlivnění vybraných typů VP ocelí procesem plazmového řezání na základě provedených experimentálních měření.

Jako vysokopevnostní (VP) označujeme oceli, jejichž mez kluzu převyšuje úroveň 460 MPa. Tyto oceli mají většinou chemické složení velmi podobné ocelím běžných pevností. Vyšší pevnosti je dosaženo úpravou struktury materiálu a technologií výroby oceli. S ohledem na výhodnější mechanické vlastnosti mohou konstrukční prvky zhotovené z moderních vysokopevnostních ocelí dosahovat vyšších únosností, anebo směřovat k menším rozměrům při zachování stejné schopnosti odolávat působícímu zatížení, oproti obdobným prvkům zhotoveným z tradičních ocelí běžných pevností.

Dělení materiálu patří mezi základní výrobní operace. Při dělení plechů zhotovených z VP ocelí je třeba respektovat řadu faktorů, plynoucích z charakteru tohoto materiálu, například množství vneseného tepla při dělení. Řezání plazmou patří mezi nekonvenční formy dělení materiálu a je velmi často využíváno při řezání VP ocelí (Obr. 1 a Obr. 2).

Bakalářská práce je členěna na část všeobecnou (teoretickou) a experimentální. V části teoretické jsou obsaženy: základní charakteristika, druhy a výroba VP ocelí, metody dělení materiálu, jejich podstata, odlišnosti a možnosti použití. Zvláštní pozornost je věnována metodě plazmového řezání VP ocelí. Cílem experimentální části je ověření změny vlastností prvků z VP ocelí po provedeném řezu paprskem plazmy. V rámci této části bylo provedeno dělení zkušebních těles z VP ocelí tloušťky 50 mm na průmyslovém CNC plazmovém řezacím stroji a dělení těles z VP oceli tloušťky 5 a 8 mm na mechanizovaném stroji v laboratořích Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. U zkušebních těles byl zkoumán povrch řezu a hodnoceno tepelné ovlivnění materiálu, doprovázené změnou mechanických vlastností vlivem tepelných účinků plazmového paprsku.



Obr. 1 – CNC řezání paprskem plazmy [3]



Obr. 2 – CNC tvarové řezání plazmou [4]

# 1 OCELI A JEJICH VLASTNOSTI [5–9]

Ocel je základní materiál tradičně používaný pro výrobu konstrukčních prvků především v oblasti strojírenství, stavebnictví nebo energetiky. Změnou chemického složení oceli a technologie výroby lze dosáhnout, oproti ocelím běžné jakosti, odlišných mechanických a technologických vlastností. Například se jedná o vysokou tvrdost, pevnost, tažnost, lomovou a vrubovou houževnatost, korozivzdornost, svařitelnost aj.

Ocel je slitinou železa (Fe), uhlíku (C) a dalších doprovodných prvků, které jsou buď přítomny z výroby, jakožto rezidua paliva, strusky a atmosféry (a většinou negativně ovlivňují mechanické a technologické vlastnosti oceli), anebo jsou, jako legury, přidávány dodatečně do taveniny k úpravě mechanických vlastností oceli.

Ocel je materiál s dominantním obsahem Fe, a to minimálně 50 %. Dalším podstatným prvkem je C, jehož hraniční obsah je nejvýše 2,14 hm. % (prakticky ale méně). V případě vyššího obsahu C se jedná o litinu.

Příkladem reziduálních prvků je síra (S – oslabuje soudržnost zrn, což má za následek křehkost zatepla), fosfor (P – způsobuje popouštěcí křehkost – mezidendritický lom), dusík (N – způsobuje stárnutí oceli), vodík (H – snižuje pevnost a tažnost, způsobuje břídlíčatý lom) a kyslík (O – způsobuje náchylnost ke korozi a snížení lomové houževnatosti).

Mezi základní legující prvky patří:

- Mangan (Mn) – zjemňuje strukturu, zlepšuje prokalitelnost, eliminuje účinky kyslíku a způsobuje citlivost na hrubnutí zrna.
- Křemík (Si) – zvyšuje žáruvzdornost, ale i popouštěcí křehkost.
- Chrom (Cr) – zvyšuje odolnost vůči popouštění, prokalitelnost, korozivzdornost a otěruvzdornost.
- Nikl (Ni) – způsobuje vysokou houževnatost při nízkých teplotách.
- Molybden (Mo) – stabilizuje martenzitickou strukturu, čímž umožňuje vytvrditelnost, snižuje popouštěcí křehkost a zapříčiňuje žárupevnost.
- Wolfram (W) – zlepšuje prokalitelnost a žárupevnost.
- Vanad (V) – zjemňuje strukturu, zvyšuje únavovou pevnost, žárupevnost.
- Bor (B) – výrazně zvyšuje prokalitelnost (násobně více, než dříve jmenované).
- Hliník (Al) – působí korozivzdorně, zabraňuje stárnutí oceli.

Jako legury se dále používají také tantal (Ta), titan (Ti), cer (Ce) nebo kobalt (Co).

Obsah jednotlivých prvků v oceli předepisují normativní dokumenty ISO 4948-1 a ČSN EN 10020.

Přesné složení konkrétní oceli a její mechanické a technologické vlastnosti jsou uvedeny v materiálových listech, poskytovaných výrobcem materiálu (příloha 2).

## 1.1 Rozdělení ocelí [2, 5, 7]

Oceli je možné dělit na základě řady hledisek – podle chemického složení, použití, mechanických vlastností, pevnosti a celé řady dalších.

*Podle chemického složení* jsou oceli, v souladu s normativním dokumentem ČSN EN 10020, děleny na nelegované, korozivzdorné a ostatní legované. Nelegované oceli obsahují pouze minimální množství příměsných prvků. Hraniční obsah je určen normou ČSN EN 10020 (příloha 1). Legující prvky zde záměrně nejsou přidávány. Mechanické vlastnosti nelegovaných ocelí jsou ovlivněny převážně obsahem C, přičemž jeho vyšší množství zvyšuje pevnost, tvrdost a kalitelnost, ale snižuje tažnost a svařitelnost.

Korozivzdorné oceli obsahují minimálně 10,5 % Cr a současně nejvýše 1,2 % C. Díky pasivační vrstvě na povrchu mají schopnost odolávat chemickým vlivům okolí.

Ostatní legované oceli nesplňují kritéria ocelí korozivzdorných ani nelegovaných, a nejméně v jednom, případě je překročen mezní obsah některé z legur. Mezi tyto oceli patří např. oceli jemnozrné konstrukční, nástrojové, rychlořezné, oceli na ložiska a tlakové nádoby.

Podle aktuálně již neplatných, ale v ČR stále používaných norem ČSN 42 00xx, se oceli dělí podle chemického složení na uhlíkové a slitinové. Slitinové oceli dále mohou být děleny podle celkového množství legujících prvků na nízkolegované (obsahují méně než 2,5 % legur), středně legované (2,5 až 10 % legur) a vysokolegované (více než 10 % legur).

*Podle použití* lze oceli dělit na nástrojové a konstrukční. Nástrojové oceli, používané na nástroje, se vyznačují vysokou pevností, tvrdostí a otěruvzdorností. Konstrukční oceli se používají pro stavbu strojních součástí.

*Podle dalšího zpracování* lze oceli dělit na oceli určené k tváření (s požadavkem na zvýšenou houževnatost a tažnost) a oceli na odlitky. Dále lze oceli například dělit podle stupně uklidnění (uklidněné, polouklidněné a neuklidněné), podle vhodnosti k dalšímu zpracování (k cementaci, k nitridaci, atd.), podle struktury (austenitické, feritické, martenzitické, atd.), podle specifického užití (pružinová, ložisková, atd.), případně podle řady dalších faktorů.

Důležité je dělení *podle pevnosti*. Rozeznáváme oceli standartní (obvyklé) pevnosti a oceli vyšších pevností. O ocelích vyšších pevností hovoříme, pokud je hodnota meze kluzu vyšší než 460 MPa. Vyšších pevností může být dosahováno zvýšením podílu legujících prvků, jako Mn, V, W, Cr a dalších, nebo úpravou struktury a technologií výroby (moderní jemnozrné oceli).

## 1.2 Oceli vyšších pevností [10–24]

Podle normy EN 10137-2 lze ocel považovat za vysokopevnostní, pokud mez kluzu přesahuje 460 MPa. Ve strojírenství i stavebnictví se stále zvyšují nároky na materiály, čemuž již oceli běžných jakostí a pevností nemusí vyhovovat. Výhody VP ocelí, oproti běžným konstrukčním ocelím, spočívají v možné nižší hmotnosti konstrukčních prvků a dílců. Tato skutečnost se projeví při dopravě, montáži, popřípadě údržbě zařízení. Redukce tloušťky plechů (při stejné únosnosti) zjednodušuje svařování, ať už z důvodu manipulace s prvky menších rozměrů, menších dimenzí svarů nebo nižší potřeby předehřevu materiálu při svařování. Moderní VP oceli mají také nízký obsah legur, což snižuje uhlíkový ekvivalent a zlepšuje svařitelnost. Uhlíkový ekvivalent oceli je dán vztahem:

$$C_{EV} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{15} + \frac{Mo}{4} + \frac{Cu}{13} + \frac{P}{2} + 0,0024s[\%] \quad (1.1)$$

kde:  $C_{EV}$  je uhlíkový ekvivalent

$s$  je tloušťka materiálu [mm]

obsah jednotlivých prvků je uveden v hmotnostních procentech.

Vzhledem k nižší hmotnosti konstrukčních prvků se snižují náklady na výrobu konstrukcí a méně vyrobené oceli má příznivý dopad na životní prostředí. Nevýhodou VP ocelí je vyšší cena oproti ocelím obvyklé pevnosti, způsobená vyšší náročností výroby a jejich menším rozšířením (a tedy nižším objemem výroby).

Vyšší pevnosti moderních vysokopevnostních ocelí lze dosáhnout úpravou chemického složení nebo technologií výroby. Jednou z metod je zvyšování podílu martenzitické, potažmo bainitické struktury v oceli. Martenzit je přesycený tuhý roztok uhlíku v alfa železe a je produktem termického nebo termomechanického zpracování feritické struktury. Má vysokou tvrdost a pevnost, ale také nízkou tažnost, houževnatost a teplotní stabilitu. Bainit je také produktem tepelného zpracování, ale vzniká při nižší rychlosti ochlazování, popřípadě při menším stupni přetvoření. Tvrdost bainitu se blíží tvrdosti martenzitu, ale jeho houževnatost

je výrazně vyšší. Při zvýšení teploty dochází k překrytí martenzitické i bainitické struktury na ferit a malé množství cementitu. Feritická struktura je houževnatá a tvárná, zatímco cementitická je tvrdá a křehká.

Spojením martenzitické a feritické struktury vznikají tzv. dvoufázové (resp. vícefázové) struktury, které mají vysokou tvrdost při zvýšené houževnatosti.

Dalším mechanismem zpevnování ocelí je mikrolegování, kdy se za pomoci legujících prvků dosahuje zjemnění struktury. Mezi tyto prvky patří Mn, Al, Cr, Ni, Mo, V a další. Jemnější struktura brání šíření dislokací, a tím se zvyšuje pevnost. Závislost meze kluzu oceli a velikosti zrna udává Hall-Petchův vztah:

$$\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2} \quad (1.2)$$

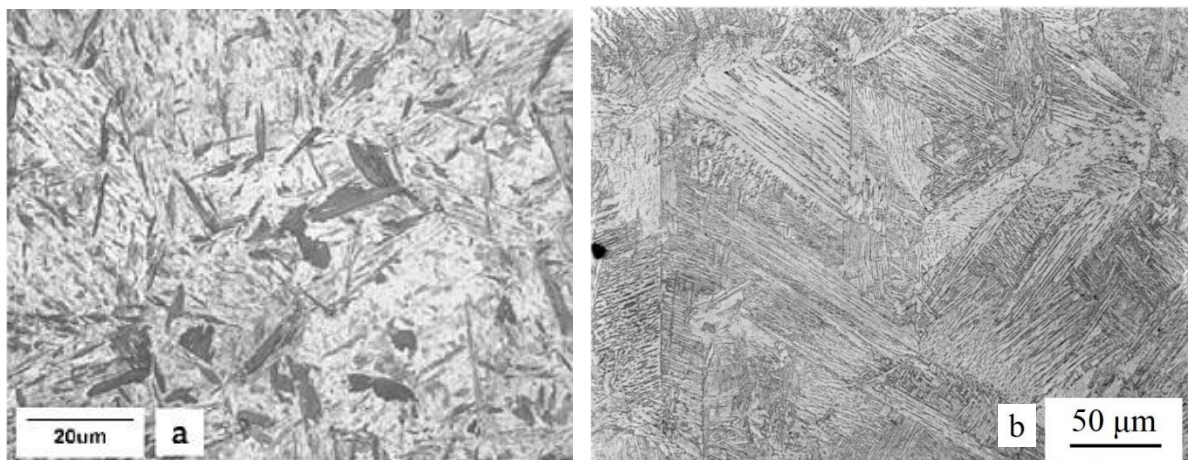
- kde:  $\sigma_y$  je mez kluzu [MPa]  
 $\sigma_0$  je napětí, potřebné k překonání vlastního odporu a tření [MPa]  
 $k$  je konstanta pro stříhová napětí, k uvolnění dislokací [-]  
 $d$  je průměr zrna [mm]

Zjemňování struktury lze dosáhnout také pomocí rekrytalizace deformované struktury. Precipitační zpevnování výrazně zvyšuje výslednou pevnost materiálu. Obsažené prvky v oceli se vážou na C za vzniku karbidů, které mají vysokou tvrdost. K precipitačnímu vytvrzování dochází za zvýšených teplot.

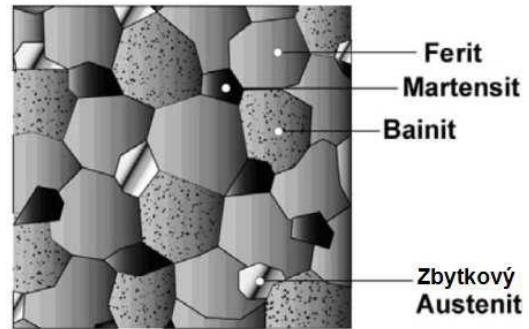
Mezi často používané mechanismy zpevnování patří také deformačně-tepelné stárnutí ocelí. Tyto oceli obsahují N nebo C, které při zvýšené teplotě způsobují vznik nitridů, potažmo karbidů, které významně zvyšují pevnost. Vliv N na stárnutí je násobně vyšší, než vliv C, a proces probíhá i za běžných (nezvýšených) teplot.

Existuje několik typů VPO, které se liší strukturou, složením, technologií výroby i použitím. Tyto oceli využívají dříve jmenované mechanismy zpevnění:

- *Klasicky zušlechťované oceli* prochází cyklem kalení z austenitické na tvrdou martenzitickou (Obr. 4a) nebo bainitickou strukturu (Obr. 4b).



Obr. 4 – Struktury oceli – martenzitická (a) [17], bainitická (b) [16]



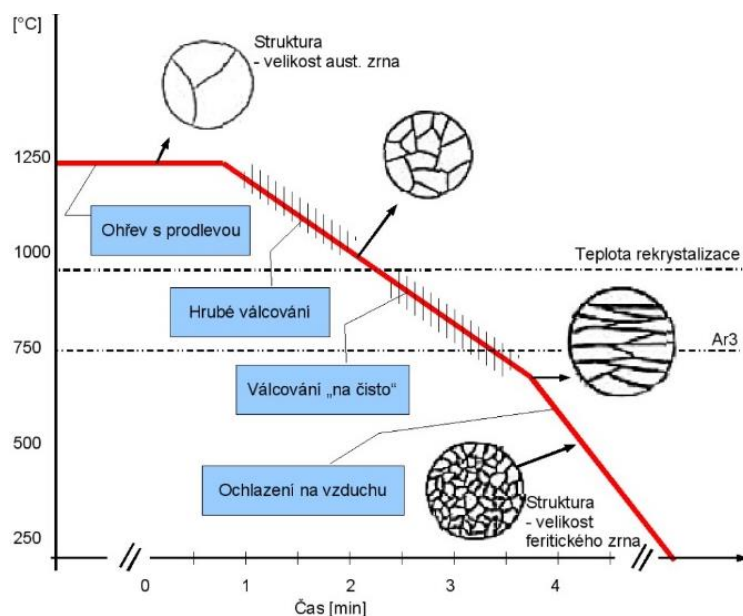
Obr. 3 – Vícefázová struktura oceli [20]

Materiál je zahříván na austenitizační teplotu a prudce ochlazován ve vodě nebo v oleji. Následně jsou dílce vysokoteplotně popouštěny ke zvýšení houževnatosti. Čím méně je materiál popouštěn, tím je vyšší mez kluzu a tvrdost. Na druhou stranu se kriticky přibližuje mez kluzu k mezi pevnosti, velmi se snižuje tažnost a houževnatost, což omezuje využitelnost oceli. Zvýšená pevnost je odvozena od substitučních a intersticiálních atomů a současně od legur, zjemňujících zrna (vznik mikrolegovaných ocelí). U těchto materiálů je žádoucí minimalizace obsahu S a P. Díky velmi malým obsahům legur patří tyto oceli mezi nelegované. Tato technologie se používá i pro oceli běžných pevností, kdy se při stejném chemickém složení dosahuje různých mechanických vlastností. Klasické zušlechťování je běžnou technologií při výrobě dílců se zvýšenými požadavky na tvrdost a pevnost. Používá se zejména u ozubených kol, nástrojů a mnoha dalších konstrukčních dílců.

- *Termomechanicky zpracované (TMZ) oceli* se vyrábí válcováním nebo jiným přetvořením za zvýšených teplot. Je využit synergetický efekt, kdy spolupůsobící operace vykazují jiné výsledky, než následně působící operace. Deformací materiálu za zvýšených teplot se zvyšuje počet dislokací a současně se zabraňuje rekrytalizaci a hrubnutí zrna. TMZ se používá pro mikrolegované jemnozrné oceli, přičemž válcováním se ještě více zjemňuje struktura, čímž se zvyšuje houževnatost a odolnost vůči křehkému lomu.

Obecně platí, že deformací při vyšších teplotách vzniká větší podíl feritické struktury, při nižších teplotách vzniká více martenzitické struktury. Při řízeném válcování tedy dochází ke změně struktury z jemné austenitické na vysoce jemnou feritickou. TMZ lze provádět také jako deformaci před transformací za nižších teplot, kdy výsledkem je jemný martenzit. Další možností je deformace při transformaci za vzniku martenzitu a dolního bainitu. Kombinací těchto metod lze dosáhnout vícefázových struktur, které zajišťují vysokou míru houževnatosti při vysoké pevnosti a tvrdosti. Největší význam má tato metoda u nízkolegovaných a středně legovaných ocelí s obsahem C mezi 0,4 a 0,6 %.

Pro různá chemická složení probíhá řízené válcování při různých teplotách. Schéma řízeného válcování je znázorněno na Obr. 5. Je zde vyžadována vysoká čistota materiálu s nízkým obsahem plynů a precipitátů. TMZ není možno aplikovat na objemové součásti, neboť nelze zajistit přesné úběry ve všech směrech. Využití TMZ je tudíž pouze pro výrobu plechů.

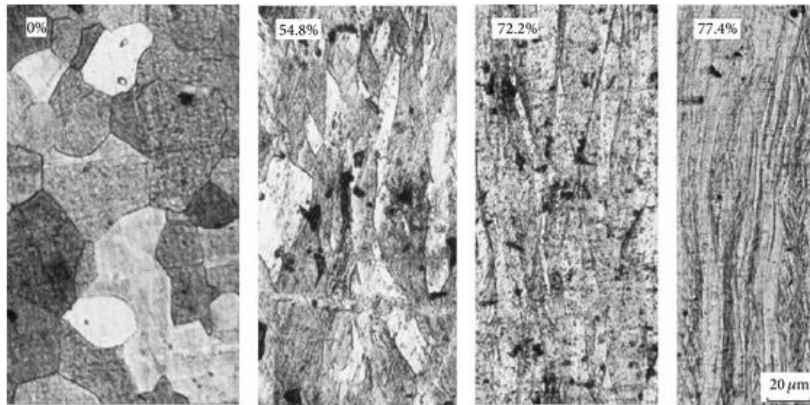


Obr. 5 – Výroba TMZ – schéma řízeného válcování [18]

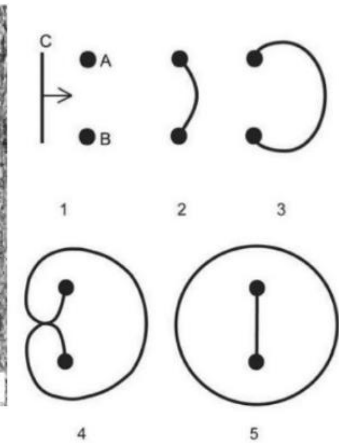
- *Oceli maraging* jsou nízkouhlíkové martenzitické oceli s vysokým množstvím Ni, dále obohacené o legury zjemňující zrna (Mo, Al, Ti, Co). Tato ocel se kalí do oleje, čímž vzniká (paradoxně) relativně měkká nikl-martenzitická struktura, vhodná k obrábění i svařování. Následným vytvrzováním při teplotě kolem 500 °C násobně roste mez kluzu (2,5x). Vznikají zde velmi tvrdé intermetalické fáze Ti a Ni. Přidáním Cr do struktury vznikají

korozivzdorné modifikace maraging ocelí. Oceli maraging jsou v současné době nejpevnějším druhem ocelí.

- Další významnou skupinou jsou *oceli TRIP* (transformace indukovaná plasticitou), kdy je nestabilní austenitická struktura měněna na martenzitickou nebo feriticko-bainitickou strukturu. Tohoto efektu je dosaženo tvářením zastudena, typicky protlačováním nebo tažením, kdy v závislosti na velikosti přetvoření vzniká příslušná struktura, jak je názorné na Obr. 6, kde vlevo není žádné přetvoření, směrem doprava je přetvoření 54,8%, 72,2% a 77,4%. Tvářením se zvyšuje hustota dislokací, tzv. Frank-Readův zdroj dislokací (Obr. 7).



Obr. 6 – Přetvoření zastudena [10]



Obr. 7 – Frank-Readův zdroj dislokací [12]

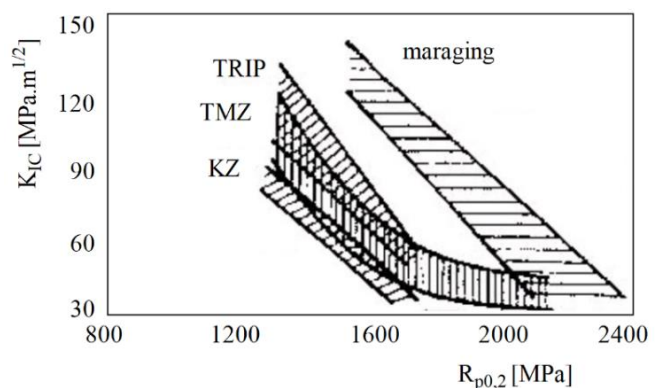
Tvářením narůstá hustota dislokací o 6 až 8 řádů, čímž je zabráněno jejich pohybu – jedná se o tzv. deformační nebo též dislokační zpevnění, dané vztahem:

$$\tau = \frac{G \cdot b}{2\pi L} \quad (1.3)$$

$$L = \rho_d^{-1/2} \quad (1.4)$$

kde:  $\tau$  je skluzové napětí [MPa]  
 $G$  je modul pružnosti ve smyku [Mpa]  
 $b$  je Burgersův vektor [-]  
 $L$  je střední vzdálenost dislokací [mm]  
 $\rho_d$  je hustota dislokací [1/mm]

Vzhledem k obsahu N na hranicích zrn dochází ke stárnutí oceli. Výsledkem jsou velmi pevné materiály s velmi vysokou lomovou houževnatostí. Tato technologie se dá aplikovat i na oceli běžných pevností, čehož se využívá například v automobilovém průmyslu při výrobě karosérií. Plech je zdeformován do požadovaného tvaru a materiál se sám vytvrdí, tudíž se jednoduše zpracovává a dosahuje vysoké pevnosti.



Obr. 8 – Srovnání typů VPO [24]

Vztah mezi lomovou houževnatostí a mezi kluzu výše zmíněných ocelí ukazuje Obr. 8.

- Mezi další typy VP ocelí patří *oceli triplex*, což jsou materiály s vysokým obsahem Mn (26-30 %) a Al (8-12 %). Tyto oceli jsou nepolymorfni, mají austenitickou strukturu s minimálním zastoupením feritické (do 10 %). Při zvýšených teplotách dochází k precipitaci karbidů. Vzhledem k vysokému obsahu Mn a Al, které oba mají větší atomární poloměr než Fe, mají triplex oceli výrazně nižší hustotu. Triplex oceli mají také oproti ostatním austenitickým ocelím výrazně vyšší exponent zpevnění.
- *Ocel TWIP* je vývojově nový typ vysokopevnostní oceli, kde základním výrobním mechanismem je dvojčatění. Ocel obsahuje vysoké množství Mn (22 až 25 %) a malé množství C, aby nedocházelo ke vzniku karbidů. Struktura TWIP je čistě austenitická a je v ní potlačen vznik martenzitu. Ze všech ocelí má nejvyšší plasticitu (přes 50 %) při vysoké pevnosti (1100 MPa).

### 1.3 Tepelně ovlivněná oblast u VP ocelí [13, 14, 17, 19, 19, 25–31]

Tepelně ovlivněná oblast (TOO) nebo také tepelně ovlivněná zóna (TOZ), je označení pro lokální změnu mikrostruktury kovu v oblasti svařování nebo dělení oceli při působení vysoké teploty. Pro různé oceli se projevuje TOO rozdílnými strukturními změnami. Dělený nebo svařovaný materiál se v místě působení tepla lokálně nataví a teplo se dále šíří do okolních oblastí svaru nebo řezu. Velikost TOO je dána vlastnostmi materiálu a množstvím vneseného tepla, včetně jeho průběhu. TOO lze dělit do několika zón. Nejvíce tepelně ovlivněná je oblast částečného natavení, kdy kov byl lokálně nataven, tj. maximální dosažená teplota překročila lokálně teplotu tavení, a opět ochlazen. Další je oblast přehřátí, kde teplota vzrostla nad teplotu  $A_{c3}$  (austenitizační), v níž dochází k intenzivnímu růstu zrn. Další jsou oblasti s úplnou nebo částečnou polymorfni přeměnou (teplota mezi  $A_{c1}$  a  $A_{c3}$ ) a poté oblast s teplotou pod  $A_{c1}$ , kde dochází k růstu zrn; rychlost růstu je exponenciální funkcí teploty. Šířka jednotlivých pásem je závislá na technologii dělení nebo svařování, kde se projevují parametry ohřevu. Mezi ně patří například rychlost ohřevu na maximální teplotu, pohybující se mezi 50 a 500 °C/s. Dalšími faktory jsou maximální dosažená teplota  $t_{max}$ , výdrž na teplotě a rychlost ochlazování [°C/s], kde se pro podrobnější analýzy zavádí parametry  $\Delta t_{8/5}$  a  $\Delta t_{3/1}$ , což je doba ochlazení materiálu z 800 °C na 500 °C, resp. z 300 °C na 100 °C.

Jedním z nejběžnějších projevů TOO u klasických ocelí po dělení nebo svařování je vznik křehké zakalené vrstvy na povrchu. Zahřátý kov chladne příliš rychle, čímž vzniká martenzitická struktura, která je pevná a křehká, což je pro svary nežádoucí. Proto se materiál popouští za účelem zvýšení houževnatosti.

Dalším projevem jsou tzv. odpevňovací procesy, které probíhají zejména u termomechanicky zpracovaných a TRIP ocelí. Prvním z nich je zotavování, kdy je deformovaná struktura zahřata na zotavovací teplotu, odpovídající 10-35 % teploty tavení  $T_m$  [K]. Při výdrži se zmenšuje hustota dislokací a materiál ztrácí svou pevnost. Druhý z nich je rekrytalizace, kdy je deformovaný materiál zahřátý na 35-40 %  $T_m$ . Tento proces nemusí působit pouze pozitivně – u silně deformované struktury (např. tvářené zastudena) vyvolá nukleaci na hranicích deformovaných zrn, čímž vzniká nová jemnozrná struktura bez znaků deformace. Při rekrytalizaci málo přetvořené struktury (5-10 %) dochází k výraznému hrubnutí zrna, čímž se znatelně snižuje vrubová a lomová houževnatost, tažnost i pevnost.

## 2 DĚLENÍ MATERIÁLŮ [32–44]

Dělení materiálu patří mezi základní výrobní operace. Používá se při výrobě konstrukčních prvků a dílců, případně napomáhá ke zjednodušení manipulace s těžkými a rozměrnými polotovary. Dělicí operace lze rozdělit na základě různých kritérií: nástrojové / beznástrojové, zatepla / zastudena, bezodpadové / za vzniku odpadu, konvenční / nekonvenční apod.

Praktický význam má členění způsobu dělení materiálu zatepla / zastudena, neboť přímo souvisí s tepelným ovlivněním materiálu v místě dělení: u metod dělení zatepla dochází k dělení oceli působením vysoké teploty, vyvolané třením, účinkem elektrického oblouku nebo tepelného proudu. V místě dělení vzniká lokální TOO. U metod dělení zastudena nedochází k vnášení tepla v místě dělení a nevzniká žádná TOO. K nejčastěji používaným technologiím dělení materiálů patří:

- *Stříhání* je konvenční nástrojovou operací plošného tváření bez vzniku třísek. Materiál je zatěžován lokálními smykovými silami, kdy při překročení meze pevnosti ve smyku materiálu dochází k jeho porušení stříhem. Stříhací zařízení může využívat dva protichůdné břity pro přímé dělení nebo střížník a střížnici pro tvarové výstřižky. V případě dvou protichůdných břitů lze dělit profily nebo plechy (tabulové nůžky – viz Obr. 9). Spodní břit nůžek bývá zpravidla nepohyblivý. Horní břit může být buď rovnoběžný se spodním nebo skloněný ke snížení potřebné střížné síly. U tvarového stříhání tlačí pohyblivý střížník shora na stříhaný plech proti nepohyblivé střížnici. Za pomoci přídržovače, tlačné hrany a vyhazovače lze dosáhnout vysokých přesností dílce. Střížná síla je odvozena od tloušťky materiálu a meze pevnosti ve smyku. Z toho důvodu se stříhání používá pro plechy tloušťky jednotek milimetrů, v závislosti na stříhaném materiálu.



Obr. 9 – Tabulové nůžky [45]

- Dělení materiálu *rozbrušováním* je nástrojová třísková technologie dělení materiálu, u níž dochází k tepelnému ovlivnění materiálu. Nástrojem je kotouč z pryskyřicí lepených abrazivních částic, rotující vysokou rychlostí. Při kontaktu s materiálem dochází k úběru děleného materiálu a vzniku velmi malých třísek (Obr. 10). Nástroj je upevněn do rozbrušovacích pil nebo brusek s vysokými rychlostmi rotace. Vysokou relativní rychlostí vzniká tření, které tepelně ovlivňuje přilehlé oblasti. Abrazivní zrna kotouče se při kontaktu s materiálem obrušují a následně ulamují, což zajišťuje samobrusnost nástroje. Technologie rozbrušování je energeticky náročná a dochází k velké spotřebě brusných nástrojů. Rozbrušování není vhodné používat pro VP oceli z důvodu vzniku širokých TOO v materiálu.



Obr. 10 – Rozbrušování [46]



- *Řezání* je nástrojová třísková technologie dělení materiálů. Ozubený pilový pás nebo rotující ozubený kotouč se pohybují proti dělenému materiálu a plynule ubírají dělený materiál (třísky). Řezaný materiál bývá většinou uchycen k zamezení pohybu. Dělicím strojem je kotoučová nebo pásová pila (Obr. 11), popřípadě přímočará pila. Rychlost pohybu řezného nástroje závisí na mechanických vlastnostech děleného materiálu a geometrických dimenzích. U delších strojových časů nebo tvrdších řezaných materiálů je vhodné použití chladicího média a řezné kapaliny. V současné době je možné řezat celou řadu materiálů s nižší tvrdostí, než má řezný nástroj a v rozměrech, které jsou omezeny velikostí nebo posuvem nástroje. Řezání VP oceli je možné pouze v případě nižší tvrdosti, než má nástroj a za použití chladicího média.



Obr. 11 – Pásová pila [47]

- *Řezání kyslíkem* je nekonvenční tepelná metoda dělení materiálu. Směsí technických plynů je kyslík společně s acetylenem, propanem, propan-butanem nebo vodíkem. Hořící směs plynů lokálně zahřívá základový materiál na zápalnou teplotu. Následně je do místa řezu vháněn kyslík, jímž je zahřátý materiál oxidován (Obr. 12). Oxidy jsou proudem kyslíku vyfukovány z místa řezu. Teplo, vzniklé hořením oceli, zahřívá materiál před řezem,



Obr. 12 – Řezání kyslíkem [48]

čímž se snižuje čas předehřevu a je zajištěna plynulost procesu. Řezným zařízením jsou zde tlakové lahve se stlačenými technickými plyny a hořák se směsí plynů a dalším vývodem pro kyslík. Kyslíkový hořák lze umístit na mechanizované nebo automatizované vedení k zajištění konstantního průběhu řezání. Dělení kyslíkem je možné provádět u materiálů, které splňují následující podmínky: zápalná teplota musí být nižší než teplota tavení, teplota vznikajících oxidů musí být nižší než teplota okolního materiálu a vzniklé oxidy musí být dostatečně tekuté, aby je bylo možné vyfukovat z řezné spáry. Tyto podmínky splňují převážně nízkouhlíkové nelegované oceli a v některých případech i nízkolegované oceli. Při řezání jiných materiálů, např. vysokouhlíkových ocelí, chromových a chromniklových ocelí, litin nebo neželezných kovů, lze do řezu přidávat ocelový prach ke zvýšení teploty plamene a reaktivity s materiálem (vznik oxidů železa a velkého množství tepla). Kyslíkem lze řezat materiály tloušťky až 300 mm s přijatelnou kvalitou řezu, danou vhodným nastavením parametrů dělení, jako je vzdálenost hořáku od materiálu a rychlost jeho posuvu nebo složení směsi technických plynů. Řezání VP oceli kyslíkem je nevhodné z důvodu vzniku široké TOO v celé tloušťce materiálu.

- *Řezání vodním paprskem* je abrazivní nekonvenční metoda dělení materiálu. Vysokotlaké čerpadlo zvyšuje tlak vody v zásobníku na řádově tisíce barů. Ze zásobníku jde voda skrze směšovací komoru, kde je někdy mísena s abrazivem ve formě olivínu, korundu nebo například diamantu, čímž se zvyšuje řezný účinek paprsku. Následně putuje tato směs přes diamantovou (většinou) trysku o průměru několika desetin, resp. nízkých jednotek milimetrů. Soustředěný paprsek vody dosahuje až čtyřnásobku rychlosti zvuku a svou energií odebrává částice základního materiálu (Obr. 13). Dělicím zařízením je zde plně automatizované CNC centrum, umožňující dosažení vysokých geometrických přesností i vysokých jakostí povrchů dělicích ploch. Součástí zařízení je vlastní pracovní plocha se zásobníkem na odpadní vodu. Odpadní voda je dále sedimentována a recyklována, stejně jako abrazivní medium. Vodním paprskem lze řezat materiály bez ohledu na specifické mechanické vlastnosti (např. tvrdost, elektrická vodivost, houževnatost atd.) v tloušťkách přesahujících 300 mm. Vodní paprsek nezatěžuje okolní materiál mechanicky ani tepelně, tudíž nedochází ke vzniku trhlin, TOO ani jiné změny mechanických vlastností. Vysoká kvalita dělicích ploch a absence TOO nevyžaduje další úpravy povrchu dělicích ploch. Řezání vodním paprskem je vhodné pro dělení VP ocelí všech druhů.



Obr. 13 – Řezání vodním paprskem [49]

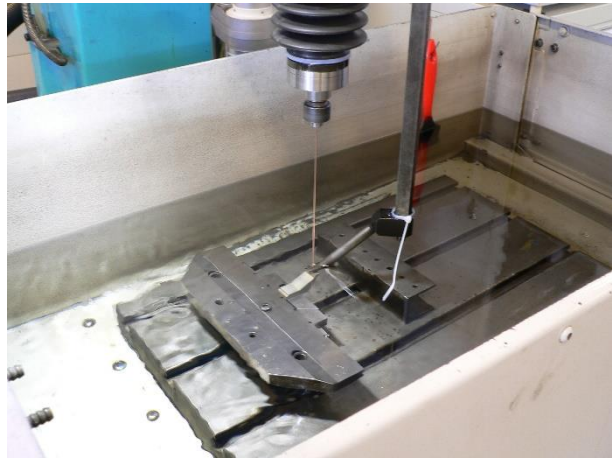
- *Řezání laserem* (Obr. 14) patří mezi nekonvenční tepelné technologie dělení materiálu. Laser je zesilovač záření stimulovanou emisí, čímž vzniká monochromatické koherentní záření. Laserový paprsek je tvarován systémem čoček na velmi malý průměr (řádově v desetinách milimetru). Tato optická soustava je většinou umístěna na CNC stroji, s možností pohybu až v šesti osách. Do CNC hlavy je také přiváděn technický plyn (aktivní nebo inertní), zajišťující plynulost řezného procesu.



Obr. 14 – Laserové řezání [50]

Energie laserového paprsku se po dopadu na základní materiál mění na teplo. Materiál se lokálně roztaví nebo sublimuje. Technický plyn poté reaguje s materiálem nebo vyfukuje taveninu a plyny z řezné spáry. Díky automatizaci procesu lze provádět komplexní tvarové řezy s velmi vysokou geometrickou přesností, opakovatelností a minimálním prořezem. Vzhledem k vysoké rychlosti řezu vzniká jen minimální TOO. Laserem lze řezat všechny běžně používané kovové konstrukční materiály. Řezaný materiál musí ovšem mít nižší teplotu tání, než je zápalná teplota materiálu. Řezání VP ocelí laserem je možné použít do tloušťky ocelových plechů přibližně 35 mm.

- *Elektroerozivní drátové řezání* je nekonvenční elektrotepelná technologie dělení materiálu. Řezným nástrojem je tenký vodivý drát, připojený k zápornému pólu zdroje. Kladnou elektrodou je samotný dělený materiál. Řezná operace probíhá v dielektriku, kterým je většinou deionizovaná voda. Elektrické pole ionizuje okolí až vznikne výboj mezi elektrodami. Teplem výboje se řezaný materiál taví a odpařuje nebo sublimuje. Elektrodotový drát bývá zhotoven z mědi, mosazi nebo molybdenu a jeho průměr se pohybuje v desetinách milimetrů, v závislosti na řezaném materiálu. Drát musí být vysoce elektricky vodivý a pevný, protože přesnost a kvalita řezu závisí na napnutí drátu. Stroj bývá plně adaptivní včetně přípravy řezné operace, především vyvrtání otvoru pro elektrodu a zavedení elektrody. Často bývá umožněn náklon nástroje pro složitější tvarové řezy. Řezná spára má vysokou geometrickou přesnost a minimální šířku. Elektroerozivní drátové řezání lze použít pro elektricky vodivé materiály (včetně VP ocelí) až do tloušťky 400 mm. Význam této metody spočívá zejména při řezání těžkoobrobitelných materiálů (Obr. 15).



Obr. 15 – Elektroerozivní zařízení [51]

- Mezi další metody dělení technických materiálů obecně patří například *řezání ultrazvukem*, kdy je čepel připojena na budič harmonického kmitání. To umožňuje dělit materiály, které není vhodné nebo možné dělit ostatními metodami – například proto, že se lepí, lámou nebo jsou velmi tvrdé. Tato technologie se užívá pro materiály tloušťky jednotek milimetrů a není vhodná pro dělení ocelí.

### 3 PLAZMOVÉ ŘEZÁNÍ [41, 52–54]

Řezání plazmovým paprskem patří mezi nekonvenční bezkontaktní metody dělení materiálu. Koncentrovaná energie plazmy vyvolává extrémní teplotu a lokálně způsobuje natavení materiálu. Plazmová technologie je jednou z nejuniverzálnějších metod dělení kovových materiálů. Oproti řezání kyslíkem umožňuje i řezání korozivzdorných, vysokolegovaných nebo vysokouhlíkových ocelí, ale i neželezných kovů nebo litiny. Lokální tepelné ovlivnění děleného materiálu, způsobené plazmovým paprskem, je výrazně menší než u kyslíkového plamene. S ohledem na výše uvedené výhody nahrazuje plazmové řezání v řadě případů řezání kyslíkovým plamenem. Plazmový paprsek se využívá rovněž ke svařování, kdy vytváří metalurgicky čistý svar, podobný technologii TIG.

Jako plazma se označuje speciální stav plynu, který je charakteristický vysokou mírou ionizace částic, a tedy nevykazuje vlastnosti žádného dříve popsaného skupenství. Tento pojem byl zaveden roku 1932 americkým vědcem Irvingem Langmuirem, který téhož roku obdržel Nobelovu cenu za objevy v hraniční chemii.

V průběhu 50. let minulého století se technologie plazmového řezání začala využívat v průmyslu jako alternativa a náhrada technologie řezání kyslíkem, neboť umožňovala dělit více druhů materiálů. Ve svých počátcích byla plazmová technologie řezání nevhodná z důvodu vysoké spotřeby technických plynů a energie. Technologie se během let vyvíjela a postupně se stala, díky svému univerzálnímu použití, jednou z nejrozšířenějších nekonvenčních technologií dělení kovových materiálů.

#### 3.1 Princip metody [1, 18, 19, 41, 52, 53, 55–59]

Mezi elektrodou (katodou) a řezaným materiálem (anodou) vzniká elektrické pole. Energie elektrického pole se přenáší na technický plyn, čímž se zvyšuje kinetická energie jeho částic. Spolu se zvyšováním energie plynu se zvyšuje i rychlost pohybu částic a četnost jejich srážek. Srážky lze rozdělit na pružné, kde se celková kinetická energie nemění, a na nepružné, kde se kinetická energie mění na vnitřní energii částic. Dodáváním energie dochází k disociaci plynu, kdy se dvouatomové (nebo víceatomové) plyny rozpadají na jednotlivé atomy. Při dalším zvyšování vnitřní energie dochází k ionizaci, tedy vytržení elektronů z atomového obalu a ke vzniku volného elektronu a kladného iontu. Počet ionizovaných částic na celkový počet částic charakterizuje stupeň ionizace plynu, kdy vyšší stupeň ionizace znamená vyšší teplotu plynu. Počet volných elektronů a vzniklých kladných iontů je přibližně stejný, tudíž se plazma chová navenek elektricky neutrálně, tzv. kvazineutrálně. K uskutečnění ionizace je potřebná kinetická energie, daná vztahem:

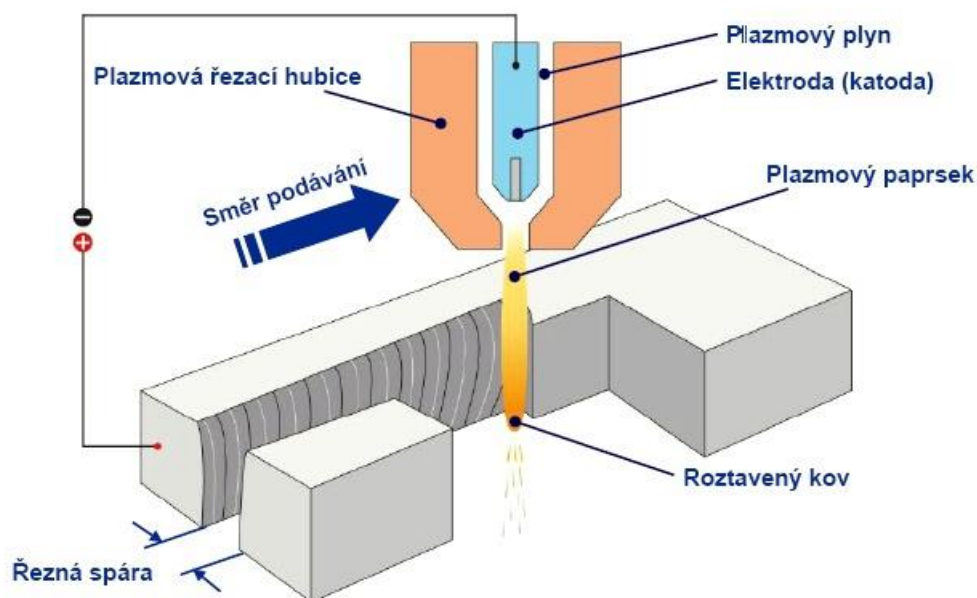
$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = e \cdot U_I \quad (3.1)$$

kde:  $m$  je hmotnost částice [kg]  
 $v$  je rychlost částice [m/s]  
 $e$  je elektrický náboj částice [C]  
 $U_I$  je ionizační potenciál [eV]

Tato podmínka je nutná, nikoliv však dostačující, zavádí se tedy pravděpodobnost uskutečnění ionizace. Mimo trysku dochází k rekombinaci ionizovaného plynu, tj. spojení kladných iontů s elektrony, čímž se uvolňuje velké množství energie, a tím se výrazně zvyšuje teplota plynu. Teplota plazmatu nemusí být ve všech částech oblouku konstantní, což je ovlivněno četností srážek elektronů s ionty vůči četnosti srážek elektronů (nebo iontů) mezi sebou.

Uvnitř plazmového hořáku probíhá ionizace technického plynu, proudícího kolem elektrody. Nejprve je zapálen tzv. pilotní oblouk mezi netavnou wolframovou, zirkoniovou, uhlíkovou nebo hafniovou elektrodou (katodou) a stěnou trysky. Tím se ionizuje prostor mezi elektrodami a umožňuje se zapálení hlavního oblouku mezi elektrodou a řezaným materiálem. Proud ionizovaného plazmového plynu směřuje nadzvukovou rychlostí k anodě (dělenému materiálu), dochází k rekombinacím plazmatu (uvolnění dodané energie) a tím ke zvyšování teploty a kinetické energie. Neionizovaná část plazmového plynu má nižší teplotu a usměřňuje plazmový paprsek, tj. zabraňuje kontaktu plazmy s tryskou, a tím jejímu zničení. Tryska bývá většinou opatřena chlazením ke zvýšení životnosti zařízení a umožnění nárůstu tepelného toku tryskou. Teplota plazmatu je závislá na fyzikálních vlastnostech plazmového plynu, přičemž každý plyn dosahuje různých teplot.

Paprsek plazmatu po dopadu na materiál lokálně způsobuje jeho rychlé tavení a odpar. Tavení probíhá řádově v milisekundách díky extrémní teplotě a vysokému tepelnému toku. Vysoká rychlost tavení také umožňuje zvýšení řezné rychlosti. Zbytek kinetické energie, která se netransformuje na teplo, vyfukuje taveninu a plyny z řezné spáry. Tento proces je znázorněn na Obr. 16.



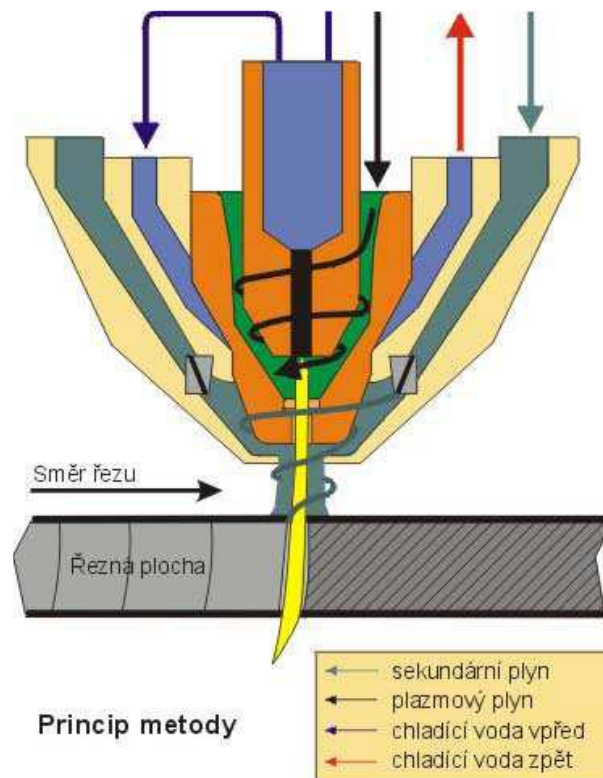
Obr. 16 – Schéma plazmového řezání [60]

V plazmové technologii řezání se používají tři druhy médií:

- *Plazmový plyn* je vháněn do elektrického oblouku, kde je ionizován (vznik plazmatu). Pro jednotlivé materiály se volí různé plazmové plyny, a to na základě reakce s materiálem a dosažené teploty plazmatu. Teplota plazmatu závisí na tepelné vodivosti, tepelné kapacitě, ionizační energii a energii tepelné disociace molekul plynu. Teplota je také závislá na stupni ionizace a je u každého plynu nebo směsi plynů jiná. Jako plazmové plyny se nejčastěji používají: dusík (9000 K), vodík (10 000 K), argon (16 000 K), helium (20 000 K), dále vzduch nebo kyslík. Jestliže je plazmovým plynem kyslík nebo vzduch, dochází k oxidaci řezaného materiálu (pálení).
- *Fokusační (stabilizační) médium* může být buď plyn nebo voda, které svým prouděním vytvářejí vír, zaostřující paprsek plazmy. Stabilizačního média lze využít také k současnému chlazení elektrody a stěny trysky za účelem snížení opotřebení, ale v některých případech mohou být fokusační a chladicí média rozdílná (Obr. 17). Zúžením paprsku se

zvyšuje tepelný tok, čímž se zefektivňuje řezný proces. Jako fokusační plyn může sloužit neionizovaná část plazmového plynu (Obr. 18a), která nedosahuje extrémních teplot (má vyšší hustotu) a díky tomu ji odstředivá síla tlačí ke stěně trysky nebo může být přiváděna do trysky zvlášť (Obr. 18b). V případě stabilizace paprsku vodou dochází k extrémnímu zvyšování tepelného toku a tím i teploty paprsku (až 35 000 K). Voda se částečně odpařuje a vodní pára je disociována a ionizována jakožto plazmový plyn. Při použití stabilizace vodou nemohou být použity wolframové elektrody vzhledem k aktivnímu prostředí a musí být použity elektrody uhlíkové. Tvar trysky je uzpůsoben tvorbě vírů a na konci se zužuje k lepší stabilizaci.

- *Asistenční (ochranné) plyny* obklopují paprsek plazmatu až k místu řezu, kde lokálně chrání materiál před oxidací okolní atmosférou. Ochranný plyn bývá často totožný s plazmovým plynem.



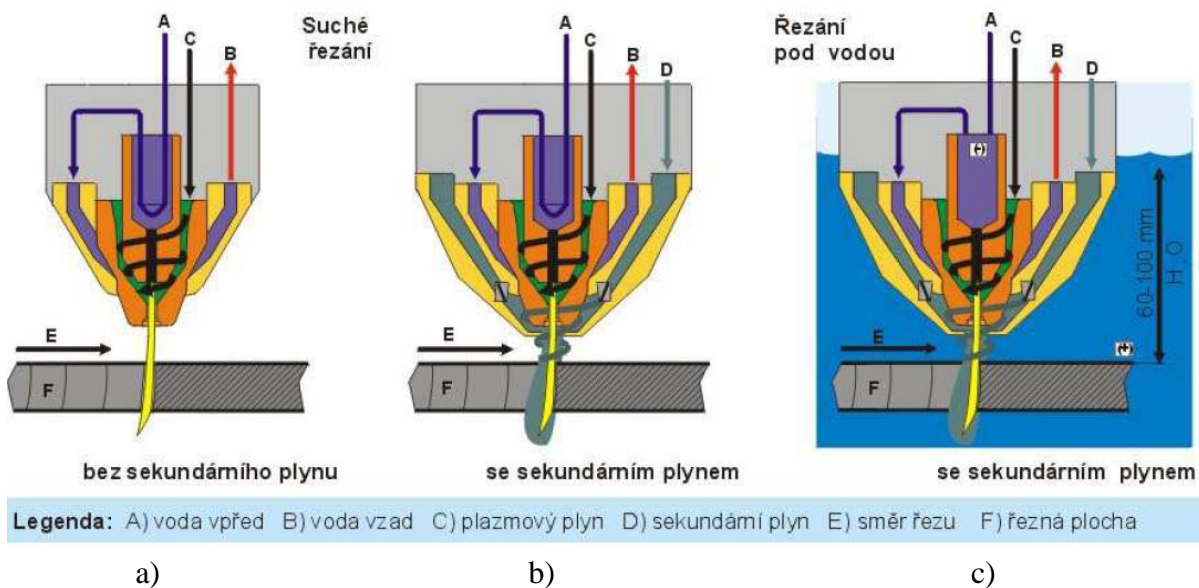
Obr. 17 – Média při plazmovém řezání [53]

Plazmové oblouky se dělí na základě použitého ionizovaného plynu. Každý plazmový plyn má jiné parametry a určení. Čistota plynu ovlivňuje životnost zařízení a kvalitu řezu. Nejběžněji používané druhy plazmatu:

- *Dusíková plazma* je velmi rozšířenou technologií, často kombinovanou s vodní stabilizací. Plazmový oblouk dosahuje vysokých délek při teplotě až 7 000 K a nejvyšším tepelném výkonu při této teplotě. Dusík se používá pro korozivzdorné nebo vysokolegované oceli a slitiny hliníku. Hlavní nečistotou plynu je přítomnost kyslíku, který společně s dusíkem tvoří jedovaté oxidy.
- *Vzduchová plazma* představuje neekonomičtější řešení plazmového řezání. Vzduch zde plní funkci plazmového i stabilizačního plynu. Díky přítomnosti kyslíku ve vzduchu vzniká aktivní prostředí a dochází k pálení řezaného materiálu, což se projevuje čistotou řezu. Vzduchová plazma se běžně používá pro nelegované i korozivzdorné oceli do tloušťek až 40 mm.

- *Kyslíková plazma* je principiálně podobná vzduchové plazmě, oproti ní však má vyšší entalpii. Kyslík vytváří aktivní prostředí, čímž dochází k oxidaci materiálu. To vede ke zvýšení teploty plamene a možnosti využití vyšší řezné rychlosti. Hořením materiálu vzniká jemná struktura řezu bez otřepů na spodní straně. Kyslíková plazma se používá pro nelegované oceli, popřípadě kompozitní materiály. Nečistotou přítomnou v kyslíku je vlhkost, která působí negativně na spotřební díly plazmového hořáku.
- *Argonová nebo heliová plazma* jsou vysokoteplotní technologie, tvořící inertní prostředí. Oba plyny se běžně vyskytují ve formě jednoatomového plynu, tudíž nedochází k disociaci a plazma vzniká jednodušeji. Hořící oblouk je stabilní a nepotřebuje tak vysoké napětí jako v případě dříve zmíněných plynů. Inertní plazmou lze řezat velmi širokou škálu materiálů, jako např. korozivzdorné oceli nebo slitiny lehkých neželezných kovů.
- *Vodní plazma (plazma stabilizovaná vodní parou)* je atypický případ plazmové technologie, kdy voda vstupuje do ohřívacího tělesa, kde se odpařuje. Vodní pára je následně ionizována a stává se plazmou. Vzniklý řez je čistý a bez oxidů.
- *Plynová plazma* využívá směsí plynů. Směs dominantního argonu s vodíkem nese označení Hytec, směs dominantního dusíku s vodíkem je označován jako Protec. Tyto směsi zajišťují optimální řezné podmínky a univerzální použití (vysokolegované oceli, slitiny niklu, molybdenu nebo mědi a další).

Plazmové řezání lze provádět také pod vodou (Obr. 18c), čímž se snižuje prašnost a hlučnost procesu a současně se redukuje intenzita UV záření. Další výhodou je menší tepelné ovlivnění materiálu. Na druhou stranu se také snižují účinky paprsku plazmy, a s tím také řezatelná tloušťka materiálu.



Obr. 18 – Typy plazmového řezání [53]

### 3.2 Zařízení pro řezání plazmou [1, 53, 56, 60]

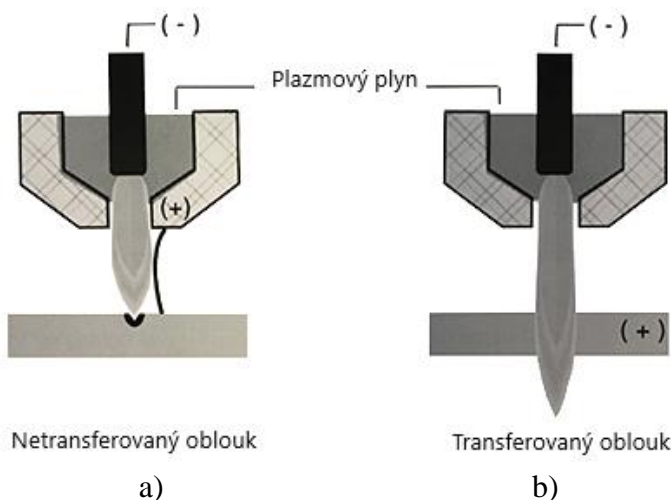
Zařízení pro řezání paprskem plazmy lze rozdělit na plně automatizované, mechanizované a ruční. V případě ručních se jedná o přenosná zařízení nízké hmotnosti, jejichž hořák je veden ručně. Nedosahuje se příliš vysoké kvality řezné hrany ani vysoké geometrické přesnosti. Mechanizovaná plazmová zařízení umožňují konstantní průběh řezu, čímž se zvyšuje kvalita

řezu. U plně automatizovaných (CNC) strojů lze dosáhnout velmi vysoké geometrické přesnosti i kvality řezu.

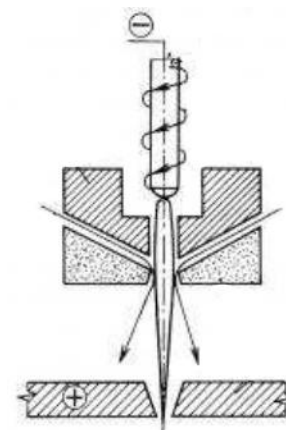
Zařízení plazmového řezání je tvořeno hořákem a zdrojem elektrického proudu. V případě CNC zařízení dále řídicí jednotkou a manipulačním zařízením (stůl a manipulátor). Hořák (plazmatron) je nástrojem plazmového řezání, svařování, navařování a povlakování. V hořáku dochází k přeměně elektrické energie na tepelnou energii plazmatu. Běžné plazmové oblouky dosahují teploty  $10^4$  K. Při zvyšování příkonu dochází k silnému tepelnému zatěžování trysky a je nutné chlazení hořáku. Do trysky je vháněno chladicí médium, které nezasahuje přímo do oblouku, ale tvoří vír podél stěny trysky, čímž ji nejen ochlazuje, ale také zužuje proud plazmového paprsku (fokusuje), a tím se zvyšuje jeho tepelný tok. Stabilizaci napomáhá také speciálně tvarovaná (zúžená) tryska. Podle chladicího média rozlišujeme hořáky s plynovou stabilizací a hořáky s vodní stabilizací:

- *Hořáky s plynovou stabilizací:* může vzniknout transferovaný nebo netransferovaný oblouk. Transferovaný (viz Obr. 19b) hoří mezi uvnitř umístěnou katodou a řezaným materiálem (anodou). Tryska se zahřívá pouze zářením z plazmového paprsku, tudíž není zbytečně tepelně namáhána. Tohoto zapojení se využívá u elektricky vodivých materiálů, jako jsou oceli a neželezné kovy. Netransferovaný oblouk (viz Obr. 19a) hoří mezi uvnitř umístěnou katodou a stěnou trysky, čímž ji tepelně namáhá. Netransferovaný oblouk se využívá pro řezání nevodivých materiálů, jako je keramika nebo k povlakování. Existuje také kombinované zapojení, kdy netransferovaný oblouk slouží jako pilotní pro zapálení hlavního transferovaného oblouku.
- *Hořáky s vodní stabilizací* (Obr. 20) obsahují přívodní kanálky pro vodu, která proudí do hořáku. Zde se částečně odpaří a ionizuje, zbytek formou sprchy proudí ven z trysky společně s plazmou. Hořáky s vodní kontakcí umožňují řezání pod vodou. Tato technologie se používá pro řezání korozivzdorných ocelí a neželezných kovů.

CNC plazmové řezací stroje mohou mít až osm nezávislých hořáků, umožňujících kromě posuvů také naklápění. Zdroj napětí bývá zpravidla stejnosměrný a dodává konstantní výkon. Napětí naprázdno se často liší od řezného napětí. Manipulační stoly u automatizovaných zařízení mohou dosahovat šířky až 5 m a délky až 30 m.



Obr. 19 – Netransferovaný a transferovaný oblouk [56]



Obr. 20 – Vodou kontrahovaná plazma [41]



### 3.3 Parametry řezání plazmou a jejich vliv na vlastnosti řezu [1, 18, 26, 41, 53, 57, 61, 62]

V plazmovém řezání se projevuje několik na sobě závislých parametrů, které společně udávají výsledné vlastnosti řezu. Plazmový paprsek by měl proniknout celou tloušťkou materiálu, aby bylo dosaženo optimální kvality řezných ploch a vzniku kolmých hran bez zkosení a otřepů.

Mezi výchozí parametry patří tloušťka, typ řezaného materiálu a konstrukce hořáku. Od těchto parametrů se dále odvíjí volba plazmového plynu, řezná rychlost, napětí, průtok plynu a vzdálenost hořáku od materiálu.

Maximální tloušťka řezaného materiálu je určena poklesem tlaku, daným rostoucí hloubkou řezu. Pro suché řezání je maximální řezatelná tloušťka materiálu cca 160 mm, pro řezání pod vodou 120 mm.

Konstrukcí hořáku je ovlivněna výtoková rychlost plynu a tepelný tok. Stabilizační médium zužuje paprsek, který při neměnném výkonu zvyšuje teplotu, tepelný tok a výtokovou rychlost (1500 až 2300 m/s).

Plazmový plyn se volí podle typu materiálu, jak již bylo dříve zmíněno. Od typu plazmového plynu se také odvíjí dosažená teplota paprsku, která se pohybuje mezi 7 000 a 35 000 K. Čistota plynu se projevuje na výsledné kvalitě řezu a opotřebení nástroje.

Napětí bývá určeno zdrojem elektrické energie a průtokem plazmového plynu. Napětí naprázdno dosahuje 250 až 350 V, resp. 110 až 150 V při řezání. Při vyšším průtoku plazmového plynu se napětí zvyšuje. Proud je dán výkonem a napětím zdroje.

Výška hořáku, tj. vzdálenost hořáku od děleného materiálu, se určuje podle napětí, zpravidla pomocí zpětné vazby. Zvětšením výšky hořáku se snižuje tloušťka protavení materiálu, až zcela zanikne oblouk. Při snižování výšky může dojít ke zničení hubice roztaveným kovem.

Optimální nastavení parametrů vychází z energetické bilance řezání, dané rovnicí:

$$\eta \cdot I_{EO} \cdot U = \rho \cdot Q \cdot s_r \cdot v_r \cdot b \quad (3.2)$$

kde:	$\eta$	je účinnost přeměny energie [-]
	$I_{EO}$	je proud plazmového oblouku [A]
	$U$	je napětí plazmového oblouku [V]
	$\rho_r$	je hustota materiálu [g/cm <sup>3</sup> ]
	$Q$	je množství tepla k odtavení jednotky hmotnosti [J/g]
	$s_r$	je tloušťka materiálu [cm]
	$v_r$	je řezná rychlost [cm/s]
	$b_r$	je průměrná šířka řezné spáry [cm]

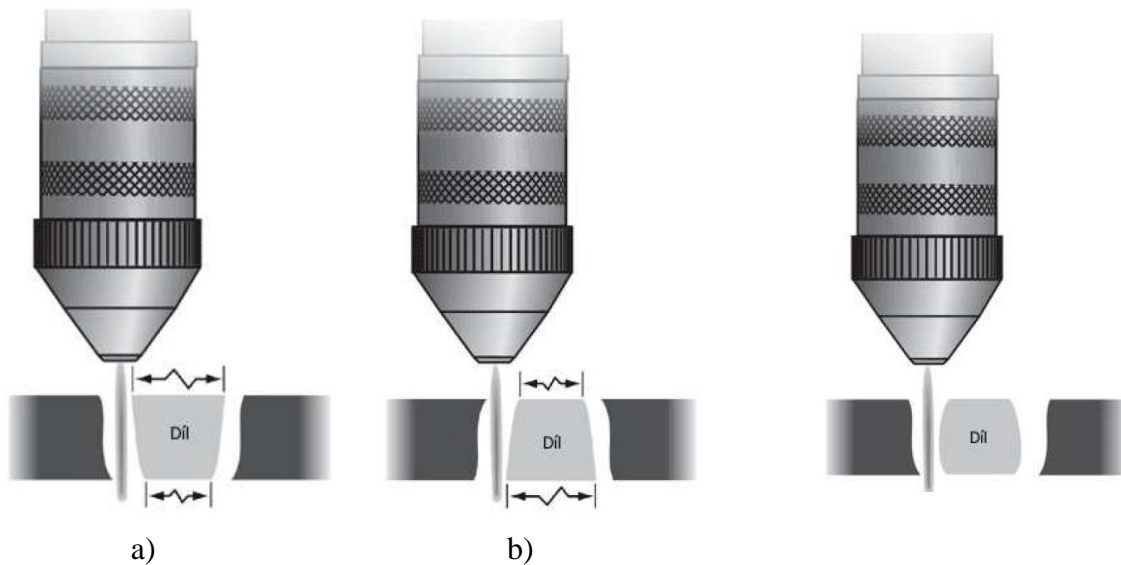
Z této rovnice lze vyjádřit řeznou rychlost:

$$v_r = \frac{\eta}{\rho \cdot Q} \frac{U \cdot I_{EO}}{b \cdot s} \quad (3.3)$$

Řeznou rychlost lze zvýšit nárůstem výkonu, potažmo napětí. Při zvyšování řezné rychlosti se snižuje řezná tloušťka materiálu, naopak při jejím snižování se rozšiřuje řezná spára. Řeznou rychlost je možné u nelegovaných ocelí zvýšit použitím kyslíku, jakožto plazmového plynu.

Mezi základní vady řezu patří úkosity řezu. V případě negativního úhlu řezu je řezná spára v horní části širší než v části spodní (viz Obr. 21a). K tomuto jevu dochází v případě nízkého napětí, nízké výšky hořáku, nízké řezné rychlosti, deformaci materiálu nebo poškozené trysky. U pozitivního úhlu řezu je spára v horní části užší než ve spodní části (Obr. 21b), což je způsobeno vysokým napětím, vysokou řeznou rychlostí nebo nevhodným nastavením proudu.

Mezi další vady řezu patří zaoblení hran (Obr. 22), což se převážně vyskytuje u plechů nižších tloušťek ( $s < 6$  mm). Tato vada je způsobena neúměrně vysokým proudem.

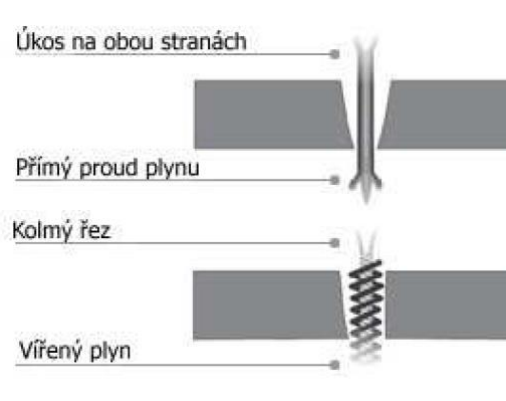


Obr. 21 – Negativní (a) a pozitivní (b) úhel řezu [53]

Obr. 22 – Zaoblení hran [53]

Rovnoměrné zhoršení drsnosti povrchu řezných ploch může být způsobeno příliš vysokým průtokem plazmového plynu, poškozením trysky hořáku nebo nedokonalostmi vedení plazmového hořáku (nerovná dráha nebo vadné ložisko).

V případě užití nestabilizovaného plazmového paprsku dochází ke vzniku oboustranných úkosů (Obr. 23 nahoře). Vířem stabilizovaný paprsek vytváří pouze jednostranný úkos (Obr. 23 dole), na základě čehož se volí směr řezů vnitřních a vnějších ploch (vnější po směru hodinových ručiček, vnitřní proti směru). Při optimálním nastavení parametrů řezání lze plazmovým paprskem docílit drsnosti dělicí plochy blízké se konvenčním metodám ( $R_a = 6,4$ ). Řezná rychlost tenkých plechů se pohybuje mezi 9 000 a 12 000 mm/min, přičemž s rostoucí tloušťkou materiálu se maximální řezná rychlost snižuje.



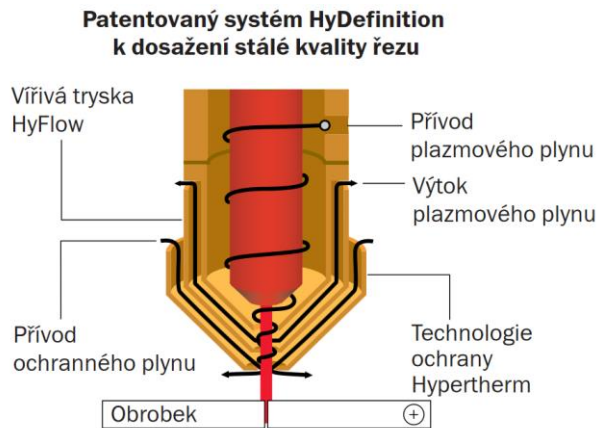
Obr. 23 – Vířný a nevířný paprsek [53]

### 3.4 Přesná plazma s vysokým rozlišením – technologie HyDefinition® [63]

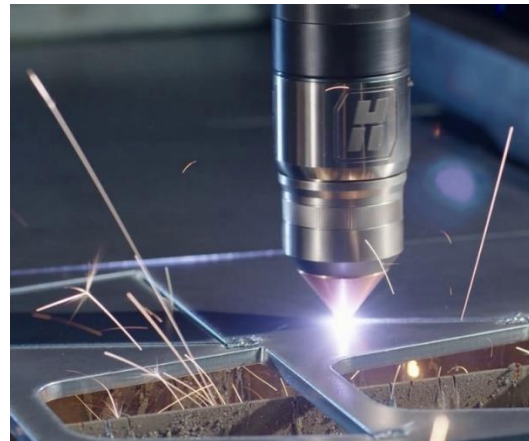
Technologie přesné plazmy s vysokým rozlišením (High Tolerance Plasma Arc Cutting) byla vyvinuta společností Hypertherm v 80. – 90. letech minulého století. Jedná se o vysoce přesné (High Definition, HD) dělení materiálu plazmou. Technologie se vyznačuje především speciální konstrukcí vířivých trysek s částečným odvodem plazmového plynu (viz Obr. 24), které vytváří kolem elektrody vír média. Plazmový oblouk je více fokusován, dochází k výraznému zvýšení koncentrace energie, ke zvýšení teploty a výstupní rychlosti plazmového plynu. V porovnání s konvenčními technologiemi plazmového řezání je možné docílit menší (cca poloviční) šířky řezu, vyšší kolmosti řezaných hran (téměř) bez otřepů na spodní straně řezaného plechu a zmenšení tepelně ovlivněné oblasti řezu, a to při vyšší efektivitě řezání a menším opotřebením komponent zařízení, především trysky. Vlivem úzké řezné spáry je možné dosáhnout při řezu větších přesností a detailů, srovnatelných s dražší technologií laserového

řezání. Současně vzniká významně menší množství odpadu (strusky). Systémy plazmového řezání s vysokým rozlišením umožňují vysokou úroveň automatizace.

HyDefinition® je ochranná známka společnosti Hypertherm, Inc. Zařízení, založená na obdobném principu, jsou – pod různými názvy – v nabídkách dalších výrobců a dodavatelů technologie plazmového řezání.



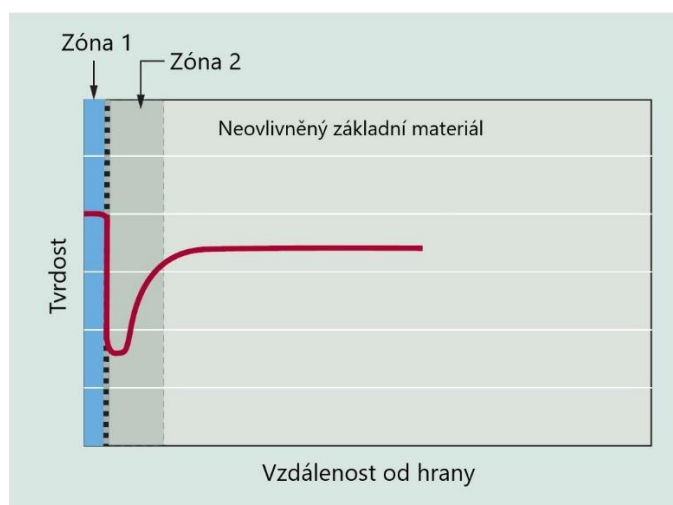
Obr. 24 – Vířivá tryska systému HyDefinition® [63]



Obr. 25 – Řezání technologií HyDefinition® [63]

### 3.5 Tepelně ovlivněná oblast VP ocelí při plazmovém řezání [13, 14, 18, 26, 55, 61]

Dělení materiálu je jednou z operací, která může výrazně ovlivnit mechanické vlastnosti budoucího spoje prvků z vysokopevnostních ocelí. Mechanické vlastnosti VP ocelí mohou být nepříznivě ovlivněny každou operací, kdy je do materiálu vnášeno teplo vysoké intenzity – během procesu dělení materiálu se podstatně může měnit mikrostruktura oceli v TOO podle účinku tepla za současné změny houževnatosti a tvrdosti materiálu. Jako výhodné technologie dělení vysokopevnostních ocelí se jeví řezání laserem, vodním paprskem nebo plazmou, kdy přesně provedený řez vyvolá vznik TOO s velmi malou šířkou. Vzhledem k tomu, že řezání laserem je vhodné pro menší tloušťky ocelí (do cca 35 mm), řezání plazmou se ukazuje jako jedna z nejvhodnějších forem dělení VP ocelí i pro velké tloušťky plechů. Šířka TOO je obecně u všech uvedených technologií přímo úměrná tepelnému příkonu, tj. metodě a rychlosti řezání – čím vyšší je tepelný výkon, tím širší je TOO. V průběhu plazmového dělení dochází k zahřátí materiálu a jeho následnému ochlazení na vzduchu. Tato skutečnost se projevuje vznikem zakalené vrstvy na povrchu řezu, tj. nárůstem nebo jen mírným poklesem tvrdosti. Materiál, který byl zahřát, ale neproudí kolem něj vzduch (pod povrchem), vykazuje výrazný pokles tvrdosti a pevnosti oproti neovlivněnému materiálu. Dále od hrany se snižuje rozdíl v tvrdostech až do zániku rozdílů. Průběh změn tvrdosti v TOO je znázorněn na Obr. 26.



Obr. 26 – Průběh tvrdosti v TOO při plazmovém řezání [64]

## 4 EXPERIMENT [8, 65–68]

Cílem experimentální části bakalářské práce bylo analyzovat vliv procesu řezání některých VP ocelí plazmovou technologií na změnu jejich vybraných mechanických vlastností v oblasti řezu. Předmětem zkoušek bylo určit závislost mezi parametry plazmového řezání plechů z VP ocelí – rychlostí řezu – a změnou tvrdosti materiálu v TOO řezu a stanovit její velikost.

V rámci experimentální části byla nejprve vyrobena zkušební tělesa ze 3 různých druhů plechů různé tloušťky z VP ocelí. První část výroby probíhala v laboratořích Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně, kde byly řezány oceli SSAB ARMOX 500 T a SSAB DOMEX 650 MC E na mechanizované vzduchové plazmě. Druhá část výroby se uskutečnila ve firmě RW Ferra s.r.o., kde bylo provedeno řezání oceli ThyssenKrupp XAR®450 na CNC kyslíkové plazmě.

U zhotovených zkušebních vzorků byl vizuálně hodnocen vzhled řezných ploch. Následně, po vybroušení povrchu řezu, byly provedeny zkoušky měření tvrdosti, a to jak v TOO řezu, tak v místech, které nebyly dělením materiálu teplotně ovlivněny a dále byla měřena velikost TOO.

### 4.1 Základní materiály pro experimenty

Plazmovou technologií byly řezány plechy různé tloušťky ze tří druhů vysokopevnostních ocelí (materiálové listy těchto ocelí jsou uvedeny v příloze):

- SSAB ARMOX 500 T: jedná se o balistický plech, určený zejména pro armádní, ale i civilní použití. Plech se vyznačuje vysokou tvrdostí i pevností. Vybrané základní mechanické vlastnosti plechu uvádí Tab. 1. Pro experiment byl použit plech tloušťky 5 mm.

Tab. 1 - Vybrané mechanické vlastnosti oceli ARMOX 500 T [8]

Tloušťka (mm)	Tvrdost (HVB)	Lomová houževnatost	Mez kluzu $R_{p,0.2}$ (MPa)	Mez pevnosti $R_m$ (MPa)	Tažnost $A_5$ (%)
3.0–80.0	480–540	32 J / -40 °C	1250	1450–1750	8

- SSAB DOMEX 650 MC E (nyní STRENX 650 MC E): jedná se o zatepla válcovanou a následně kalenou konstrukční ocel pro sériovou výrobu. Vybrané základní mechanické vlastnosti jsou uvedeny Tab. 2. Pro experiment byl použit plech tloušťky 8 mm.

Tab. 2 - Vybrané mechanické vlastnosti oceli STRENX 650 MC [65]

Tloušťka (mm)	Mez kluzu $R_{eH}$ (MPa)	Mez pevnosti $R_m$ (MPa)	Tažnost $A_{80}$ (%)	Tažnost $A_5$ (%)	Lomová houževnatost
2.0–10.0	650	700-850	12	14	27 J / -40 °C

- ThyssenKrupp XAR®450: jedná se o univerzální ocel, kombinující vysokou odolnost proti opotřebení a dobrou zpracovatelnost. Vybrané základní mechanické vlastnosti uvádí Tab. 3. Pro experiment byl použit plech tloušťky 50 mm.

Tab. 3 - Vybrané mechanické vlastnosti oceli XAR®450 [66]

Tvrdost (HBV)	Mez kluzu $R_{p0.2}$ (MPa)	Mez pevnosti $R_m$ (MPa)	Tažnost A (%)	Lomová houževnatost	Lomová houževnatost
420–480	1200	1400	10	27 J / -20 °C	40 J / -40 °C

### 4.2 Příprava zkušebních těles

Příprava zkušebních těles v laboratořích Fakulty strojního inženýrství proběhla na zařízení ESAB LPH 50, což je plazmový řezací stroj (Obr. 27), využívající vzduch jako technický plyn.

Umožňuje řezat oceli do tloušťky až 12 mm. Invertor nabízí nastavení proudu 30 nebo 50 A. Hořák je chlazený vzduchem a jeho posun je mechanizován (Obr. 28). Při výrobě všech zkušebních těles byly provedeny na každém tělese dvojice řezů, které se lišily řeznou rychlostí.

Řezání zkušebních těles ve společnosti RW Ferra s.r.o. proběhlo na zařízení Kjellberg Finsterwalde Fine Focus 1600 (2 x 800 A) na pracovním stole Microstep s 2D polohováním. Jako pracovní plyn byl použit kyslík.



Obr. 27 – Zařízení ESAB LPH 50



Obr. 28 – Mechanizovaný posuv

Řezy směřovaly vždy kolmo k povrchu plechu a směr řezání byl pro všechna tělesa v rámci experimentu stejný. Vzhledem k tepelnému ovlivnění byla zvolena šířka řezaných těles 20 mm – šířka TOO se pohybuje řádově v jednotkách milimetrů, při zvolené šířce vzorků tak lze jednoznačně rozlišit ovlivnění jednotlivých oblastí vneseným teplem. Plechy zkušebních těles nebyly před zkouškou nijak upravovány. Po řezech plazmou vzorky chladly volně na vzduchu.

Z každého ze tří druhů plechu bylo vyrobeno jedno zkušební těleso a na něm proběhlo hodnocení vlastností u dvou různých řezů na dvou stranách téhož tělesa: u oceli ARMOX 500 T (zkušební těleso T1) a u oceli DOMEX 650 MC (zkušební těleso T2) byly voleny dvě úrovně řezné rychlosti: 200 a 300 cm/min. Výchozí rozměry těles T1 a T2 byly 20 x 100 mm. Řezání oceli XAR®450 (zkušební těleso T3) proběhlo pouze jednou řeznou rychlostí po obou stranách zkušebního tělesa. Přehled zkušebních uvádí Tab. 4.

Tab. 4 - Parametry zkušebních těles a řezání [68]

	T1-1	T1-2	T2-1	T2-2	T3-1, T3-2
Materiál	ARMOX 500		DOMEX 650		XAR®450
Rozměr vzorku [mm]	20 x 40		20 x 40		40 x 10
Tloušťka [mm]	5		8		50
Napětí [V]	320	320	320	320	200
Proud [A]	50	50	50	50	300
Výška [mm]	3	3	3	3	8
Rychlost posuvu [cm/min]	200	300	200	300	380

Příprava zkušebních těles zachycuje Obr. 29 a Obr. 30. Povrch řezu těles je patrný z Obr. 32 až Obr. 36.



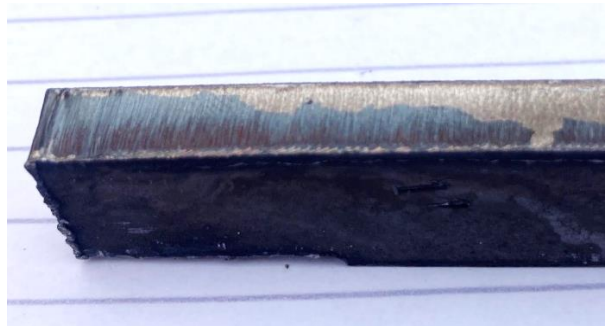
Obr. 29 – Příprava zkušebních těles (laboratoř FSI)



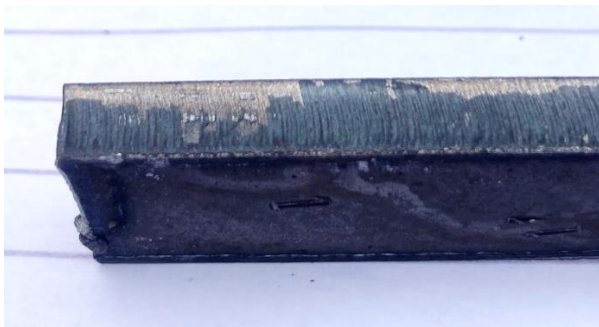
Obr. 30 – Výchozí polotovár pro přípravu těles (XAR®)



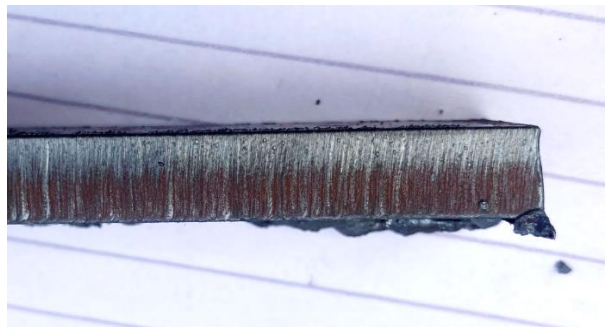
Obr. 31 – Výchozí polotovár pro přípravu těles (ARMOX)



Obr. 32 – Povrch řezu tělesa T1-1 (ARMOX)



Obr. 33 – Povrch řezu tělesa T1-2 (ARMOX)



Obr. 34 – Povrch řezu tělesa T2-1 (DOMEX)



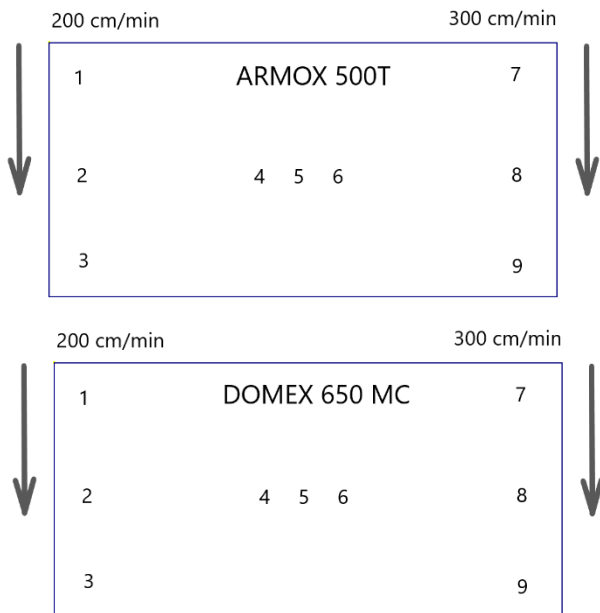
Obr. 35 – Povrch řezu tělesa T2-2 (DOMEX)



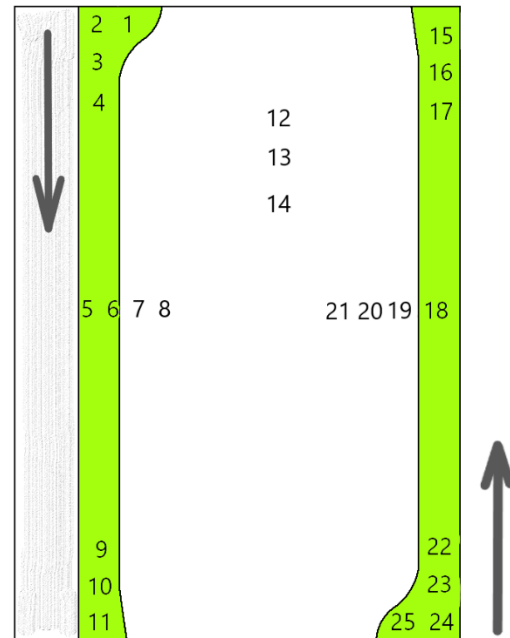
Obr. 36 – Povrch řezu tělesa T3 (XAR®)

### 4.3 Měření tvrdosti

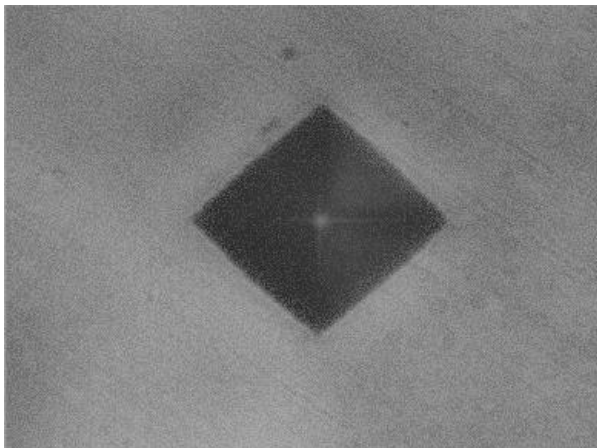
Na vybroušeném povrchu zkušebních těles T1 (ARMOX) a T2 (DOMEX) byla měřena tvrdost materiálu. Na každém tělese byla měřena tvrdost v oblasti řezu, provedeného rychlostí 200 cm/min (T1-1: body 1, 2, 3) a 300 cm/min (T1-2: body 7, 8, 9) – tzn. v oblasti ovlivněné teplem i v místě řezem tepelně neovlivněném (body 4, 5, 6). Pozice měřených bodů jsou patrné z Obr. 37 (včetně vyznačeného směru řezání).



Obr. 37 – Poloha bodů pro měření tvrdosti povrchu těles T1 (ARMOX) a T2 (DOMEX)



Obr. 38 – Poloha bodů pro měření tvrdosti povrchu tělesa T3 (XAR®). Řezná hrana T3-1 je na obrázku vlevo, řez T3-2 vpravo. Zelenou barvou jsou vyznačeny TOO řezů.



Obr. 39 – Detail měřicího bodu tvrdosti



Obr. 40 – Tvrdoměr Zwick 3212

Měření tvrdosti proběhlo na zkušebním zařízení Zwick 3212. Měření bylo provedeno metodou dle Vickerse při zatížení 5 kg – HV5. Přístroj slouží pro stanovení tvrdosti podle Vickerse podle DIN 50133, ASTM E 92, BS 427, ISO/R81, ISO/R192, ISO/R399. Postup je vhodný pro měření tvrdosti běžných ocelí, ale také pro velmi tvrdé materiály nebo vrstvy. Pro snímání a vyhodnocení vtisků je standardní stroj vybaven souřadnicovým stolem a připojením

na PC, toto vybavení bylo včetně SW zhotoveno u společnosti Zwick. Zařízení je zachyceno na Obr. 40.

V Tab. 5 jsou uvedeny naměřené hodnoty tvrdosti. Z hodnot je patrná změna tvrdosti struktury kovu, která nastala v oblastech řezu materiálu jako důsledek tepelného ovlivnění.

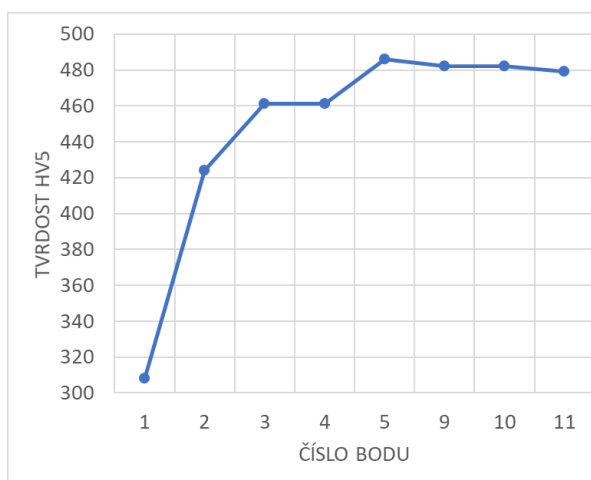
Tab. 5 - Naměřené hodnoty tvrdostí těles T1 a T2

Zkušební těleso	Naměřená tvrdost [HV5] v bodech								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T1	431	440	475	462	467	470	490	490	475
T2	177	182	178	180	178	178	178	169	179

Na vybroušeném povrchu zkušební tělesa T3 (XAR®) byla měřena tvrdost v oblasti řezů (tzn. v oblasti ovlivněné teplem – viz zelené oblasti) i v místě řezem tepelně neovlivněném – na Obr. 38 jsou vyznačeny pozice měřených bodů včetně směru řezání. Naměřené hodnoty tvrdostí jsou patrné z Tab. 6.

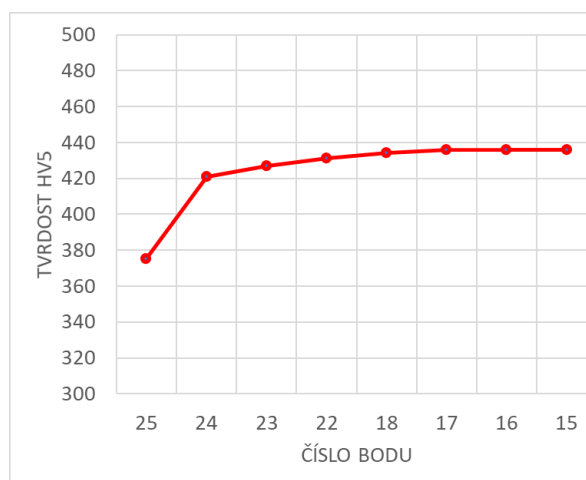
Tab. 6 - Naměřené hodnoty tvrdostí tělesa T3

Číslo bodu	Tvrdost [HV5]	Číslo bodu	Tvrdost [HV5]	Číslo bodu	Tvrdost [HV5]
1	308	12	430	15	436
2	424	13	430	16	436
3	461	14	440	17	436
4	461			18	434
5	486			19	354
6	335			20	369
7	356			21	424
8	433			22	431
9	482			23	427
10	482			24	421
11	479			25	375



Obr. 41 – Průběh tvrdosti v řezné hraně T3-1 tělesa T3.

Čísla a poloha bodů – viz Obr. 38.

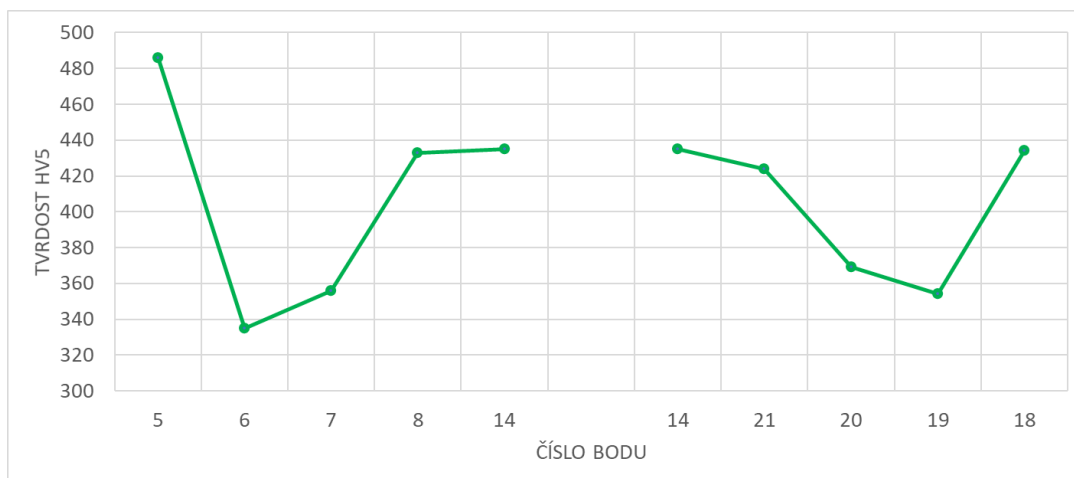


Obr. 42 – Průběh tvrdosti v řezné hraně T3-2 tělesa T3.

Čísla a poloha bodů – viz Obr. 38.



Na Obr. 41, Obr. 42 a Obr. 43 je zachycen průběh tvrdosti HV5 v tělese T3. Na Obr. 41 je řezná hrana T3-1 (body 1–5, 9–11), na Obr. 42 řezná hrana T3-2 (body 15–18, 22–25). Obr. 43 zobrazuje vodorovný řez: TOO řezu T3-1 – tepelně neovlivněný materiál – TOO řezu T3-2; měřicí body jsou od sebe vzdáleny 0,5 mm.



Obr. 43 – Průběh tvrdosti ve vodorovném řezu tělesem T3:  
TOO řezu T3-1 – tepelně neovlivněný materiál – TOO řezu T3-2.

#### 4.4 Měření šířky TOO

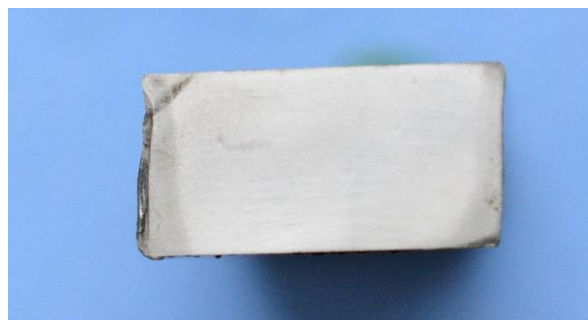
Na vybroušeném povrchu zkušebních tělesek T1, T2, T3 bylo provedeno leptání. Při 50násobném zvětšení byla pozorována a měřena jednotlivá pásma tepelného ovlivnění oceli v oblasti řezů. Výsledky měřené šířky TOO řezných hran zkušebních těles T1, T2, T3 jsou patrné z Tab. 7. Na Obr. 44 až Obr. 57 jsou zobrazena zkušební tělesa pro provedení měření šířky TOO s vyznačením naměřených dimenzí.

Tab. 7 - Naměřené šířky TOO řezných hran zkušebních těles T1, T2, T3

Zkušební těleso (řezná hrana)	T1-1	T1-2	T2-1	T2-2	T3-1
Šířka TOO – počátek řezu [mm]	1,154	1,120	0,934	0,972	1,926
Šířka TOO – konec řezu [mm]	1,849	1,670	2,418	1,766	4,587



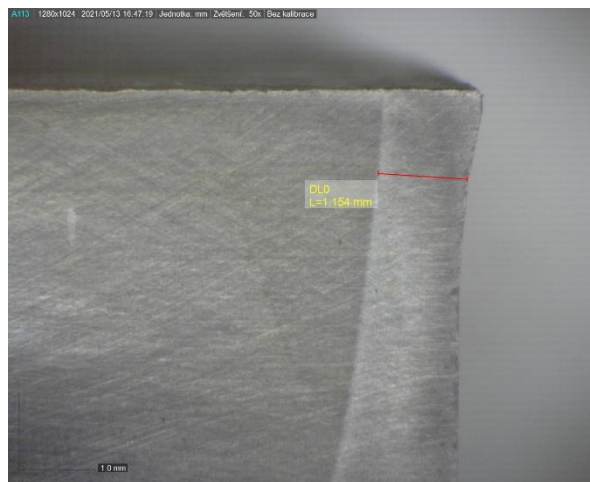
Obr. 44 – Těleso T1: T1-2 vlevo, T1-1  
vpravo



Obr. 45 – Těleso T2: T2-2 vlevo, T2-1  
vpravo



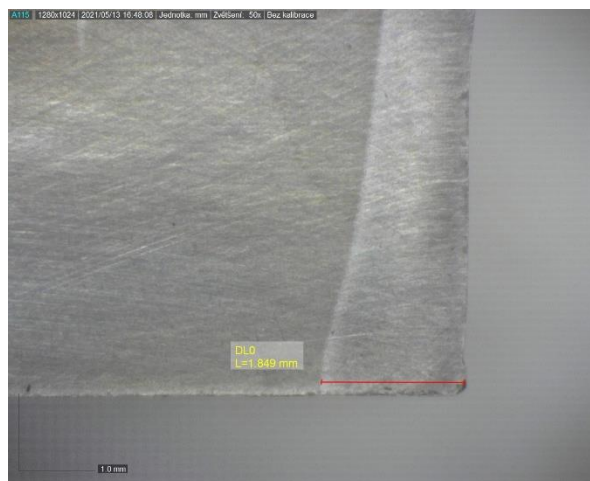
Obr. 46 – Šířka TOO tělesa T1-2: počátek řezu. Naměřená šířka: 1,120 mm



Obr. 47 – Šířka TOO tělesa T1-1: počátek řezu. Naměřená šířka: 1,154 mm



Obr. 48 – Šířka TOO tělesa T1-2: konec řezu. Naměřená šířka: 1,670 mm



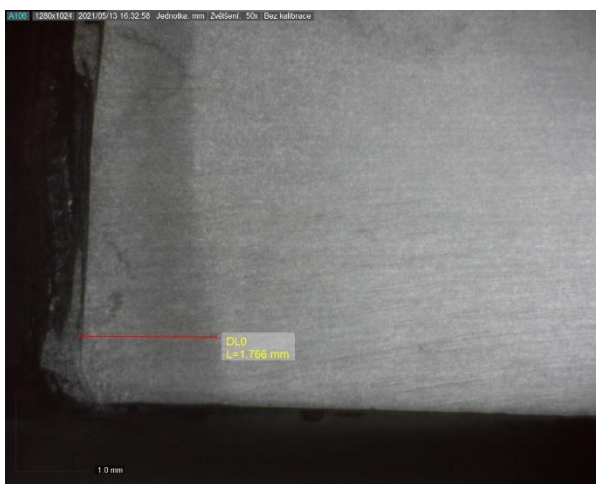
Obr. 49 – Šířka TOO tělesa T1-1: konec řezu. Naměřená šířka: 1,849 mm



Obr. 50 – Šířka TOO tělesa T2-2: počátek řezu. Naměřená šířka: 0,972 mm



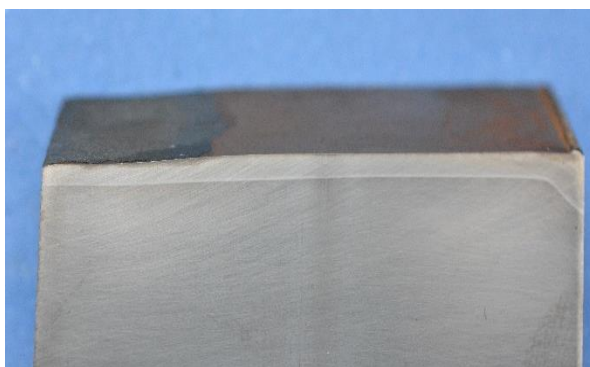
Obr. 51 – Šířka TOO tělesa T2-1: počátek řezu. Naměřená šířka: 0,934 mm



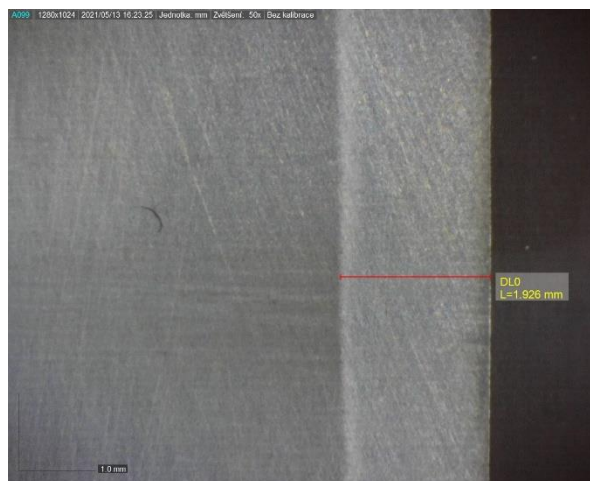
Obr. 52 – Šířka TOO tělesa T2-2: konec řezu. Naměřená šířka: 1,766 mm



Obr. 53 – Šířka TOO tělesa T2-1: konec řezu. Naměřená šířka: 2,418 mm



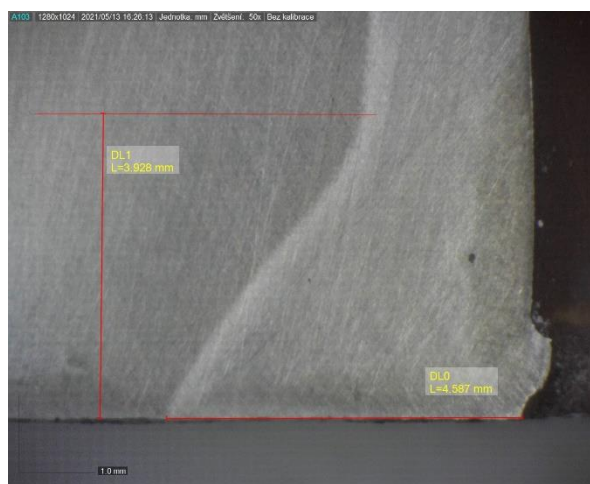
Obr. 54 – Těleso T3: horní strana řezaného vzorku je na obrázku vlevo



Obr. 55 – Těleso T3: počátek řezu. Naměřená šířka: 1,926 mm



Obr. 56 – Šířka TOO tělesa T3: střední oblast řezu. Naměřená šířka: 2,047 mm



Obr. 57 – Šířka TOO tělesa T1-1: konec řezu. Naměřená šířka: 4,587 mm

## 4.5 Vyhodnocení provedených měření

V rámci experimentu byla vyrobena zkušební tělesa T1, T2, T3, po jednom z ocelí ARMOX 500 T, DOMEX 650 MC E a XAR®450. Při výrobě – řezání plechu plazmovou technologií – byla u plechů z ocelí ARMOX a DOMEX zvolena různá řezná rychlost, a to 200 cm/min nebo 300 cm/min, u plechu z oceli XAR® byly oba řezy provedeny se stejnými parametry. Na zkušebních tělesech byl následně analyzován vliv provedeného řezu na tvrdost materiálu a byla měřena šířka TOO. U ocelí ARMOX a DOMEX byl vizuálně hodnocen vliv různé rychlosti řezu na jeho provedení a kvalitu.

Vliv řezné rychlosti na provedení a kvalitu řezu:

- Plech z oceli ARMOX tloušťky 5 mm: bylo možné provést kvalitní řez v případě obou zvolených řezných rychlostí – 200 cm/min u T1-1, resp. 300 cm/min u T1-2. Vizuálně jsou oba provedené řezy velmi podobné s malou odlišností v drsnosti povrchu – viz Obr. 32 a Obr. 33. Analýza drsnosti povrchu nebyla předmětem experimentu a nebyla podrobně hodnocena.
- Plech z oceli DOMEX tloušťky 8 mm: je patrné, že vyšší zvolená rychlost řezu 300 cm/min u T2-2 je pro tuto konfiguraci materiálu a tloušťky hraniční. Na Obr. 35 je zřetelně patrná vyšší drsnost povrchu řezu provedeného vyšší řeznou rychlostí (oproti T2-1 na Obr. 34) a také vznik otřepu na spodní hraně řezu. Stopa nástroje navíc není kolmá ke hranám řezu.

Vliv řezné rychlosti na tepelné ovlivnění materiálu v místě řezu byl stanoven na základě porovnání tvrdosti materiálu na vybroušeném povrchu v oblasti provedeného řezu a v místě dělení teplotně neovlivněné. Z výsledků experimentů (viz Tab. 5 a Tab. 6) je na základě naměřených hodnot tvrdosti HV5 patrná různá míra ovlivnění mechanických vlastností ocelí (resp. měřené tvrdosti) vlivem dělení plazmovým řezem:

- Plech z oceli ARMOX tloušťky 5 mm: jak je patrné z Tab. 5, v případě rychlosti řezu 200 cm/min (řez T1-1) došlo k mírnému poklesu tvrdosti v TOO. Při řezné rychlosti 300 cm/min (řez T1-2) se naopak, vlivem menšího vneseného tepla, objevila zakalená vrstva, projevující se zvýšenou tvrdostí. Šířka TOO byla změřena 1,154 mm až 1,849 mm u řezu T1-1 a 1,120 mm až 1,670 mm u řezu T1-2, což odpovídá předpokládaným hodnotám.
- Plech z oceli DOMEX tloušťky 8 mm: jak je zřejmé z Tab. 5, tepelné ovlivnění materiálu se prakticky neprojevilo ani při jedné zvolené řezné rychlosti. Šířka TOO byla změřena 0,972 mm až 1,766 mm u řezu T2-1 a 0,934 mm až 2,418 mm u řezu T2-2. Naměřené šířky odpovídají obvyklým hodnotám.
- Plech z oceli XAR® tloušťky 50 mm: Na tělese T3 byly měřeny tvrdosti HV5 v 25 bodech, (viz Tab. 6 a Obr. 41, Obr. 42, Obr. 43), které lze rozdělit do 3 skupin: První a druhá skupina znázorňují lokality s měnícím se průběhem tvrdosti v tloušťce zkušební tělesa v oblasti s předpokládaným tepelným ovlivněním materiálu provedeným řezem. Ve směru řezu mají hodnoty tvrdosti rostoucí trend díky menšímu množství vneseného tepla. Třetí skupina měřících bodů reprezentuje zónu, která není prováděným dělením materiálu nijak tepelně ovlivněna. Lze konstatovat, že průběh tvrdosti v tělese odpovídá předpokladům, tzn. v oblasti řezu došlo ke zvýšení tvrdosti nad úroveň tepelně neovlivněného materiálu, dále k poklesu tvrdosti a jejímu postupnému růstu. Uvedený průběh názorně ilustruje Obr. 43. Šířka TOO byla naměřena 1,926 mm až 2,047 mm, resp. 4,587 mm na začátku řezu (viz Tab. 7). I v tomto případě se jedná o očekávané hodnoty.

## 5 ZÁVĚR

Bakalářská práce je zaměřena na plazmové řezání vysokopevnostních ocelí. Cílem práce bylo stručné seznámení s podstatou vysokopevnostních ocelí, vypracování přehledu základních metod, postupů a zařízení používaných pro dělení ocelí se zaměřením za plazmové řezání. Dále, na základě provedených experimentálních měření, vyhodnocení vlivu procesu dělení vybraných typů vysokopevnostních ocelí plazmovým řezáním na velikost tepelného ovlivnění.

Práce je členěna na část teoretickou (kapitoly 1 až 3) a experimentální (kapitola 4). První kapitola uvádí základní charakteristiky, rozdělení a druhy ocelí a principy výroby ocelí vyšších pevností. V druhé kapitole je pojednáno o základních metodách dělení ocelí, jejich podstatě a možnostech využití. Zvláštní pozornost byla věnována metodě plazmového řezání ocelí, které je náplní kapitoly třetí. Jsou popsány základní typy řezání plazmou, princip zařízení pro řezání plazmou a jsou uvedeny základní faktory a jejich vliv na vlastnosti řezu. Důležitým tématem při plazmovém řezání vysokopevnostních ocelí je jejich tepelné ovlivnění vlastním procesem dělení. Při zpracování teoretické části byla využita řada tuzemských i zahraničních publikací, zaměřených na uvedenou problematiku. Hlavním cílem experimentální části práce bylo analyzovat vliv řezání vysokopevnostních ocelí plazmou na tepelné ovlivnění řezaných ocelí. Zkoumání byla provedena u 3 druhů plechů z vysokopevnostních ocelí: SSAB ARMOX 500 T, SSAB DOMEX 650 MC E a ThyssenKrupp XAR®450. Plechy byly zvoleny v tloušťkách 5 mm (ARMOX), 8 mm (DOMEX), resp. 50 mm (XAR®). Parametry zkušebních těles a řezání jsou patrné z Tab. 4.

Byla zhotovena zkušební tělesa T1 (z oceli ARMOX), T2 (z oceli DOMEX) a T3 (z oceli XAR®) a bylo provedeno vyhodnocení vlivu řezání s danými parametry na tepelné ovlivnění děleného materiálu v místě řezu. Možné nepříznivé ovlivnění mechanických vlastností ocelí bylo hodnoceno na základě porovnání tvrdosti oceli v oblastech, které byly řezem tepelně ovlivněny a v místech řezem neovlivněných. V předem vybraných bodech vybroušených řezů zkušebních těles byla měřena, za použití tvrdoměru Zwick 3212, tvrdost dle Vickerse HV5. Při 50násobném zvětšení byla dále měřena šířka TOO u zkušebních řezů těles. Podrobné výsledky jsou uvedeny v části 4.4 Výsledky a vyhodnocení.

Z provedených experimentálních měření (Tab. 5, Tab. 6, Tab. 7) a jejich vyhodnocení vyplývá, že každá ze zkoušených ocelí vykazuje rozdílnou citlivost na zhoršení mechanických vlastností (resp. tvrdosti) vlivem tepelného ovlivnění způsobeným plazmovým řezem.

U těles z oceli DOMEX 650 MC E neměly provedené řezy na tvrdost oceli v podstatě žádný vliv, a to bez ohledu na zvolenou rychlost řezání. Šířka TOO byla změřena 0,972 mm až 1,766 mm u řezu T2-1 a 0,934 mm až 2,418 mm u řezu T2-2 (viz Tab. 7).

U oceli ARMOX 500 T došlo při rychlosti řezání 200 cm/min k mírnému poklesu tvrdosti v TOO, při řezné rychlosti 300 cm/min se naopak objevila zakalená vrstva, projevující se zvýšenou tvrdostí. Šířka TOO byla změřena 1,154 mm až 1,849 mm u řezu T1-1 a 1,120 mm až 1,670 mm u řezu T1-2 (viz Tab. 7).

U oceli XAR® (tloušťka plechu 50 mm) došlo v oblasti řezu ke zvýšení tvrdosti nad úroveň tepelně neovlivněného materiálu, dále k poklesu tvrdosti a jejímu postupnému růstu. Uvedený průběh názorně ilustruje Obr. 43. Šířka TOO byla naměřena 1,926 mm až 2,047 mm, resp. 4,587 mm na začátku řezu (viz Tab. 7).

Z výsledků je zřejmé, že vlivem tepelného dělení materiálu dochází k negativnímu ovlivnění jeho mechanických vlastností (resp. tvrdosti, která byla měřena). Na základě dosažených výsledků lze též konstatovat, že parametry plazmového řezání byly v případě experimentálních zkoušek nastaveny korektně. Z dosažených výsledků je zřejmé, že správná volba parametrů dělení materiálu je základním faktorem pro dosažení kvalitně provedeného řezu s co nejmenším nežádoucím tepelným ovlivněním řezaného materiálu.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.
2. ČSN EN 10025-6 - *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí - Část 6: Technické dodací podmínky pro ploché výrobky z ocelí s vyšší mezí kluzu v zušlechtěném stavu*. B.m.: Český normalizační institut. 2020
3. CNC Cutting Machine Manufacturer. *OMNI CNC* [online]. 16. květen 2021 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: [www.omni-cnc.com/](http://www.omni-cnc.com/)
4. CNC plazma. *Raptor Technologies* [online]. 15. květen 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://www.raptor-cnc.com/cnc-plazma.html>
5. ČSN EN 10020 - *Definice a rozdělení ocelí*. B.m.: Český normalizační institut. 2001
6. ISO 4948-1:1982 - *Steels - Classification - Part 1: Classification of steels into unalloyed and alloy steels based on chemical composition*. 1982
7. KRUMNIKL, František, Miroslav MAKARIUS a Ladislav ŠEFFL. *Výroba oceli*. 2. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1969.
8. *Data sheet Armax 500T* [online]. B.m.: SSAB. 2017. Dostupné z: [www.ssab.com/api/sitecore/Datasheet/GetDocument?productId=ACD3681501884BA2B09D742FE19A0F7F&language=en](http://www.ssab.com/api/sitecore/Datasheet/GetDocument?productId=ACD3681501884BA2B09D742FE19A0F7F&language=en)
9. ČADA, Radek. *Technologie I*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1507-7.
10. LI, Yongfeng, Lian CAI, Guanjun LIU a Lijie MA. Effect of Cold-Rolled Thickness Reduction Degree on Characteristics of Hydrogen Diffusion in Silicon Steel. *International Journal of Corrosion* [online]. 2014, 2014. ISSN 1687-9325. Dostupné z: [doi:10.1155/2014/309416](https://doi.org/10.1155/2014/309416)
11. BENEŠ, Antonín. *Kovové materiály: vlastnosti a použití*. 1. vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1968.
12. VOJTĚCH, Dalibor. *Kovové materiály*. 1. vyd. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2006. ISBN 80-7080-600-1.
13. PILOUS, Václav. *Materiály a jejich chování při svařování*. 1. vyd. Plzeň: Škoda-Welding, 2009.
14. FOLDÝNA, Václav, Věra OLŠAROVÁ, Karel HENNHOFFER, Ivo HLAVATÝ, Jaroslav KOUKAL, František KRISTOFORY, Vladislav OCHODEK, Václav PILOUS, Jaroslav PURMENSKÝ, Drahomír SCHWARZ a Július VESELKO. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 2. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-85-3.
15. HEJNIC, Josef. *Materiály s mezí kluzu nad 500 MPa určené pro tváření*. Praha, 2018. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.
16. MAZANCOVÁ, Eva a Zdeněk FRIEDRICH. *Technické materiály I*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2012. ISBN 978-80-248-2577-9.
17. MARROW, James. Understanding The Jominy End Quench Test. *Industrial Heating* [online]. 2001 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [www.industrialheating.com/articles/84357-understanding-the-jominy-end-quench-test](http://www.industrialheating.com/articles/84357-understanding-the-jominy-end-quench-test)
18. Studijní podklady ke kurzům pro vyšší svářečský personál. *SVV Praha s.r.o.* [online]. 15. květen 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [svv.cz/svarovani/klientska-zona/studijni-podklady-ke-kurzu-pro-vyssi-svarecky-perosnal](http://svv.cz/svarovani/klientska-zona/studijni-podklady-ke-kurzu-pro-vyssi-svarecky-perosnal)
19. BARTÁK, Jiří. *Výroba a aplikované inženýrství*. 1. vyd. Plzeň: Škoda-Welding, 2009.

20. Transformation-Induced Plasticity (TRIP) Steel. *WorldAutoSteel* [online]. 16. květen 2021 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: [www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/transformation-induced-plasticity-trip-steel/](http://www.worldautosteel.org/steel-basics/steel-types/transformation-induced-plasticity-trip-steel/)
21. KEELER, Stuart a Menachem KIMCHI, ed. *Advanced High-Strength Steels Application Guidelines Version 6.0* [online]. B.m.: World Auto Steel. 2017. Dostupné z: [www.worldautosteel.org/projects/advanced-high-strength-steel-application-guidelines/](http://www.worldautosteel.org/projects/advanced-high-strength-steel-application-guidelines/)
22. HAIDAR, Mobark a Lukács JÁNOS. HCF Design curves for high strength steel welded joints. *Design of Machines and Structures*. 2018, 8(2), 39–51.
23. *Höherfester Stahl für den Automobil-Leichtbau. High-strength steel for lightweight auto body manufacture*. [online]. B.m.: ThyssenKrupp Stahl AG. 2003. Dostupné z: [docplayer.org/5962148-High-strength-steel-for-lightweight-auto-body-manufacture.html](http://docplayer.org/5962148-High-strength-steel-for-lightweight-auto-body-manufacture.html)
24. *Vysokopevné a vysokolegované oceli, superslitiny* [online]. B.m.: Ústav materiálového inženýrství, Strojní fakulta, ČVUT. 2012. Dostupné z: [umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/10/01\\_pm\\_vyskopevne\\_a\\_vysokolegovane\\_oceli\\_a\\_slitiny\\_ni\\_a\\_co.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/10/01_pm_vyskopevne_a_vysokolegovane_oceli_a_slitiny_ni_a_co.pdf)
25. MINAŘÍK, Václav. *Tepelné dělení materiálu*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 1993. ISBN 80-01-01028-7.
26. MAJER, Lubomír, Jiří PODHORA, Miroslav SUCHÁNEK a Stanislav VEJVODA. *Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 1999. ISBN 80-85771-70-5.
27. Welding Weldox or RQT or (generic) S690 Steels. *MIG Welding - The DIY guide* [online]. 15. květen 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [www.mig-welding.co.uk/weldox.htm](http://www.mig-welding.co.uk/weldox.htm)
28. Svařování ořezávacích a konstrukčních plechů Hardox a Wieldox. *Gama ocel* [online]. 15. květen 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [www.gamaocel.cz/4863/svarovani/](http://www.gamaocel.cz/4863/svarovani/)
29. Welding Hardox Steels. *MIG Welding - The DIY guide* [online]. 15. květen 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [www.mig-welding.co.uk/hardox.htm](http://www.mig-welding.co.uk/hardox.htm)
30. NOVÁK, Stanislav a Jiří MRÁČEK. Svařování ocelí s vyšší pevností. *All for Power* [online]. 2009, (2). ISSN 1802-8535. Dostupné z: [old.allforpower.cz/UserFiles/files/2009/svarovani%20oceli%20vys%20pevnosti.pdf](http://old.allforpower.cz/UserFiles/files/2009/svarovani%20oceli%20vys%20pevnosti.pdf)
31. ZEMAN, Marian. Assessment of weldability of WELDOX 1100 high-strength quenched and tempered steel. *Welding International* [online]. 2009, 23(2), 73–82. ISSN 0950-7116. Dostupné z: [doi:10.1080/09507110802349122](https://doi.org/10.1080/09507110802349122)
32. An In-depth Comparison of the Four Processing Methods: Laser Cutting, Water Cutting, Plasma Cutting, WEDM - Meetyou Carbide. *Meetyou Carbide* [online]. 2019 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [www.meetyoucarbide.com/an-in-depth-comparison-of-the-four-processing-methods-laser-cutting-water-cutting-plasma-cutting-wedm/](http://www.meetyoucarbide.com/an-in-depth-comparison-of-the-four-processing-methods-laser-cutting-water-cutting-plasma-cutting-wedm/)
33. Dělení a ohřev. *Linde Gas a.s.* [online]. 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [www.linde-gas.cz/cs/industries/welding\\_and\\_metal\\_fabrication/cutting\\_and\\_heating.html](http://www.linde-gas.cz/cs/industries/welding_and_metal_fabrication/cutting_and_heating.html)
34. Dělení materiálu – CHPS. *CHPS s.r.o.* [online]. 15. květen 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [chps.cz/deleni-materialu/](http://chps.cz/deleni-materialu/)
35. ŠPINAR, Jiří. EDM - elektrojiskrové obrábění. *toolscomp* [online]. 2009 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [web.archive.org/web/20160807043044/http://www.toolscomp.cz:80/technologie/edm-elektrojiskrove-obrabeni](http://web.archive.org/web/20160807043044/http://www.toolscomp.cz:80/technologie/edm-elektrojiskrove-obrabeni)
36. POSLUŠNÝ, Petr. Elektroerozivní obrábění. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2006 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [www.mmspektrum.com/clanek/elektroerozivni-obrabeni](http://www.mmspektrum.com/clanek/elektroerozivni-obrabeni)

37. JANATA, Marek. *Průmyslové lasery a jejich aplikace* [online]. B.m.: Air Products. 2008 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [web.archive.org/web/20081114211131/http://www.airproducts.cz/metalfabrication/svarovani/pdf/Lasery\\_clanek-MJ.pdf](http://web.archive.org/web/20081114211131/http://www.airproducts.cz/metalfabrication/svarovani/pdf/Lasery_clanek-MJ.pdf)
38. BOUDA, Luděk. Řezání vodním paprskem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [www.mmspektrum.com/clanek/rezani-vodnim-paprskem](http://www.mmspektrum.com/clanek/rezani-vodnim-paprskem)
39. Řezání vodním paprskem Praha, Brno, Plzeň. *AWAC, spol. s r.o.* [online]. 2017 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [www.awac.cz/rezani-vodnim-paprskem/](http://www.awac.cz/rezani-vodnim-paprskem/)
40. KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery - Laserové řezání (laser cutting). *LAO - Lasery a Optika* [online]. 2011 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129](http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129)
41. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění – 8. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [www.mmspektrum.com/clanek/nekonvecni-metody-obrabeni-8-dil](http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvecni-metody-obrabeni-8-dil)
42. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění - 6. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [www.mmspektrum.com/clanek/nekonvecni-metody-obrabeni-2](http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvecni-metody-obrabeni-2)
43. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění – 5. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [www.mmspektrum.com/clanek/nekonvecni-metody-obrabeni-5-dil](http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvecni-metody-obrabeni-5-dil)
44. ŘASA, Jaroslav a Zuzana KEREČANINOVÁ. Nekonvenční metody obrábění – 4. díl. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2008 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [www.mmspektrum.com/clanek/nekonvecni-metody-obrabeni-4-dil](http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonvecni-metody-obrabeni-4-dil)
45. Elektrické tabulové nůžky na plech METALLKRAFT MTBS 2050-30. *dobré stroje* [online]. 15. květen 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [www.dobrestroje.cz/dobrestroje/eshop/27-1-KOVOOBABECI-STROJE/111-2-NUZKY-NA-PLECH/5/4134-METALLKRAFT-MTBS2050-30-ELEKTRICKE-TABULOVE-NUZKY-NA-PLECH](http://www.dobrestroje.cz/dobrestroje/eshop/27-1-KOVOOBABECI-STROJE/111-2-NUZKY-NA-PLECH/5/4134-METALLKRAFT-MTBS2050-30-ELEKTRICKE-TABULOVE-NUZKY-NA-PLECH)
46. THOMPSON, Emily. Types of Abrasives Used in Grinding Wheels. *DXP Enterprises* [online]. 2018 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [www.dxpe.com/difference-between-bonded-coated-types-abrasives-used-grinding-wheels/](http://www.dxpe.com/difference-between-bonded-coated-types-abrasives-used-grinding-wheels/)
47. Proma PPR-100 pásová pila na kov. *Rucni-naradi.cz* [online]. 15. květen 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [www.rucni-naradi.cz/proma-ppr-100-delici-pila](http://www.rucni-naradi.cz/proma-ppr-100-delici-pila)
48. Autogenní technologie a jejich praktické využití. *Konstrukce.cz* [online]. 4. prosinec 2019 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: <https://konstrukce.cz/svarovani-a-deleni-materialu/autogenni-technologie-a-jejich-prakticke-vyuziti-258>
49. Řezání – vodní paprsek. *LIKO-S* [online]. 15. květen 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [www.liko-welding.cz/cs/rezani-vodni-paprsek](http://www.liko-welding.cz/cs/rezani-vodni-paprsek)
50. Řezání laserem. *THkovo* [online]. 2017 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [www.thkovo.cz/rezani-laserem.html](http://www.thkovo.cz/rezani-laserem.html)
51. Elektroerozivní obrábění. *Eberhard Automatizace s.r.o.* [online]. 16. květen 2021 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: [www.eberhard.cz/cz/elektroerozivni-obrabeni.html](http://www.eberhard.cz/cz/elektroerozivni-obrabeni.html)
52. HLAVATÝ, Ivo. *Laserové a plazmové řezání* [online]. B.m.: VŠB - Technická univerzita Ostrava. 2009 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: [web.archive.org/web/20170908092639/http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf](http://web.archive.org/web/20170908092639/http://homen.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/16-17-83-84.pdf)
53. ZMYDLENÝ, Tomáš. *Řezání plazmou, výukové materiály pro svářeče*. B.m.: ESAB Vamberk & ESAB cutting systems. 2017
54. The Nobel Prize in Chemistry 1932. *NobelPrize.org* [online]. 15. květen 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1932/langmuir/biographical/](http://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1932/langmuir/biographical/)



55. KUBÍČEK, Jaroslav. Díl 1: Základní metody tavného svařování. In: *Technologie II* [online]. Brno: Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, 2006. Dostupné z: [ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te\\_technologie\\_2\\_svarovani\\_tavne\\_kubicek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_2_svarovani_tavne_kubicek.pdf)
56. How Does A CNC Plasma Cutting Machine Work? *Park Industries* [online]. 15. květen 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [www.parkindustries.com/metal/plasma-processes/plasma-cutting-101/](http://www.parkindustries.com/metal/plasma-processes/plasma-cutting-101/)
57. NOVOTNÝ, Jiljí, Rudolf DUBENSKÝ a Jiří DUNOVSKÝ. *Progresivní metody svařování a tepelného dělení materiálu*. Praha: Technickoekonomický výzkumný ústav hutního průmyslu, 1986.
58. KUNCIPÁL, Josef. *Teorie svařování*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1986.
59. BARTÁK, Jiří, Vladimír BUBENÍK, Jan BUREŠ, Jan BURKOVIČ, Bohumil MÍŠEK a Heinz NEUMANN. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2000. ISBN 80-85771-72-1.
60. *TransCut 300, PLazmové řezání s kapalným řezacím médiem* [online]. B.m.: Fronius International GmbH. 2006 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: [www.froweld.cz/fotky3812/fotov/\\_ps\\_41340\\_0006\\_2704.pdf](http://www.froweld.cz/fotky3812/fotov/_ps_41340_0006_2704.pdf)
61. LANDRY, Chuck. Improving Plasma Cutting in Sheet Metal Apps. *MetalForming Magazine* [online]. 1997, (9) [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [web.archive.org/web/20111205042900/http://archive.metalformingmagazine.com/1997/09/plasma/997plasma.htm](http://web.archive.org/web/20111205042900/http://archive.metalformingmagazine.com/1997/09/plasma/997plasma.htm)
62. Svařovací metody. *Vzdělávací centrum společnosti ESAB* [online]. 15. květen 2021 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [www.esab.cz/cz/cz/education/blog/welding\\_process.cfm](http://www.esab.cz/cz/cz/education/blog/welding_process.cfm)
63. HyPerformance plasma cutting systems. *Hypertherm, Inc.* [online]. 16. květen 2021 [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: [www.hypertherm.com/learn/about-our-products/hyperformance-plasma-cutting-systems/](http://www.hypertherm.com/learn/about-our-products/hyperformance-plasma-cutting-systems/)
64. OLSON, David LeRoy. *ASM handbook: Welding, Brazing, and Soldering*. B.m.: ASM International, 1993. 6. ISBN 0-87170-382-3.
65. *Data sheet Strenx® 650MC D/E* [online]. B.m.: SSAB. 2017. Dostupné z: [www.ssab.com/api/sitecore/Datasheet/GetDocument?productId=18E0E5950CAD4D18ABA7528FCE40806C&language=en](http://www.ssab.com/api/sitecore/Datasheet/GetDocument?productId=18E0E5950CAD4D18ABA7528FCE40806C&language=en)
66. *Steel XAR, Product information for wear-resistant steels* [online]. B.m.: thyssenkrupp. 2021. Dostupné z: [www.thyssenkrupp-steel.com/media/content\\_1/publikationen/produktinformationen/grobblech\\_2/xar/thyssenkrupp\\_xar\\_product\\_information\\_steel\\_en.pdf](http://www.thyssenkrupp-steel.com/media/content_1/publikationen/produktinformationen/grobblech_2/xar/thyssenkrupp_xar_product_information_steel_en.pdf)
67. *FineFocus 800, FineFocus 1600* [online]. B.m.: Kjellberg Finsterwalde. 2008. Dostupné z: [www.westermans.com/downloads/kjellberg\\_ff800\\_en.pdf](http://www.westermans.com/downloads/kjellberg_ff800_en.pdf)
68. ESAB LPH 35, LPH 50, LPH 80, LPH 120 Air Plasma. *Vanotools B.V.* [online]. 2006 [cit. 2021-05-15]. Dostupné z: [www.vanotools.nl/infosite/pages/ESAB/Plasmasnijmachine/ESAB%20LPH%2035%20LPH%2050%20LPH%2080%20LPH%20120%20Air%20Plasma.html](http://www.vanotools.nl/infosite/pages/ESAB/Plasmasnijmachine/ESAB%20LPH%2035%20LPH%2050%20LPH%2080%20LPH%20120%20Air%20Plasma.html)

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
$A_{c1}$	teplota přeměny	[°C]
$A_{c3}$	teplota přeměny	[°C]
$C_{EV}$	uhlíkový ekvivalent	[%]
$G$	modul pružnosti ve smyku	[GPa]
$I_{EO}$	proud plazmového oblouku	[A]
$L$	střední vzdálenost dislokací	[mm]
$Q$	množství tepla k odtavení jednotky hmotnosti	[J/g]
$T_m$	teplota tavení	[K]
$U$	napětí plazmového oblouku	[V]
$U_I$	ionizační potenciál	[eV]
$b$	burgersův vektor	[-]
$b_r$	průměrná šířka řezné spáry	[cm]
$d$	průměr zrna	[mm]
$e$	elektrický náboj částice	[C]
$k$	konstanta pro stříhová napětí, k uvolnění dislokací	[-]
$m$	hmotnost částice	[kg]
$s$	tloušťka materiálu	[mm]
$s_r$	tloušťka materiálu	[cm]
$t_{max}$	maximální teplota	[°C]
$v$	rychlost částice	[m/s]
$v_r$	řezná rychlost	[cm/s]
$\Delta t_{3/1}$	čas ochlazení z 300 na 100 °C	[s]
$\Delta t_{8/5}$	čas ochlazení z 800 na 500 °C	[s]
$\eta$	účinnost přeměny energie	[-]
$\rho_d$	hustota dislokací	[1/mm]
$\rho_r$	hustota materiálu	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\sigma_0$	napětí, potřebné k překonání vlastního odporu a tření	[MPa]
$\sigma_y$	mez kluzu	[MPa]
$\tau$	skluzové napětí	[MPa]
Zkratka	Význam	
HSLA	High-strength low-alloy steel – jemnozrnná mikrolegovaná ocel	
TMZ	termomechanicky zpracovaná ocel	
TOO, TOZ	tepelně ovlivněná oblast	
VP	vysokopevnostní (ocel)	

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 – CNC řezání paprskem plazmy [3].....	9
Obr. 2 – CNC tvarové řezání plazmou [4] .....	9
Obr. 3 – Vícefázová struktura oceli [20].....	12
Obr. 4 – Struktury oceli – martenzitická (a) [17], bainitická (b) [16].....	12
Obr. 5 – Výroba TMZ – schéma řízeného válcování [18] .....	13
Obr. 6 – Přetvoření zastudena [10].....	14
Obr. 7 – Frank-Readův zdroj dislokací [12] .....	14
Obr. 8 – Srovnání typů VPO [24] .....	14
Obr. 9 – Tabulové nůžky [45] .....	16
Obr. 10 – Rozbrušování [46].....	16
Obr. 11 – Pásová pila [47].....	17
Obr. 12 – Řezání kyslíkem [48] .....	17
Obr. 13 – Řezání vodním paprskem [49] .....	18
Obr. 14 – Laserové řezání [50].....	18
Obr. 15 – Elektroerozivní zařízení [51] .....	19
Obr. 16 – Schéma plazmového řezání [60] .....	21
Obr. 17 – Média při plazmovém řezání [53].....	22
Obr. 18 – Typy plazmového řezání [53] .....	23
Obr. 19 – Netransferovaný a transferovaný oblouk [56] .....	24
Obr. 20 – Vodou stabilizovaná plazma [41] .....	24
Obr. 21 – Negativní (a) a pozitivní (b) úhel řezu [53] .....	26
Obr. 22 – Zaoblení hran [53].....	26
Obr. 23 – Vířeny a nevířeny paprsek [53].....	26
Obr. 24 – Vířivá tryska systému HyDefinition® [63].....	27
Obr. 25 – Řezání technologií HyDefinition® [63].....	27
Obr. 26 – Průběh tvrdosti v TOO při plazmovém řezání [64] .....	27
Obr. 27 – Zařízení ESAB LPH 50.....	29
Obr. 28 – Mechanizovaný posuv.....	29
Obr. 29 – Příprava zkušebních těles (laboratoř FSI).....	30
Obr. 30 – Výchozí polotovary pro přípravu těles (XAR®) .....	30
Obr. 31 – Výchozí polotovary pro přípravu těles (ARMOX) .....	30
Obr. 32 – Povrch řezu tělesa T1-1 (ARMOX) .....	30
Obr. 33 – Povrch řezu tělesa T1-2 (ARMOX) .....	30
Obr. 34 – Povrch řezu tělesa T2-1 (DOMEX) .....	30
Obr. 35 – Povrch řezu tělesa T2-2 (DOMEX) .....	30
Obr. 36 – Povrch řezu tělesa T3-2 (XAR®) .....	30
Obr. 37 – Poloha bodů pro měření tvrdosti povrchu těles T1 (ARMOX) a T2 (DOMEX).....	31
Obr. 38 – Poloha bodů pro měření tvrdosti povrchu tělesa T3 (XAR®). .....	31
Obr. 39 – Detail měřicího bodu tvrdosti .....	31
Obr. 40 – Tvrdoměr Zwick 3212 .....	31
Obr. 41 – Průběh tvrdosti v řezné hraně T3-1 tělesa T3. ....	32
Obr. 42 – Průběh tvrdosti v řezné hraně T3-2 tělesa T3. ....	32
Obr. 43 – Průběh tvrdosti ve vodorovném řezu tělesem T3:.....	33
Obr. 44 – Těleso T1: T1-2 vlevo, T1-1 vpravo .....	33

Obr. 45 – Těleso T2: T2-2 vlevo, T2-1 vpravo .....	33
Obr. 46 – Šířka TOO tělesa T1-2: počátek řezu. Naměřená šířka: 1,120 mm .....	34
Obr. 47 – Šířka TOO tělesa T1-1: počátek řezu. Naměřená šířka: 1,154 mm .....	34
Obr. 48 – Šířka TOO tělesa T1-2: konec řezu. Naměřená šířka: 1,670 mm .....	34
Obr. 49 – Šířka TOO tělesa T1-1: konec řezu. Naměřená šířka: 1,849 mm .....	34
Obr. 50 – Šířka TOO tělesa T2-2: počátek řezu. Naměřená šířka: 0,972 mm .....	34
Obr. 51 – Šířka TOO tělesa T2-1: počátek řezu. Naměřená šířka: 0,934 mm .....	34
Obr. 52 – Šířka TOO tělesa T2-2: konec řezu. Naměřená šířka: 1,766 mm .....	35
Obr. 53 – Šířka TOO tělesa T2-1: konec řezu. Naměřená šířka: 2,418 mm .....	35
Obr. 54 – Těleso T3: horní strana řezaného vzorku je na obrázku vlevo.....	35
Obr. 55 – Těleso T3: počátek řezu. Naměřená šířka: 1,926 mm.....	35
Obr. 56 – Šířka TOO tělesa T3: střední oblast řezu. Naměřená šířka: 2,047 mm .....	35
Obr. 57 – Šířka TOO tělesa T1-1: konec řezu. Naměřená šířka: 4,587 mm .....	35

## SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 - Vybrané mechanické vlastnosti oceli ARMOX 500 T [8] .....</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 2 - Vybrané mechanické vlastnosti oceli STRENX 650 MC [65].....</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 3 - Vybrané mechanické vlastnosti oceli XAR®450 [66].....</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 4 - Parametry zkušebních těles a řezání [68].....</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 5 - Naměřené hodnoty tvrdostí těles T1 a T2 .....</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 6 - Naměřené hodnoty tvrdostí tělesa T3 .....</i>	<i>32</i>
<i>Tab. 7 - Naměřené šířky TOO řezných hran zkušebních těles T1, T2, T3.....</i>	<i>33</i>

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Výňatek z normy ČSN EN 10020
Příloha 2 – Materiálový list SSAB ARMOX 500 T
Příloha 3 – Materiálový list SSAB STRENX 650 MC-E
Příloha 4 – Materiálový list ThyssenKrupp XAR 450

ČSN EN 10020: Definice a rozdělení ocelí

**Tabulka 1 – Mezní hodnoty pro nelegované a legované oceli  
(rozbor tavby)**

Prvek		Mezní hodnoty Hmotnostní podíl v %
Al	hliník	0,30
B	bor	0,0008
Bi	bismut	0,10
Co	kobalt	0,30
Cr	chrom	0,30
Cu	měď	0,40
La	lantanidy (každý)	0,10
Mn	mangan	1,65 <sup>a)</sup>
Mo	molybden	0,08
Nb	niob	0,06
Ni	nikl	0,30
Pb	olovo	0,40
Se	selen	0,10
Si	křemík	0,60
Te	telur	0,10
Ti	titan	0,05
V	vanad	0,10
W	wolfram	0,30
Zr	zirkon	0,05
Jiné prvky (mimo: uhlík, fosfor, síra, dusík), (každý)		0,10

<sup>a)</sup> Pokud je pro obsah manganu uvedena pouze nejvyšší hodnota, platí jako mezní obsah 1,80 % a pravidlo 70 % (viz 3.1.2) neplatí.

## ArmoX 500T

### General Product Description

High hardness armor with extraordinary toughness properties.

ArmoX® 500T is the world's toughest protection plate, having nominal 500 HBW hardness, for use in vehicles, buildings and many more applications.

Benefits of ArmoX® 500T include:

- Market-leading steel protection
- Superior workshop properties
- Optimized solutions
- Perfect hardness/toughness balance, for combined penetration and blast protection
- Expertise in ballistic protection from SSAB

It offers vehicle designers new ways to increase protection using lighter weight designs.

ArmoX® 500T is not intended for further heat treatment.

### Dimension range

ArmoX® 500T is available in thicknesses between 3.0 and 80.0 mm. Other dimensions to be agreed with SSAB.

### Mechanical Properties

Thickness (mm)	Hardness (HBW)	Charpy-V <sup>1)</sup> , 10x10 mm test specimen <sup>2)</sup> Min.	Yield Strength R <sub>p0.2</sub> (min MPa)	Tensile Strength R <sub>m</sub> (MPa)	Elongation A <sub>5</sub> (min %)	Elongation A <sub>50</sub> (min %)
3.0 - 80.0	480 - 540	32 J / -40 <sup>0</sup> C	1250	1450 - 1750	8	10

<sup>1)</sup> Average of three tests. Transverse to rolling direction. Single value min. 70% of specified average.

<sup>2)</sup> For plate thicknesses under 12 mm sub-size Charpy-V specimen are used. The specified minimum value is then proportional to the specimen cross-section.

### Mechanical Testing

Brinell hardness test according to EN ISO 6506-1 on each heat treatment individual.

Charpy impact test according to EN ISO 148 on each heat and thicknesses from 6 mm.

Tensile test according to EN ISO 6892 on each heat and thicknesses under 19.9 mm.

### Ultrasonic testing

According to EN ISO 10 160 Class E<sub>3</sub>S<sub>3</sub>.

### Chemical Composition (ladle analysis)

C <sup>1)</sup> (max %)	Si <sup>1)</sup> (max %)	Mn <sup>1)</sup> (max %)	P (max %)	S (max %)	Cr <sup>1)</sup> (max %)	Ni <sup>1)</sup> (max %)	Mo <sup>1)</sup> (max %)	B <sup>1)</sup> (max %)
0.32	0.4	1.2	0.010	0.003	1.0	1.8	0.7	0.005

The steel is grain-refined. <sup>1)</sup> Intentional alloying elements.

<sup>1)</sup> For plate thicknesses >70 mm Cr ≤ 1.5 and Ni ≤ 3.5

### Tolerances

More details are given in SSAB's brochure ArmoX® Guarantees or on [www.ssab.com](http://www.ssab.com).

**Thickness**

Thickness (mm)	Tolerances (mm)
3.0 - 12.9	- 0.0 / + 0.6
13.0 - 20.0	- 0.0 / + 0.8
20.1 - 39.9	- 0.0 / + 1.0
40.0 - 59.9	- 0.0 / + 1.4
60.0 - 80.0	- 0.0 / + 1.6

**Length and Width**

According to SSAB's dimension program.

- Tolerances conform to EN 10029 or to SSAB's standard after agreement.
- Dimensional tolerances for plate with mill edge according to special agreement.
- ≤ 45.0 mm mill edge as standard.

**Shape**

Tolerances according to EN 10 029.

**Flatness**

Tolerances according to ArmoX® flatness guarantees, which are more restrictive than EN 10 029 Class N (steel type L).

**Surface Properties**

According to EN 10163 Class B Subclass 3.

**Delivery Conditions**

The delivery condition is QT (Quenched and Tempered). Delivery requirements can be found in SSAB's brochure ArmoX® Guarantees or [www.ssab.com](http://www.ssab.com).

**Fabrication and Other Recommendations****Welding, bending and machining**

For information concerning welding and fabrication, see SSAB's brochures on [www.arroxplate.com](http://www.arroxplate.com) or consult Tech Support, [techsupport@ssab.com](mailto:techsupport@ssab.com).

ArmoX® 500T is not intended for further heat treatment. If ArmoX® 500T is heated above 190 °C after delivery from SSAB no guarantees for the properties of the steel are given.

Nitriding or surface coating may be carried out if the temperature is below 190 °C.

Appropriate health and safety precautions must be taken when welding, cutting, grinding or otherwise working on the product. Grinding, especially of primer coated plates, may produce dust with high particle concentration.

**Contact Information**

[www.ssab.com/contact](http://www.ssab.com/contact)

Inspection EN 10 204 - 3.1		A02 Issuing department Quality inspection		A05 Purchaser order no		A07		A08 Certificate no and date 13362190 2011-05-12		A03	
A06 Consignee SSAB Swedish Steel Spol. S R O Spartakovcu 3 708 15 Ostrava - Poruba Czech Republic		Product ARMOUR STEEL		B01 Marking (Stamping) Steel grade, Trade mark, PLATE ID NO		B06 Standard/rules Steel grade		OX		B02	
Dimensions [mm] T 6 W 2400		B09-B1 Weight [kg] L 6000		B12 PLATE ID NO 082928-863685		B07 Deliv. Cond. Q		B04 Internal code 10757		B16	
Purchaser SSAB Swedish Steel Spol. S R O Spartakovcu 3 708 15		All Customer marks 4128		C71-C92 Carbon equivalent etc		C93-C99				B15	
Chemical composition											
Heat no 082928											
C .26 Si .24 Mn .84 P .008 S .001 Cr .45 Ni .89 Mo .340 Al .052 B .002											
Testtype		C00 Millcode		C01 Specimen position		C02 Direction		C05 Treatment		C10 Specimen type	
816807 Top end						Transvers		Delivery condition		Rectangular	
Tensile test		C04		C03 Temp [degr]		C03 Test results		C11 C12 C13		C13 C13	
						Rp0.2 [MPa] 1470		Rm [MPa] 1611		A50 [%] 12	
Impact test		816807 Top end		Transvers		Delivery condition		C42 C42		C43 C43	
						Charpy-V 5x10		E E		Ave Ave	
Hardness test (HBW)		836786 Top end		Delivery condition		C32 Ave		[J] 26 [J] 23		[J] 25	
Customer article no: 4128											

		It is hereby certified that the material described above complies with the requirements of the order.		Z01		This certificate is produced with EDP and valid without signature Quality Inspection Department/ I Ivarsson /H Brinting		Z02			
--	--	---	--	-----	--	--	--	-----	--	--	--



## Strenx<sup>®</sup> 650MC D/E

### General Product Description

The high-strength structural steel at 650 MPa

Strenx<sup>®</sup> 650MC D/E is a hot-rolled structural steel made for cold forming, with a minimum yield strength of 650 MPa for stronger and lighter structures.

Strenx<sup>®</sup> 650MC D/E meets or exceeds the requirements of S650MC in EN 10149-2.

Typical applications include a wide range of components and parts, such as demanding load-bearing structures. Strenx<sup>®</sup> 650MC D/E comes in coils, slit coils or cut-to-length sheets.

### Dimension Range

Strenx<sup>®</sup> 650MC D/E is available in thicknesses of 2.00-10.00 mm and widths up to 1600 mm as coils, slit coils or cut to length sheets in lengths up to 16 meters.

### Mechanical Properties

Thickness (mm)	Yield strength R <sub>eH</sub> <sup>1)2)</sup> (min MPa)	Tensile strength R <sub>m</sub> (MPa)	Elongation A <sub>80</sub> <sup>3)</sup> (min %)	Elongation A <sub>5</sub> (min %)	Min. inner bending radius for a 90 ° bend <sup>5)</sup>
2 - 3	650	700 - 850	12	14 <sup>4)</sup>	0.8 x t
3.01 - 6	650	700 - 850		14	1.2 x t
6.01 - 10	650	700 - 850		14	1.5 x t

The mechanical properties are tested in the longitudinal direction.

<sup>1)</sup> If R<sub>eH</sub> is not applicable then Rp 0.2 is used.

<sup>2)</sup> On thicknesses >8 mm the minimum yield strength may be 20MPa lower.

<sup>3)</sup> A<sub>80</sub> value applies for thicknesses < 3.00 mm.

<sup>4)</sup> A<sub>5</sub> value applies for sheet thickness t ≥ 3mm.

<sup>5)</sup> For both longitudinal and transverse direction.

### Impact Properties

Grade	Min. impact energy for longitudinal testing, Charpy V 10x10 mm test specimens
Strenx <sup>®</sup> 650MC D	40 J/ -20°C
Strenx <sup>®</sup> 650MC E	27 J/ -40°C

Impact testing according to EN ISO 148-1 is performed on thicknesses ≥ 6mm. The specified minimum value corresponds to a full-size specimen.

### Chemical Composition (ladle analysis)

C (max %)	Si <sup>1)</sup> (max %)	Mn (max %)	P (max %)	S (max %)	Al <sub>tot</sub> (min %)	Nb <sup>2)</sup> (max %)	V <sup>2)</sup> (max %)	Ti <sup>2)</sup> (max %)
0.12	0.21	2.00	0.025	0.010	0.015	0.09	0.20	0.15

<sup>1)</sup> If the material is to be hot-dip galvanized according to category A or category B in EN 10149-2 this must be specified at the time of order. Other galvanizing classes with higher Si-content are available after agreement.

<sup>2)</sup> Sum of Nb, V and Ti = max 0.22%

The steel is grain refined.

### Carbon equivalent CET(CEV)

Thickness (mm)	2.00 - 10.00
Typ CET(CEV)	0.22 (0.34)

$$CET = C + \frac{Mn + Mo}{10} + \frac{Cr + Cu}{20} + \frac{Ni}{40}$$

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15}$$

### Tolerances

More details are given on [www.ssab.com](http://www.ssab.com).

### Thickness

Tolerances according to Strenx® Thickness Guarantees. Strenx® Guarantees offer considerably narrower thickness tolerances compared to EN 10 051.

### Length and Width

Width and length tolerances according to SSAB standard. The SSAB standard offer narrower width and length tolerances compared to EN 10 051. Length tolerances only apply for cut to length sheets.

### Shape

Tolerances according to EN 10 051. Narrower tolerances according to the SSAB standard are available on request.

### Flatness

Tolerances according to Strenx® flatness guarantees Class A. Strenx® flatness guarantees offer narrower tolerances compared to EN 10 051. Flatness guarantees only apply for cut to length sheets.

### Surface Properties

According to EN 10 163-2 Class A, Subclass 3.

### Delivery Conditions

Thermomechanically Rolled. Strenx® 650MC D/E is available in as rolled or pickled surface condition with mill or cut edge.

### Fabrication and Other Recommendations

#### Welding, bending and machining

Strenx® 650MC D/E has good welding, cold forming and cutting performance.

Strenx® 650MC D/E is a cold forming steel not suited for heat treatments at temperatures above 580°C since the material then may lose its guaranteed properties.

For information concerning fabrication, see SSAB's brochures on [www.ssab.com](http://www.ssab.com) or consult our Tech Support, [techsupport@ssab.com](mailto:techsupport@ssab.com). Appropriate health and safety precautions must be taken when bending, welding, cutting, grinding or otherwise working on the product.

### Contact Information

[www.ssab.com/contact](http://www.ssab.com/contact)

Steel | Heavy Plate

# XAR® 400 and XAR® 450

Wear-resistant special structural steels –  
Now also available as cut-to-length sheets



March 2020, Version 3

XAR® 400 and XAR® 450 are proven wear-resistant special structural steels used in all sorts of applications, which combine wear resistance with good workability. The guaranteed hardness is very special and documented in the certificate. Now you can combine all this with the advantages of cut-to-length sheets.

## Advantages

- ➔ Proven wear resistance
- ➔ Highest surface quality
- ➔ Very good coating properties
- ➔ Applicable for laser cutting
- ➔ Good flatness
- ➔ Close thickness tolerances

## Typical mechanical properties

Grades	Hardness Brinell [HBW]	Yield strength typical [MPa]	Tensile strength typical [MPa]	Elongation typical [%]	Impact energy CVN [J] min CVN [J] typ. at -20 °C at -40 °C	
XAR® 400	370 – 430	1,000	1,250	10	27	45
XAR® 450	420 – 480	1,200	1,400	10	27	40

Tensile test: transverse specimens; Impact energy: Longitudinal specimens

## Dimensions

Grades	Thickness [mm]	Width [mm]	Length [mm]
XAR® 400	4.00 – < 5.00	1,000 – 1,300	2,000 – 16,000
	5.00 – 8.00	1,000 – 1,500	2,000 – 16,000
XAR® 450	4.00 – < 4.80	1,000 – 1,300	2,000 – 16,000
	4.80 – 8.00	1,000 – 1,500 <sup>1)</sup>	2,000 – 16,000

Further dimensions in development. <sup>1)</sup> Available in 6 mm thickness also up to 1,600 mm wide.

## Applications

- ➔ Tipper bodies
- ➔ Parts of further utility vehicles such as cement mixer and garbage trucks
- ➔ Parts of handling equipment
- ➔ Parts of crushing equipment

Further information can be found in our product information.

thyssenkrupp Steel Europe AG, Business Unit Heavy Plate  
Kaiser-Wilhelm-Straße 100, 47166 Duisburg, Germany  
Postal address: 47161 Duisburg, T: +49 (0)203 52-0, F: +49 (0)203 52-25102  
www.thyssenkrupp-steel.com/heavyplate, info.plate@thyssenkrupp.com

General information: All statements as to the properties or utilization of the materials and products mentioned in this brochure are for the purpose of description only. Guarantees in respect of the existence of certain properties or utilization of the material mentioned are only valid if agreed in writing. Subject to technical changes without notice. Reprints, even extracts, only with the permission of thyssenkrupp Steel Europe AG, Business Unit Heavy Plate.

**engineering.tomorrow.together.**



Werks-Nr. Works-No. No de l'usine	<b>A08</b> <b>3896213</b>	Zeugnis-Nr. Certificate-No. No de certificat	<b>A03</b> <b>1673677001</b>	Sendungs-Nr. Shipment-No. No de envoi	<b>44976382</b>	Seite-Nr. Page-No. Page-No	<b>1</b>																																																																				
ThyssenKrupp Steel Europe AG · 47161 Duisburg <b>A01</b>				BESCHEINIGUNG ÜBER MATERIALPRÜFUNGEN DOCUMENT ON MATERIAL TESTS DOCUMENT DE CONTROL DES MATERIAUX		EN 10204 EN 10204 EN 10204																																																																					
<b>A06</b>  UNIONOCEL, S.R.O.  BAVORSKA 2780/2 CZ 155 00 PRAHA 5 - STODULKY				<b>A02</b> ABNAHMEPRUEFZEUGNIS 3.1 INSPECTION CERTIFICATE 3.1																																																																							
Bestell-Nr. Order-No. No de commande	O14-07203			13.4.2015	51																																																																						
<b>A07.1-A07.5</b>				0203 52 75220 0203 52 75213 abnahme_zeugnisse.grobblech@thyssenkrupp.com	<b>A05</b>																																																																						
Werkstoff ; Quality ; Matériau / Lieferbedingungen ; Specification ; Conditions de livraison <b>B02/B03</b> XAR450 TKS-WBL 710 06.14 TOL.EN10029 KL.B/N OB EN 10163 KL.B/3																																																																											
Kennzeichnung: WERKSTOFF; SCHMELZ-NR.; FERTIGUNGS-/PROBE-NR. Marking: MATERIAL, HEAT-NO., MANUFACTURING/SAMPLE-NO. Marque: <b>B06</b>				Zeichen des Lieferwerkes: Supplier's mark: Marque d'usine: <b>A04</b>																																																																							
<p><b>B01</b> <b>ERZEUGNISFORM</b> <b>TYPE OF PRODUCT</b></p> <p>GROBBLECH, BESAEUMTE KANTEN, GESTRAHLT/GEPRIMERT, BEIDSEITIG HEAVY PLATES, TRIMMED EDGES, SHOT BLASTED/COATED, BOTH SIDES</p> <p><b>LISTE DER MATERIALIDENTEN</b> <b>LIST OF MATERIAL IDENTIS</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>POS.</th> <th>PAKET</th> <th>BLECH-NR.</th> <th>SCHMELZ-NR.</th> <th>STUECK ZAHL</th> <th>GEWICHT GEWOG.</th> </tr> <tr> <th>ITEM</th> <th>BUNDLE</th> <th>PLATE-NO.</th> <th>HEAT-NO.</th> <th>NUMBER PIECES</th> <th>WEIGHT</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td><b>B09 x</b></td> <td><b>B10 x</b></td> <td><b>B11</b></td> <td></td> <td>Kg</td> </tr> <tr> <td>002</td> <td>50,0 x</td> <td>2000,0 x</td> <td>6000 [mm]</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>57238102</td> <td>634266</td> <td>1</td> <td>4.714</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>57240102</td> <td>634266</td> <td>1</td> <td>4.714</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>*</td> <td>2 9.428</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td>**</td> <td>2 9.428</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>TRANSPORT-NR.</b> <b>TRANSPORT-NO.</b> 318048622100</p> <p><b>CHEMISCHE ZUSAMMENSETZUNG DER SCHMELZE IN %</b> <b>CHEMICAL COMPOSITION OF THE LADLE SAMPLES %</b> <b>C71-C99</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>SCHMELZ-NR</th> <th>C</th> <th>SI</th> <th>MN</th> <th>P</th> <th>S</th> <th>AL-G</th> <th>B-G</th> <th>CR</th> <th>MO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>634266</td> <td>,210</td> <td>,340</td> <td>1,300</td> <td>,012</td> <td>,0020</td> <td>,087</td> <td>,0029</td> <td>,960</td> <td>,210</td> </tr> </tbody> </table> <p><b>C70</b> SCHMELZVERFAHREN OXYGENSTAHL <b>C70</b> HEAT PROCESS OXYGEN STEEL</p>								POS.	PAKET	BLECH-NR.	SCHMELZ-NR.	STUECK ZAHL	GEWICHT GEWOG.	ITEM	BUNDLE	PLATE-NO.	HEAT-NO.	NUMBER PIECES	WEIGHT		<b>B09 x</b>	<b>B10 x</b>	<b>B11</b>		Kg	002	50,0 x	2000,0 x	6000 [mm]					57238102	634266	1	4.714			57240102	634266	1	4.714					*	2 9.428					**	2 9.428	SCHMELZ-NR	C	SI	MN	P	S	AL-G	B-G	CR	MO	634266	,210	,340	1,300	,012	,0020	,087	,0029	,960	,210
POS.	PAKET	BLECH-NR.	SCHMELZ-NR.	STUECK ZAHL	GEWICHT GEWOG.																																																																						
ITEM	BUNDLE	PLATE-NO.	HEAT-NO.	NUMBER PIECES	WEIGHT																																																																						
	<b>B09 x</b>	<b>B10 x</b>	<b>B11</b>		Kg																																																																						
002	50,0 x	2000,0 x	6000 [mm]																																																																								
		57238102	634266	1	4.714																																																																						
		57240102	634266	1	4.714																																																																						
				*	2 9.428																																																																						
				**	2 9.428																																																																						
SCHMELZ-NR	C	SI	MN	P	S	AL-G	B-G	CR	MO																																																																		
634266	,210	,340	1,300	,012	,0020	,087	,0029	,960	,210																																																																		

Werks-Nr. Works-No. No de l'usine	<b>A08</b> <b>3896213</b>	Zeugnis-Nr. Certificate-No. No de certificat	<b>A03</b> <b>1673677001</b>	Sendungs-Nr. Shipment-No. No de envoi	<b>44976382</b>	Seite-Nr. Page-No. Page-No	<b>2</b>
---	------------------------------	--	---------------------------------	---	-----------------	----------------------------------	----------

	<p><b>B07</b> SCHMELZ-NR      MITTELWERT DER SCHMELZE HEAT NO.        AVERAGE OF HEAT 634266            454 HB</p> <p><b>L I E F E R Z U S T A N D   P R O D U K T</b> <b>S T A T U S   P R O D U C T</b></p> <p>002    GEHAERTET          HARDENED</p> <p><b>Z02</b> ABNAHMEBEAUFTRAGTER DES HERSTELLERS THE MANUFACTURER'S AUTHORIZED INSPECTION REPRESENTATIVE LE REPRÉSENTANT AUTORISÉ DU CONTRÔLEUR DU PRODUCTEUR</p> <p style="text-align: center;"><i>Kern</i></p> <p><b>Z03</b>    Prof. Dr.-Ing. Kern</p>
--	--

**ThyssenKrupp Steel Europe AG**

Abnahme

Es wird bestätigt, dass die Lieferung den Vereinbarungen bei der Bestellung entspricht.

We hereby certify, that the above mentioned materials have been delivered in accordance with the terms of order.

**Z01** Nous attestons que les produits livrés sont conformes aux stipulations de la commande.

