



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

POSOUZENÍ VLASTNOSTÍ HETEROGENNÍCH TUPÝCH SVARŮ METODAMI SVAŘOVÁNÍ LASEREM A SVAZKEM ELEKTRONŮ

ASSESSMENT OF HETEROGENOUS PROPERTIES BUTT WELDS IN LASER
WELDING AND ELECTRON BEAM WELDING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. OLDŘICH ROZSYPAL

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Oldřich Rozsypal

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

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

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

Posouzení vlastností heterogenních tupých svarů metodami svařování laserem a svazkem elektronů

v anglickém jazyce:

Assessment of heterogeneous properties butt welds in laser welding and electron beam welding

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Technická praxe začíná vyžadovat svařování materiálů s odlišnými mechanickými vlastnostmi. Vhodné svary mohou nabídnout vysokoenergetické metody jako je svařování laserem a svařování elektronovým svazkem. Předmětem práce je pořízení svarů pomocí obou zmíněných metod, vyhodnocení svarů z hlediska makro a mikrostruktury a mechanických vlastností. Pro svařování byla vybrány vysoko pevnostní ocel DOMEX 420 a ocel pro hluboký tah DC01.

Cíle diplomové práce:

Seznámení se z technologií laserového svařování a svařování svazkem elektronů. Seznámení se s metodami mechanickými a metalografickými metodami vyhodnocování vzniklých svarů.

Seznam odborné literatury:

1. ION, C. J.: Laser processing of engineering materials. Elsevier, 2005.
2. Němeček a kol.: Využití laseru v průmyslu, Tribun EU, ISBN 978-80-263-0359-6.
3. BENKO, B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.l: Laserové technológie, 1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9.
4. DULEY, W.W.: Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4.
5. MELEKA, A. H. Electron-beam Welding: Principles and Practise. London: McGRAW-HILL, 1971. ISBN 07-094218-8.
6. SCHULTZ, H. Electron Beam Welding. Cambridge: Abington Publishing, 1994.

Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 18.11.2014

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Projekt vypracovaný v rámci inženýrského studia oboru Strojírenská technologie se zabývá svařováním dvou různých materiálů. Svary se provedou na vysoko pevnostní oceli Domex 420 MC a hlubokotažné oceli DC01 metodou svařování laserem a budou porovnány s metodou svařování elektronovým svazkem.

Součástí práce je literární rešerše popisující základní fyzikální princip obou metod, jednotlivé typy laserů, vlastnosti svařovaného materiálu a kontrolu svarových spojů. V experimentální části byla provedena zkouška tahem, makroskopická a mikroskopická zkouška. Závěrem práce je vyhodnocení jednotlivých zkoušek.

Klíčová slova

laserové svařování, svařování svazkem elektronů, vysoko pevnostní ocel, Domex 420 MC, DC01, zkouška tahem, mikrostruktura, makrostruktura

ABSTRACT

The project was developed within the engineering degree in engineering technology, and is focused in welding together of two different materials. Welds will be done on a high strength steel Domex 420 MC and deep drawing steel DC01 using laser welding, and will be compared with the method of electron beam welding.

Part of this project is a scientific research describing the basic physical principles of both methods, different types of lasers, welding material properties and inspection of welds. In the experimental part was carried tensile test, macroscopic and microscopic examination. Finally, work is to evaluate the individual tests.

Key words

laser welding, electron beam welding, high strenght steel, Domex 420 MC, DC01, tensile test, microstructure, macrostructure

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ROZSYPAL, O. *Posouzení vlastností heterogenních tupých svarů metodami svařování laserem a svazkem elektronů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Obor technologie svařování a povrchových úprav. 2015. 81 s. Vedoucí diplomové práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce a pod vedením vedoucího diplomové práce

V Brně dne 28.5.2015

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky. Dále bych rád poděkoval panu Ing. Janu Kouřilovi za provedení svarů metodou svařování elektronovým svazkem a také panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D. za provedení mechanických zkoušek.

OBSAH

Abstrakt

Prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	11
1 Historie svařování	12
1.1 Historie laseru	13
1.2 Historie elektronového svazku	13
2 Laser	14
2.1 Fyzikální podstata laseru	14
2.2 Rozdělení laserů	15
2.2.1 Plynové lasery	16
2.2.2 Pevnolátkové lasery	17
2.3 Využití laseru	19
2.3.1 Laserové řezání	19
2.3.2 Laserové kalení	20
2.3.3 Laserové obrábění	21
2.4 Laserové svařování	22
2.4.1 Svařování s přídavným materiálem a bez přídavného materiálu	22
2.4.2 Hloubkové (penetrační) svařování	23
2.4.3 Kondukční svařování.....	24
2.4.4 Hybridní svařování.....	24
3 Elektronový svazek	25
3.1 Fyzikální podstata elektronového svazku	25
3.2 Využití elektronového svazku	26
3.2.1 Obrábění svazkem elektronů	26
3.2.2 Vrtání děr svazkem elektronů	27
3.2.3 Texturování a gravírování svazkem elektronů	27
3.2.4 Tepelné zpracování povrchové vrstvy	28
3.2.5 Svařování svazkem elektronů	29
3.3 Příprava svarových ploch	32
3.4 Svařitelnost materiálů elektronovým svazkem	32
3.4.1 Svařitelnost ocelí	33
3.4.2 Měď a její slitiny	33
3.4.3 Titan a jeho slitiny	34
3.4.4 Hliník a jeho slitiny	34

3.4.5 Svařitelnost ostatních materiálů elektronovým svazkem	35
4 Oceli s vyšší pevností	36
4.1 Rozdělení ocelí s vyšší pevností	36
4.2 Trendy vývoje ocelí s vyšší pevností.....	37
4.3 Svařitelnost ocelí s vyšší pevností	38
5 Zkoušky svarových spojů	39
5.1 Nedestruktivní zkoušky	39
5.2 Destruktivní zkoušky	41
6 Praktická část.....	42
6.1 Návrh experimentu	42
6.2 Vlastnosti oceli DOMEX 420 MC	42
6.2.1 Uhlíkový ekvivalent	43
6.3 Vlastnosti oceli DC01	43
6.3.1 Uhlíkový ekvivalent	43
6.4 Metodika zkoušení.....	44
6.5 Použitá zařízení	44
6.5.1 Laser YLS 2000	45
6.5.2 Průmyslový robot IRB 2400-10	46
6.5.3 Svařovací zařízení Pro Beam.....	46
6.5.4 Zkušební stroj ZD 40	47
6.5.5 Tvrdoměr Zwick 3212	47
6.5.6 Metalografický lis	48
6.5.7 Brousící zařízení Tegramin	48
6.6 Postup svařování laserem	48
6.7 Postup svařování elektronovým svazkem	49
6.8 Příprava vzorků	50
6.9 Příčná tahová zkouška	51
6.9.1 Metoda svařování laserem.....	52
6.9.2 Metoda svařování elektronovým svazkem.....	55
6.9.3 Zhodnocení příčné zkoušky tahem.....	57
6.10 Makroskopické zkoušky	58
6.10.1 Makrostruktury pro metodu svařování laserem	58
6.10.2 Makrostruktury pro metodu svařování svazkem elektronů.....	59
6.11 Mikroskopické zkoušky.....	60
6.11.1 Mikrostruktura pro metodu svařování laserem.....	60
6.11.2 Mikrostruktura pro metodu svařování elektronovým svazkem.....	63
6.12 Zkouška tvrdosti	65

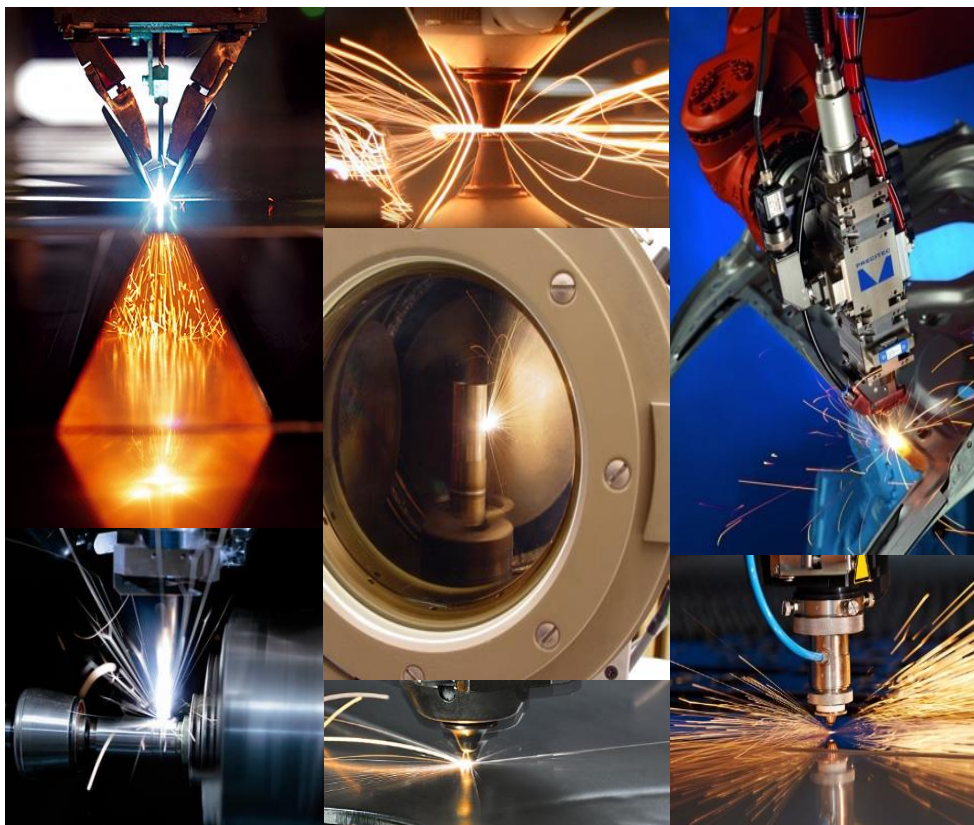
6.13 Technickoeekonomické zhodnocení	65
ZÁVĚRY	68
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam příloh	

ÚVOD

Vysokoenergetické metody svařování, mezi které mj. patří i svařování laserem nebo svazkem elektronů, byly vyvinuty zejména z důvodu potřeby svařování ušlechtilých materiálů a lze jimi svařovat i materiály s odlišnými vlastnostmi, což tvoří jednu z mnoha výhod těchto metod. Kromě vysoké přesnosti, rychlosti a minimální deformaci okolního materiálu při svařování patří mezi jejich pozitiva i dobrá možnost automatizace anebo využití při tepelném zpracování či dělení materiálů.

Diplomová práce se zabývá experimentem, jehož cílem je porovnat svary provedené laserovým svařováním a svařováním elektronovým svazkem. Svařovat se budou dva ocelové plechy tloušťky 3 mm s odlišnými vlastnostmi. Bude se jednat o vysoko pevnostní ocel DOMEX 420 MC a hlubokotažnou ocel DC01. Experiment proběhne ve spolupráci s Ústavem přístrojové techniky v Brně a výzkumným a vývojovým centrem NETME. Každou metodou se svaří tři vzorky s odlišnými svařovacími parametry. V NETME dojde ke svaření elektronovým svazkem a na ÚPT k svaření laserem a následnému nařezání všech vzorků do požadované geometrie.

Provedou se destruktivní zkoušky k zjištění mechanických vlastností svarů. Bude se jednat o příčnou zkoušku tahem a vyhodnocení mikrostruktury a makrostruktury svarů. V závěru diplomové práce se různé metody svařování porovnají a vyhodnotí vhodnost použití svařování laserem nebo elektronovým svazkem.



Obr. 1 Laser a elektronový svazek [8], [43], [44], [45]

1 HISTORIE SVAŘOVÁNÍ [1], [2]

Za počátek svařování je považováno kovářské svařování, které je datováno 4000 let př. n. l. Novodobé svařování, se kterým se lze potkat v současnosti, se začalo vyvíjet až koncem 19. století a jednalo se zejména o svařování plamenem nebo elektrickým obloukem. Obě metody se začaly vyvíjet především v dobách první a druhé světové války.

Svařování elektrickým obloukem se provádělo kovovými elektrodami až do doby, než na začátku 20. století byly vyvinuty obalované kovové elektrody. První obalovaná elektroda byla obalena jílem resp. vápnem a měla výhodu hlavně ve stabilitě el. oblouku. O několik let později vynalezl Švéd Oscar Kjellberg obalenou elektrodu podobnou té dnešní. Kovové elektrody byly namočené ve směsi oxidů a křemičitanů, které se poté vysušily. Souběžně bylo také vyvinuto svařování:

- bodové
- švové
- výstupkové
- na tupo.

Další druh svařování objevil H. M. Hobard a P. K. Devers v roce 1926 a jednalo se o svařování v ochranné atmosféře argonu a helia. Svařování v ochranné atmosféře se využívalo k svařování hořčikovými a hliníkovými slitinami a nerezové oceli. K významnému objevu došlo v roce 1953, kdy byla představena metoda svařování ocelovými elektrodami v ochranné atmosféře CO₂. Metoda se rychle rozšířila, protože se jednalo o výhodný kompromis mezi kvalitou a ekonomikou. V druhé polovině 20. století byly vyvinuty speciální metody svařování využívající plazmu, laser a elektronový svazek.

Technologie svařování lze podle statistických údajů zařadit mezi nejrozšířenější ve strojírenské výrobě. Svařování má 6-8% podíl na celkové pracnosti strojírenské výroby a je jednou z nejdůležitějších technologií. Význam svařování na celkové výrobě stále roste, což je způsobeno především využíváním nových technologií, které minimalizují:

- množství tepla vneseného svařováním do svarového spoje
- deformaci svařenců po svařování
- změny vlastností svařovaných materiálů
- množství svarového kovu.

Uvedené výhody jsou ovšem obtížně dosažitelné konvenčními technologiemi svařování.

1.1 Historie laseru [1], [2], [4]

Vývoj laseru byl započat roku 1917 Albertem Einsteinem, který dokázal, že vedle spontánní emise existuje i stimulovaná emise záření. Předchůdcem laseru byl maser. Toto zařízení pracovalo na stejném principu jako laser, ale generovalo mikrovlnné záření. První funkční laser sestrojil až Theodor H. Maiman v roce 1960. Aktivním prostředím laseru byl krystal rubínu. V roce 1964 byl sestaven první CO₂ laser K. Patelamem a dodnes patří CO₂ laser k nejpoužívanějším i přes jeho malou účinnost, která je přibližně 5% až 10%. Od roku 1962 laserová technologie zaznamenala bouřlivý vývoj z důvodu uplatnění ve více oblastech. Lasery se liší vlnovou délkou záření, konstrukcí a především aktivním prostředím. Velký posun v laserové technologii byl zaznamenán v roce 1988, kdy byl sestrojen Nd:YAG laser o výkonu 1kW. Vynaleznutí tohoto typu laseru bylo možné díky objevu optického vlákna, které umožňuje přenášet záření o vlnové délce blízké se infračervenému záření. V roce 1997 firma Trumf uvedla na trh Nd:YAG laser o výkonu 4 kW, který znamenal přímou konkurenci pro CO₂ lasery. Dnes jsou velkou konkurencí CO₂ laserům pevnolátkové a výkonné diodové lasery s možností vedení laserového paprsku od zdroje až na místo užití vláknovým vedením.

1.2 Historie elektronového svazku [20], [21], [27]

Před vznikem elektronového svazku byl nutný objev elektronu anglickým fyzikem J. J. Thomsonem v roce 1897. Thomson svým objevem objasnil podstatu katodových paprsků, o kterou se v této době zajímalo mnoho fyziků. Využití elektronového paprsku v technologiích na sebe nedalo dlouho čekat. Elektrony velkou část své kinetické energie při dopadu na povrch materiálu přeměnili v teplo. Této skutečnosti využil Němec Marcello von Pirani k tavení kovů v roce 1905. Svazek elektronů se také využíval v osciloskopech a mikroskopech. Von Ardenne a Rühl jej použili k vrtání kovů, tavení a odpařování kovů. Dalšímu rozvoji však zabránil nedostatek výkonných vakuových čerpadel.

Historie elektronového svařování začíná až v padesátých letech 20. století. V roce 1952 Karl Heinz Steigerwald sestrojil první zařízení pro využití elektronového svazku. Zařízení umožňovalo materiál natavit a taveninu poté nechat ztuhnout. Odtud byl již malý krůček k svařování elektronovým svazkem, ale využití elektronového svazku k svařování se nepřikládalo význam, protože se považoval jako další možný zdroj tepla tavného svařování stejně jako elektrický oblouk nebo plamen. První skutečné zařízení zkonstruované ke svařování proudem elektronů vzniklo pod vedením J. A. Stohra ve Francii v roce 1957, později v Německu, Velké Británii, Spojených státech a Rusku. Jedna z prvních elektronových svářeček vznikla i v tehdejší Československu v Ústavu přístrojové techniky v Brně. V České republice existuje v dnešní době přibližně 17 zařízení pro svařování elektronovým svazkem.

2 LASER [1], [2]

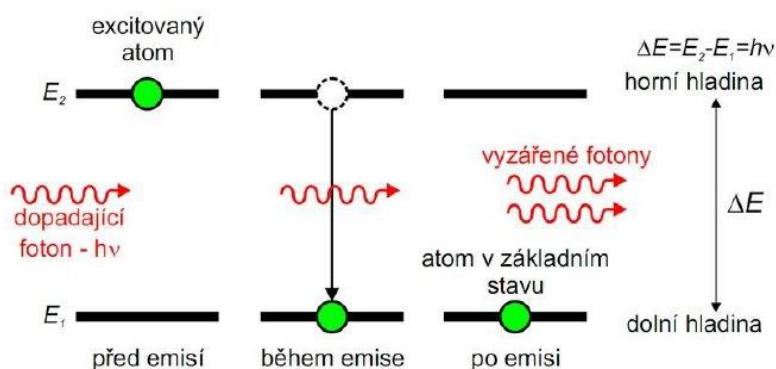
Název LASER je zkratkou anglického názvu „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, což v překladu do českého jazyka znamená zesílení světla stimulovanou emisí záření. Laser využívá principy kvantové mechaniky. Jedná se o unikátní zdroj světla, kdy je jeho paprsek monochromatický a koherentní.

2.1 Fyzikální podstata laseru [1], [2], [4]

Laserový paprsek se liší od běžného světelného záření především vlnovou délkou a na rozdíl od ostatních záření směřuje do jednoho bodu.

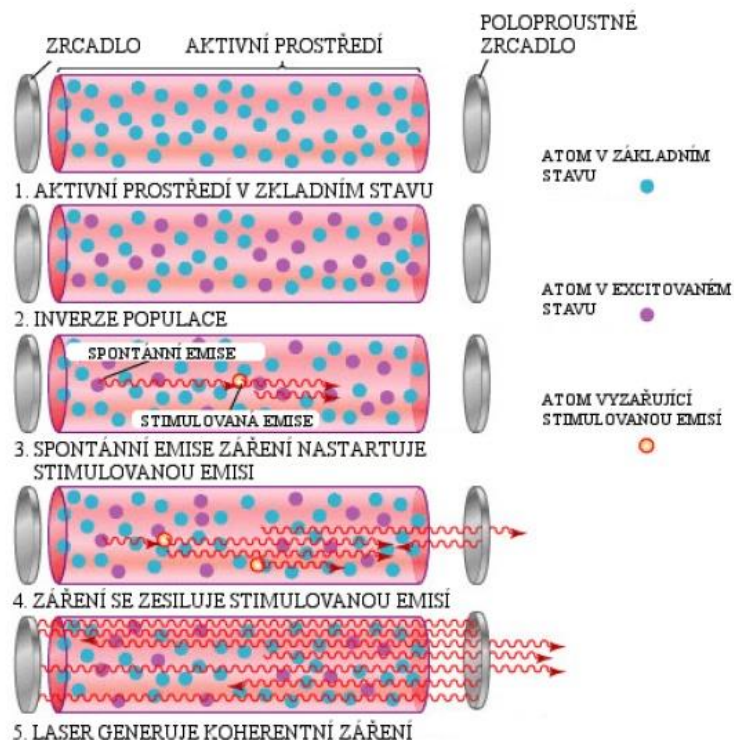
Laser je založen na principu stimulované emise záření. Základem každého laseru je aktivní prostředí, které může být plynné, kapalné, pevnolátkové nebo polovodičové. Úkolem aktivního prostředí je zesilovat jím procházející záření pomocí stimulované emise. V aktivním prostředí dochází k přechodu elektronů ze základní energetické hladiny na vyšší energetickou hladinu, čímž dochází k excitaci atomů. Energie potřebná k excitaci atomů může být chemická, tepelná či elektrická. Elektrony v atomech se na horní energetické hladině neudrží a přecházejí na nižší energetickou hladinu (deexcitace). V okamžiku kdy většina elektronů v atomech je na vyšší energetické hladině můžeme energii dodanou aktivnímu prostředí „čerpáním“ přeměnit pomocí stimulované emise na laserový paprsek. Tento paprsek má určité vlastnosti, mezi které patří vysoká koherence, monochromaticnost a nízká divergence.

Stimulovaná emise je lavinovitým efektem, kdy foton dopadající na excitovaný atom, způsobí přechod tohoto atomu z horní energetické hladiny na nižší energetickou hladinu a zároveň dochází k emisi dalšího fotonu. Viz obr. 2.



Obr. 2 Princip stimulované emise [1]

Podmínkou pro vznik laserového paprsku je zpětná vazba mezi vyzařovanými fotony, která je zajištěna rezonátorem. Tato zpětná vazba se provádí umístěním aktivního prostředí mezi dvě zrcadla, přičemž jedno je polopropustné a druhé odrazné. Polopropustné zrcadlo způsobuje, že část vzniklého světla opustí aktivní prostředí a část je odrazena zpět do aktivního prostředí. Část odrazená zpět do aktivního prostředí stimuluje další emise fotonů a tím zesiluje výstupní záření. Viz obr. 3



Obr. 3 Základní princip laseru [1]

2.2 Rozdělení laserů [1], [3], [4], [5]

Od sestrojení prvního generátoru stimulovaného záření v roce 1954 až do současnosti prodělal laser bouřlivý vývoj. Pokrok přinesl velké množství typů laserů s odlišnými vlastnostmi, které je předurčují k praktickému využití. I když všechny lasery pracují na stejném základním principu, liší se velmi výrazně konstrukcí a vlastnostmi. Pro jejich rozdělení do skupin můžeme zvolit různá kritéria:

- Podle typu aktivního prostředí:

Plynové: atomární: He-Ne, He-Cd, Cu
 iontové: Ar, Kr
 molekulární: CO₂, N₂, H₂
 excimerové: XeBr, KrO, ArO

Kapalinové: na bázi organických barviv: coumarin, fluorescein, cyanin

Pevnolátkové: Nd:YAG, Nd:sklo, Er:YAG, Yb:YAG, Ti:safir, rubínový

Polovodičové: buzené svazkem elektronů nebo elektrickým polem

Plazmatické

- Podle vlnové délky:

Infračervené

Emitující ve viditelném pásmu

Ultrafialové

Rentgenové

- Podle režimu generace:
 - Kontinuální: nepřetržitá generace záření
 - Pulzní: pulzy o vysoké frekvenci
- Podle zúčastněných energetických hladin na kvantovém přechodu:
 - Molekulární: rotační, rotačně-vibrační, vibrační
 - Elektronové
- Podle způsobu, jak čerpají energii:
 - Opticky
 - Elektrickým výbojem
 - Injekcí nosičů náboje
 - Chemicky
 - Elektronovým svazkem
 - Tepelnými změnami
 - Rekombinací

2.2.1 Plynové lasery [1], [6], [8]

Plynové lasery mají velmi široké uplatnění, což je způsobeno velmi širokým rozsahem vlnových délek, a to jak v kontinuálním tak i pulzním režimu. Vlnové délky záření pokrývají velkou oblast spektra od ultrafialové oblasti přes infračervenou až po mikrovlnnou oblast. Jejich aktivním prostředím jsou plyny nebo směsi plynů a par tvořené atomy, ionty nebo molekulami. Jejich excitace je iniciována většinou pomocí elektrického výboje ve zředěném plynu. Optická excitace se již moc nepoužívá. Plynové lasery mají vynikající parametry díky homogennímu prostředí, ale jejich nevýhodou je malý výkon. Mezi nejpoužívanější lasery v průmyslu patří CO₂ laser, který je pomalu nahrazován Nd:YAG laserem.

CO₂ laser

Jedná se o plynový laser, jehož aktivní prostředí je tvořeno molekulami oxidu uhličitého buzeného elektrickým výbojem. Záření generované CO₂ laserem patří do infračervené oblasti a emitované světlo má vlnovou délku 10,6 μm. Tato vlnová délka je považována za nevýhodu z důvodu většího rozměru stopy fokusovaného paprsku. Energetická účinnost se pohybuje od 10 do 15%, což je o třetinu méně než u Nd:YAG laseru. Na rozdíl od laserů s vlnovou délkou okolo 1 μm nelze paprsek CO₂ laseru vést optickým vláknem, ale pouze soustavou zrcadel. Jedná se o velkou nevýhodu CO₂ laseru z důvodu složitosti optické dráhy a nutnosti její kalibrace.

Laserová plynná směs se skládá z helia, které zabezpečuje rozptyl tepla, a také dusíku potřebného k excitaci (buzení).

Využití CO₂ laseru je především pro značení, gravírování, řezání nekovů (plastů, plexiskla, kůže a papíru), kdy nelze použít lasery s nižší vlnovou délkou. Lasery pro tyto účely mají výkony do 1,5 kW. Další využití CO₂ laseru je při řezání a svařování kovů při výkonech laseru do 20 kW. CO₂ lasery mohou být doplněny i různými pomocnými zařízeními Viz. obr. 4.



Obr. 4 CO₂ laser s podavačem od firmy AMADA [2]

2.2.2 Pevnolátkové lasery [1], [2], [4], [5], [6]

Jde o opticky pumpované lasery diodou nebo výbojkou. Pevnolátkové lasery používají jako aktivní prostředí monokrystalické nebo amorfní látky, do kterých se přidávají přísady aktivních prvků. Dříve pevnolátkové lasery využívaly jako aktivní prostředí krystaly drahých kamenů, např. rubínu nebo safíru. Lasery dosahovaly vysokých výkonů, ale pouze v krátkých pulzech z důvodu, že spojitě záření by krystal zničilo. Této nevýhodě se lze vyvarovat v případě laserů založených na sklech s přísadky vzácných prvků (Nd:YAG laser). Aktivní prostředí musí mj. splňovat řadu důležitých požadavků:

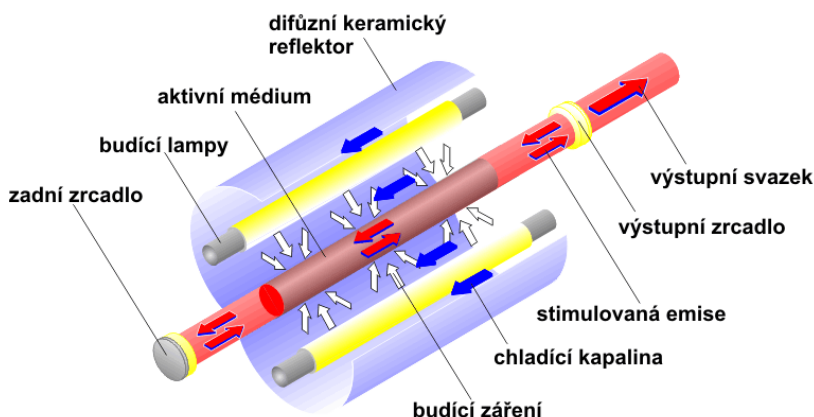
- Aktivní prostředí musí mít široké absorpční pásmo, aby byla pohlcována energie dodaná čerpáním.
- Aktivní prostředí musí být homogenní, tzn. že musí obsahovat co nejmenší množství nežádoucích přísad a defektů, které absorbují nebo rozptylují záření.
- Pravděpodobnost zářivých přechodů musí být dostatečně velká na provozní frekvenci

Nejčastěji používanými aktivátory jsou přechodné kovy (Cr, Ni, Co) a lanthanoidy (Nd, Sm, Gd, Yb, ...). Aktivní látky musí také splňovat technologické požadavky, jako jsou např. fotochemická odolnost, možnost mechanického opracování a leštění.

Nd:YAG laser

Nejpoužívanějším pevnolátkovým laserem je Nd:YAG laser. Laserovým aktivním prostředím je zde izotropní krystal Yttrium Aluminium Granát ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$) dopovaný kationty neodymu (Nd^{3+}) a odtud název laseru Nd:YAG složený z počátečních písmen chemických prvků. Neodym je součástí krystalu z Yt-Al granátu, který je ve tvaru čočky. Tento typ zařízení umožňuje impulzní i kontinuální provoz na rozdíl od rubínového nebo safírového laseru. Emitovaná vlnová délka zařízení je $1,06\text{ }\mu\text{m}$ a má elektrickou účinnost pod 5% při buzení plynovými výbojovými lampami. S menší účinností může Nd:YAG laser emitovat záření i o vlnových délkách $0,94\text{ }\mu\text{m}$, $1,12\text{ }\mu\text{m}$, $1,32\text{ }\mu\text{m}$ a $1,44\text{ }\mu\text{m}$. Obecně buzení (obr. 5) v impulzních laserech je pomocí kryptonových zábleskových lamp, kdežto v kontinuálních vysokovýkonných laserech se využívají obloukové lampy. V dnešní době ovšem převládá buzení pomocí diod. Čerpání pomocí diod je účinnější a dosahuje řádově nižší spotřeby elektrické energie. Starší lampy buzené pevnolátkové lasery jsou méně efektivní a jejich výkonový výstup je v poměru k příkonu přibližně mezi 2 až 30%.

Hojně využívané jsou Nd:YAG lasery s výkonem paprsku méně jak 100 W. Speciální výkonové jednotky umožňují vyrobit vysokovýkonný impulz při nízkém průměrném výkonu. Tyto lasery dosahují špičkového impulzu až 10 kW při průměrném výkonu 500 W. Lasery mohou být využívány na sváření nebo řezání hrubých materiálů. Bodové sváření přesných dílů se provádí na laserech s průměrným výkonem 50 až 100 W, kde impulzní energie je i více jako 5 kW.

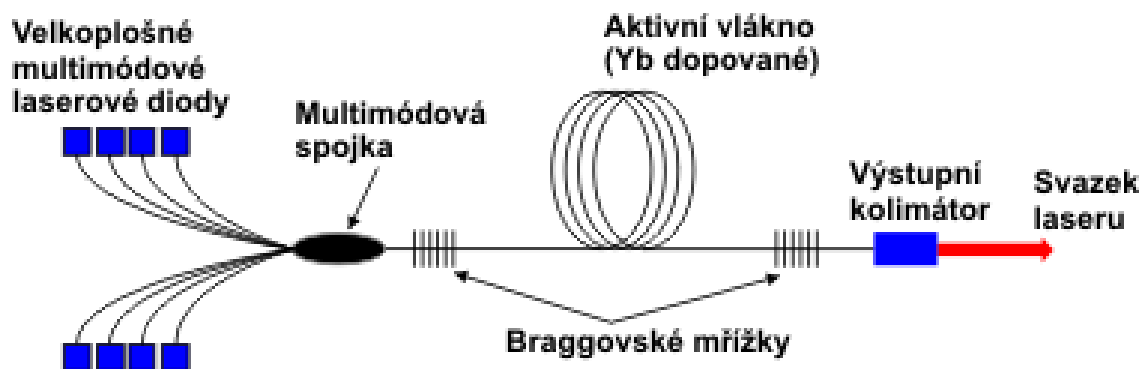


Obr. 5 Princip Nd: YAG laseru [8]

Vláknový laser

Vláknový laser se řadí k technologicky nejmodernějším pevnolátkovým laserům, kde je aktivní prostředí tvořeno dlouhým optickým vláknem, které je dopované ytterbiem (viz. obr. 6). Laser je tvořen tzv. laserovými moduly, které lze spojovat a zvyšovat tak výkon laseru až na 80 kW. Laserový paprsek je buzen pomocí laserových diod přes optickou spojku do aktivního optického vlákna. Namísto zrcadel je k vychylování paprsku využito přímo Braggovy mřížky v optickém vlákně. Záření je z optického vlákna „vyvázáno“ za pomoci optického kolimátoru. Vláknové lasery mohou pracovat v kontinuálním, pulzním nebo kvazipulzním režimu. Oba lasery vláknový i Nd:YAG laser pracují na stejné vlnové délce $1,06\text{ }\mu\text{m}$.

Výhodou vláknového laseru je jeho jednoduchost, robustnost a kompaktnost. Nemusí se nastavovat žádné rezonanční optické části, a proto je laser velmi stabilní, malý a bezúdržbový. Velkou výhodou je vysoká účinnost vláknových laserů, která dosahuje až 35 %. Nespornou výhodou je také vysoká životnost až 150 000 hodin. U běžných YAG laserů je životnost diodového bloku 10 000 až 20 000 hodin, u starších lampou buzených pouze 3 000 až 5 000 hodin. Vláknové lasery dosahují také větší hloubky provaření při vyšší rychlosti svařování než starší Nd: YAG lasery.



Obr. 6 Vláknový laser [8]

2.3 Využití laseru [1], [4]

Laser se využívá v mnoha oborech jako například v medicíně, průmyslu, mikroelektronice, měřicí technice, výpočetní technice a vojenství.

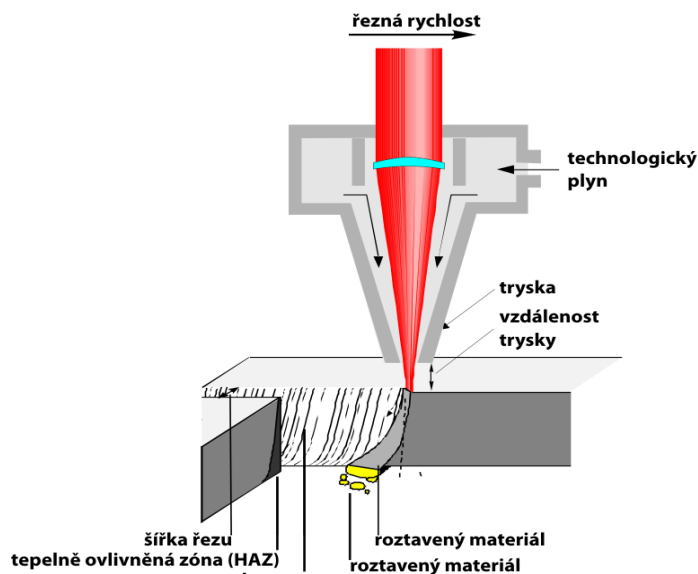
Laser se v průmyslu využívá z důvodu fokusace vystupujícího svazku na velmi malý průměr (10 až 100 μm) o vysoké plošné hustotě. Soustředěním vysoké plošné hustoty na malou plochu dosahujeme malé tepelně ovlivněné oblasti. Díky tomuto jevu můžeme odpařovat povrchové vrstvy materiálu, nebo odpařovat materiál bez narušení jeho vnitřní struktury. Tyto vlastnosti umožňují široké spektrum využití laseru v průmyslu. Mezi hlavní průmyslové aplikace využívající těchto vlastností patří laserové obrábění, vrtání, svařování, řezání, kalení a gravírování. Výhodou laseru je možnost opracování bez kontaktu se součástí, opracování v ochranné atmosféře anebo na těžce přístupných místech. Provoz je čistý, tichý a nevyžaduje žádnou řeznou kapalinu na rozdíl od konvenčních metod obrábění a svařování. Jedním laserem lze vhodnou změnou vstupních veličin, jako jsou geometrie ozařování a volba časových prodlev, provádět většinu tepelných úprav materiálu.

2.3.1 Laserové řezání [1], [2], [4]

Laserové řezání je velmi důležité v oblasti dělení materiálu. Laserovou technologií lze materiály dělit velmi přesně, a to i materiály křehké nebo lehce deformovatelné, protože materiál není silově zatěžován. Přesnost řezu a jeho kvalita je hlavní předností laserových řezacích aplikací. Laserem jde vytvářet velmi komplikované tvary s tolerancí méně jak jedna desetina milimetru. K dělení materiálu se využívají především vysokovýkonné CO_2 lasery a pevnolátkové (vláknové, diodové) lasery, jejichž výkon se liší v závislosti na řezaném materiálu.

Řezání laserem (viz. obr. 7) se může provádět třemi rozdílnými postupy:

- U sublimačního řezání dochází k úběru materiálu odpařováním. Při tomto postupu vyžaduje laserový paprsek a jeho zaostření vysokou energetickou hustotu, která způsobí odpaření materiálu. Vzniklé páry jsou z místa řezu vyfukovány proudem řezného plynu, kterým může být argon, dusík nebo helium. Tyto plyny zajišťují, aby nedocházelo k oxidaci řezu. Při sublimačním postupu řezání nedochází k tavení materiálu a vytváří se hladké řezné plochy.
- Tavné řezání vyžaduje menší energetickou hustotu paprsku než sublimační, protože dochází pouze k natavení materiálu a jeho odstranění z místa řezu zajišťuje inertní plyn, kterým může být argon nebo dusík. Inertní plyn slouží jako ochrana řezu před oxidací a do místa řezu je vháněn pod tlakem 2 až 20 barů.
- Řezání plamenem se používá především k řezání konstrukční oceli. Tento druh dělení laserem se vyznačuje vysokou rychlostí řezání. Do místa řezu se vhání kyslík pod tlakem až 6 barů. Materiál je zahřátý nad zápalnou teplotu a silně reaguje s kyslíkem a uvolňuje velké množství energie, která podporuje laserový paprsek. V porovnání se sublimačním řezáním je zapotřebí jen dvacetina energie.



Obr. 7 Řezání laserem [41]

2.3.2 Laserové kalení [9], [10], [11]

Laserové kalení se v průmyslu využívá téměř deset let a řadí se k procesům povrchového zpracování. Kalení laserem se stává nyní více využívaným tepelným zpracováním z důvodu stále vyvíjející se laserové technologie. Pro kalení se nejvíce využívají CO₂ lasery, Nd:YAG lasery, vláknové lasery a vysoce výkonné diodové lasery (viz obr. 8). Laserem lze kalit povrchy všech konstrukčních ocelí, vysoce legovaných ocelí, šedé litiny, litiny s lamelárním i kuličkovým grafitem. Všechny oceli musí ovšem obsahovat minimálně 0,2 % uhlíku.

Laserový paprsek dopadající na povrch materiálu zahřívá povrch materiálu těsně pod bod tání, což je přibližně 900 až 1400 °C. Poté co je dosažena požadovaná teplota na povrchu, tak se začne paprsek pohybovat a rovnoměrně zahřívá kalený povrch ve směru pohybu. Intenzita laserového paprsku je od 10³ do 10⁴ W/cm² a čas působení od 0,8 do 10 sekund. Rychlost ohřevu se pohybuje i nad 1000 K*s⁻¹. Zvýšením teploty dochází k austenitizaci a tedy ke změně polohy atomu uhlíku. Pohybem laserového paprsku dále po povrchu dochází k ochlazení již ohřátého materiálu díky tepelné vodivosti a tepelné kapacitě okolního tepelně neovlivněného materiálu. Z toho plyne, že při laserovém kalení není zapotřebí chladicího média (voda, olej, atd.). Kvůli rychlému ochlazení se mřížka kovu nemůže vrátit do původního stavu a vznikne martenzit. Martenzit

jako velmi tvrdá kovová struktura způsobí zvýšení tvrdosti materiálu. Při kalení za atmosférických podmínek vzniká malá oxidovaná vrstva, kterou lze odstranit použitím ochranné atmosféry při kalení. Hloubka zakalené vrstvy se pohybuje od 0,1 do 1,5 mm. S rostoucí hloubkou zakalené vrstvy musí růst okolní tepelně neovlivněný objem součástky.

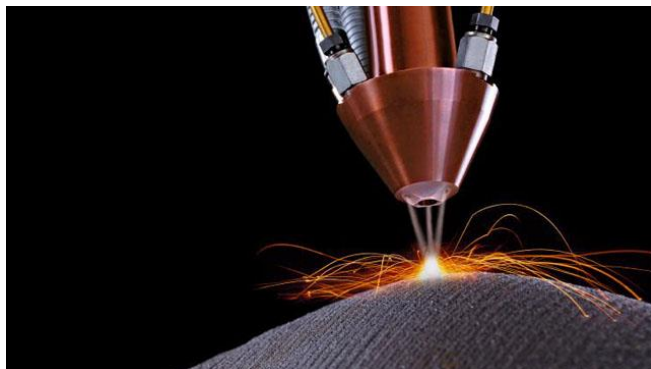
Konvenční kalení plamenem nebo indukcí má malou účinnost a dochází k velkému ohřevu okolních ploch. Roste tím čas potřebný pro austenitizaci, hrubne zrna a na povrchu roste oxidická vrstva. Rovnoměrnost a regulace ohřevu je u obou metod obtížná. U indukčního ohřevu závisí hloubka prokalení na frekvenci. U nižší frekvence dochází k menší hloubce prokalení a naopak. Při kalení je nutné ochlazení, nejčastěji vodní sprchou, kdy dochází ke vzniku páry a vodních polštářků. Je tedy nespornou výhodou laserového kalení, že není zapotřebí vodního media k ochlazování.



Obr. 8 Segment ohýbacího stroje kalený diodovým laserem [9]

2.3.3 Laserové obrábění [12], [13]

Laserové obrábění umožňuje výrobu nejsložitějších tvarů, nejmenších detailů a to téměř do všech materiálů. Metoda laserového obrábění není omezena tvrdostí a houževnatostí materiálu. Lze obrábět ocel, slitiny hliníku, měď, grafit, keramiku, molybden, tantal a mnoho dalších materiálů. Mezi výhody technologie patří především reprodukovatelnost a obrábění bez opotřebení a nákladů na nástroje. Tyto vlastnosti technologie laserového obrábění se uplatňují v různých odvětvích při výrobě např.: elektrotechniky, lékařské techniky, gravírování mincí a razidel.



Obr. 9 Laserové obrábění [40]

Technologie funguje na principu postupného odebrání materiálu pomocí laserového paprsku. Regulace tloušťky odebíraného materiálu se provádí měřicí sondou a CCD kamerou. Laserové obrábění probíhá po horizontálních vrstvách a síla odebraného materiálu se odvíjí od výkonu laseru a vlastností obráběného materiálu. Hloubka obrobené vrstvy může dosahovat až do 3 mm. Přesnost a preciznost obrábění je zajištěna CNC řízením a až šesti strojovými osami.

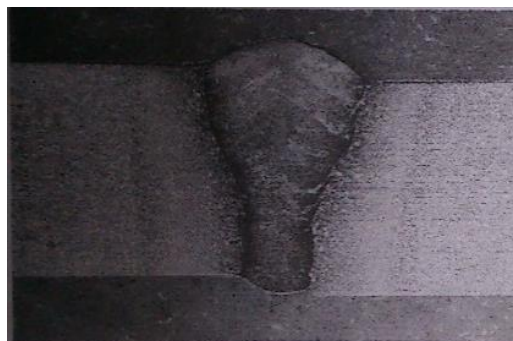
2.4 Laserové svařování [11], [14], [15], [16], [17], [18], [19]

Svařování je jednou z metod spojování materiálu. Na rozdíl od jiných metod spojování, svařování využívá ke spojení působení lokálního tepla nebo tlaku. Obecně lze svařování rozdělit do dvou základních oblastí. První oblast je fúzní svařování, kde část svařovaných dílů projde procesem tavení. Do této skupiny patří metody obloukového svařování, odporového svařování, svařování laserem a svařování elektronovým svazkem. Druhou oblastí je ne-fúzní svařování, do které patří technologie pájení na tvrdo, měkké pájení a svařování za pevné fáze.

Laserové svařování patří do skupiny tzv. vysokoenergetických svařovacích metod. Tato metoda umožňuje svařování různých materiálů, které konvenčními metodami nelze svařit. Laser má vysokou plošnou hustotu výkonu a ve srovnání s ostatními konvenčními metodami tavného svařování řadu výhod, kterými jsou bezkontaktnost, vysoká rychlost, přesnost, flexibilita a především malá tepelně ovlivněná oblast. Laserový paprsek nabízí různé způsoby spojování kovů. Dokáže spojovat materiál na povrchu nebo vytvářet hluboké sváry. Při použití vysoké plošné hustoty výkonu dochází k vytvoření úzkých hlubokých svárů penetrační metodou. Naopak při nižší plošné hustotě výkonu dochází k vytvoření sváru kondukční metodou. Laserem lze svařovat třemi způsoby: bez přídavného materiálu, s přídavným materiálem nebo hybridním způsobem.

2.4.1 Svařování s přídavným materiálem a bez přídavného materiálu [11], [14], [15], [16], [17], [18], [19]

Laserové svařování bez přídavného materiálu je omezeno přesností sesazení spojovaných materiálů. Především u rozměrnějších dílců je obtížné dodržet požadovanou velikost svarové mezery, která se pohybuje od 0,2 do 0,3 mm. Velikost mezery je ovlivněna také průměrem laserového svazku. Přesná výroba svarových ploch poté neúměrně prodražuje výrobu celého dílu. Dosedací plochy musí být ve většině případů ofrézovány anebo pokud se jedná o plechy, tak musí být nařezány laserovým paprskem. Použitím přídavného materiálu je tato nevýhoda částečně eliminována. Svařování s přídavným materiálem není z technologického hlediska úplně snadné. Mezi základní parametry, kde patří výkon laseru a rychlost svařování, musíme zařadit rychlost podávání drátu. Všechny tyto parametry jsou provázány. Výkon musí být navýšen tak, aby docházelo k natavení základního materiálu i přídavného materiálu.



Obr. 10 Tupý svarový spoj 3 mm plech se Svarovou mezerou 1 mm provedený za použití přídavného drátu [11]

Experimentálně bylo zjištěno, že při použití přídavného drátu o průměru 1 mm lze překlenout mezeru mezi svařovanými dílci o šířce 1 mm (viz. obr. 10). Promísení drátu ve svarovém kovu je přitom rovnoměrné. Tvrdost svarového kovu je obdobná jako při svařování bez přídavného materiálu. Při svařování koutových spojů bez přídavného materiálu je téměř nemožné dosáhnout předepsaného převýšení svaru. Svár je tzv. utopený a na přechodu svarového kovu a základního materiálu se tvoří zápaly (viz. Obr. 11).



Obr. 11 Svar bez
přídavného materiálu
[11]



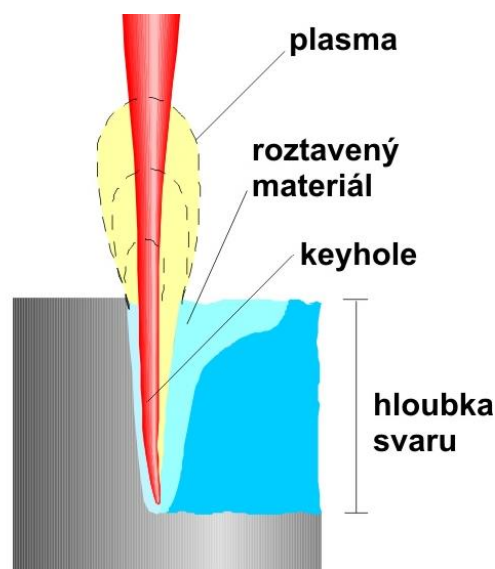
Obr. 12 Svar
s přídavným materiálem
[11]

Použitím přídavného materiálu lze dosáhnout předepsaného převýšení (viz. Obr. 12).

2.4.2 Hlubkové (penetrační) svařování [11], [14], [15], [16], [17], [18], [19]

Metoda hlubkového svařování se vyznačuje vysokou energetickou hustotou laserového paprsku pohybující se až $10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. Laserový paprsek vysokou energií vytváří štíhlou dutinu, která je vyplněna párou roztaveného kovu. Dutina zvaná keyhole dovoluje dosáhnout velké hloubky průvaru, protože laserové záření za pomoci keyhole předává svou energii až uvnitř svařovaného materiálu formou vícenásobných odrazů. Udržování keyhole a její stability je velmi obtížné a dodnes není celý proces detailně popsán. Hlavním důvodem jsou extrémní podmínky uvnitř keyhole, kde dosahuje teplota stěn teploty varu daného kovu. Páry roztaveného kovu jsou ohřívány laserovým paprskem do stavu plazmatu (teplota nad 10000K), čímž se vytváří nad keyhole svítící obláček. Velikost optického záření obláčku není přímo úměrné velikosti keyhole a poskytuje pouze představu o dynamice procesů probíhajících při svařování. Obtížnost popisu procesu keyhole je také způsobena tím, že probíhá uvnitř svařovaného kovu, kde není přístup k optickému pozorování.

Při dopadu laserového paprsku dojde k natavení materiálu a vzniku keyhole, která je obklopena roztaveným kovem. Pokud se paprsek pohybuje, pohybuje se společně s keyhole. Roztavený kov obtéká keyhole a na její zadní straně tuhne. Vznikne úzký hluboký svar se stejnou strukturou. Svar může mít až desetkrát větší hloubku než šířku a dosahovat tedy hloubky průvaru až 25 mm. Hluboké svařování se vyznačuje velkou účinností a vysokými rychlostmi svařování, které zaručují tepelně ovlivněnou oblast. Hlubkové svařování (viz. obr. 13) se využívá především ke svařování silných materiálů nebo při svařování více vrstev materiálu najednou.

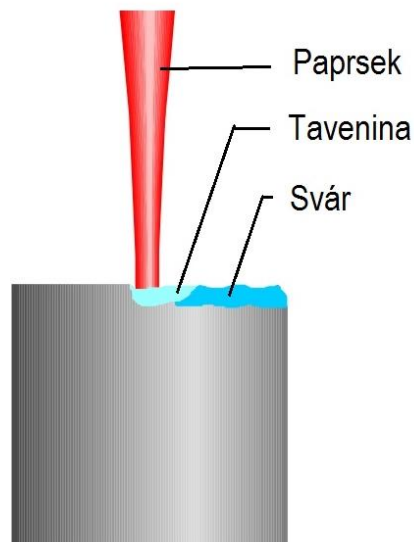


Obr. 13 Hlubkové svařování [39]

2.4.3 Kondukční svařování [11], [14], [15], [16], [17], [18], [19]

Při kondukčním svařování se taví základní materiál s přídavným podél místa svaru a dochází k promísení tavenin. Kondukční režim svařování probíhá při energetické hustotě výkonu menší než $10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, kdy dochází k minimálnímu odpařování materiálu. Laserové záření reaguje s povrchem materiálu a absorbované teplo je odváděno do okolního materiálu. Energie se při kondukčním svařování dostává do materiálu pouze kondukcí tepla. Hloubku svaru ovlivňuje tepelná vodivost materiálu, a proto je maximální hloubka svaru jen několik desetin milimetru až jeden milimetr. Šířka svaru je vždy větší než hloubka svaru. V případě že teplo není dostatečně rychle odváděno do materiálu, stoupne teplota kovu nad odpařovací teplotu. Vznikne kovová pára, hloubka svaru skokově vzroste a proces svařování přejde do hloubkového sváření.

Kondukční svařování se používá především ke spojování tenkostěnných součástí, například pro rohové svary na viditelných hranách krytů a také v elektrotechnice. Důvodem použití kondukčního svařování je hladký zaoblený svar, který se dále již nemusí obrábět. Pro zmíněné aplikace se hodí pevnolátkové lasery s impulzním spojitým provozem.



Obr. 14 Kondukční svařování [39]

nebo

2.4.4 Hybridní svařování [11], [14], [15], [16], [17], [18], [19]

Laserové hybridní svařování je svařovací proces, který kombinuje svařování laserovým paprskem s jinou svařovací technologií. Proces produkuje jeden svar. Ve většině případů je první technologie laserové svařování a druhou technologií je svařování v ochranné atmosféře MIG nebo MAG (svařování kovů v inertním plynu a svařování kovů v aktivním plynu) a také svařování v ochranné atmosféře WIG (svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu) nebo plazmové svařování. Při kombinaci dvou technologií lze využít vlastnosti každé z nich.

Hybridní svařování se využívá především ke svařování velkých plechových desek, např. v lodním stavitelství ke svaření desek dlouhých 30 m a tlustých 15 mm. Rozestupy mezi deskami jsou tak velké, že samostatný laser je nemůže překlenout. V tomto případě se kombinuje laserové svařování se svařováním MIG. Laser zajišťuje vysoký výkon a velkou hloubku průvaru. Umožňuje vysokou rychlost svařování, čímž snižuje tepelně ovlivněnou oblast a také deformace. Hořák MIG překlene šterbinu a uzavře spáru přídavným drátem. Hybridní svařování je rychlejší než MIG a součásti se méně deformují.

3 ELEKTRONOVÝ SVAZEK

Svazek elektronů se používá k tavení kovových materiálů, zušlechťování pomocí vhodných přísad, tepelnému zpracování, opracování, dělení a svařování. Ze všech uvedených technologií je svařování elektronovým svazkem nejrozšířenější. Díky svým charakteristickým vlastnostem si svařování elektronovým svazkem vydobilo významné postavení v automobilovém, leteckém i jaderném průmyslu.

3.1 Fyzikální podstata elektronového svazku [20], [21], [27]

Elektronový svazek je tvořen proudem volných elektronů pohybujících se ve vakuu vysokou rychlostí přibližně stejným směrem a to obvykle v úzkém kuželovém prostoru.

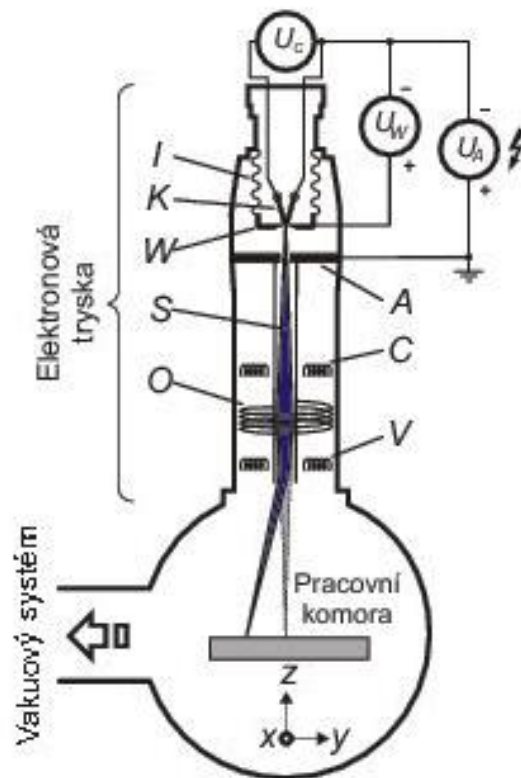
Princip elektronového svazku je založen na přeměně kinetické energie letících elektronů na energii tepelnou při dopadu elektronů na svařovaný materiál. Materiál dosáhne během několika μs teploty tavení, dále teploty varu kovu a vytvoří se úzká kapilára vyplněná parami kovu. Elektronový svazek vniká do materiálu do určité hloubky, kde se pohyb elektronů zastaví. Vzniklá tepelná energie koncentrovaná pod povrchem a způsobuje erupční odpařování materiálu. Částičky vypařujícího se materiálu se pohybují značnou rychlostí z otvoru. Páry vzniklé z odpařujícího se materiálu jsou ionizovány a způsobují nové zaostření elektronového svazku v pracovním místě. Teplota v místě svaru může dosahovat až $25\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vzhledem k velkému množství vnesené energie za krátký čas dosahuje metoda minimální tepelně ovlivněné oblasti. Aby bylo dosaženo vysoké rychlosti elektronů, musí být zamezeno srážkám elektronů s molekulami vzduchu, které způsobují brždění elektronů a jejich vychylování z přímého směru. Celý proces svařování probíhá ve vakuu.

Vakuum umožňuje zajištění termoemise elektronů, tepelnou a chemickou izolaci katody a zamezení vzniku oblouku mezi elektrodami. V pracovní komoře je dostatečný tlak pod $0,1\text{ MPa}$. Tlak potřebný v prostoru katody je mnohem nižší cca méně než $0,001\text{ Pa}$ a to zejména z důvodu zamezení nežádoucích reakcí horké katody se zbytkovým plynem.

Vlastní svařování tedy probíhá ve vakuové komoře a svár vzniká pohybem součásti pomocí programovatelného polohovadla s několika stupni volnosti. Proud elektronů vychází stále ze stejného místa nazývaného elektronové dělo (viz. obr. 15).

Elektrony jsou termoemisí uvolněny ze žhavené záporné elektrody (katody K) a přitahovány k anodě (A). Urychlení se provádí vysokým napětím U_A přivedeným na katodu, které mezi katodou a anodou vytváří potenciál 30 až 200 kV. Množství elektronů, které opustí katodu, lze ovlivňovat pomocí napětí U_W na třetí elektrodě. Katoda je vyrobena nejčastěji z wolframového drátu ohnutého ve tvaru písmene „V“.

Anoda (A) má tvar prstence, jejímž otvorem prochází již urychlené elektrony do další části elektronového děla. Zde je svazek elektronů (S) vystředěn pomocí magnetického pole centrovacího systému, aby směřoval na optickou osu zařízení. Poté se přirozeně rozbíhavé trajektorie jednotlivých elektronů ve svazku magnetického pole fokusační čočky (O) mění na sbíhavé tak, aby svazek měl požadovaný průřez v místě dopadu. Lze dosáhnout vysokých hodnot plošné hustoty výkonu a to až $1\text{ MW}\cdot\text{mm}^{-2}$. V elektronovém děle se dále nachází vychylovací systém (V), který umožňuje svazek odklonit od své přirozené přímé dráhy a změnit místo dopadu. Vychylovací systém je magnetický a umožňuje přesouvat elektronový svazek vysokými rychlostmi (tisíce metrů za sekundu) ve srovnání s mechanickým vychylovacím systémem.



Obr. 15 Princip elektronového děla [20]

3.2 Využití elektronového svazku [20], [21], [22], [24], [27]

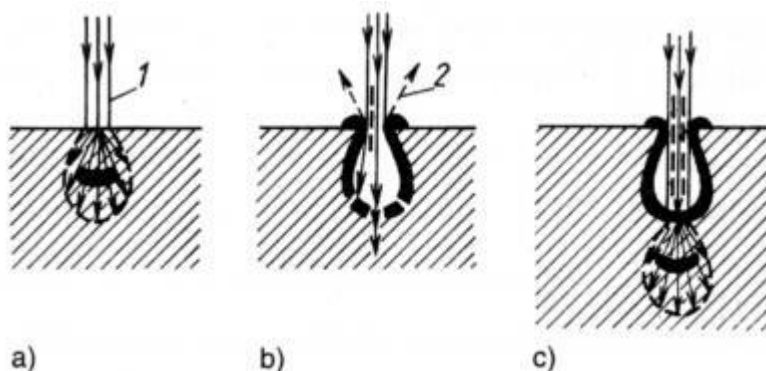
S technologií elektronového svazku se můžeme setkat v řadě oborů, od leteckého a kosmického průmyslu, přes aplikace v chemickém a petrochemickém průmyslu až po využití v medicíně a elektrotechnice. Elektronový paprsek má i chemické účinky, jeho dopad na fotografický materiál a kovové materiály s velkou relativní atomovou hmotností je doprovázen vznikem rentgenového záření.

Nejčastější využití elektronového svazku je právě v průmyslu. Využívá se k děrování, obrábění, tepelnému zpracování povrchové vrstvy, gravírování a nejčastěji ke svařování.

3.2.1 Obrábění svazkem elektronů [23], [24]

Obrábění svazkem elektronů využívá kinetické energie proudu urychlených elektronů. V místě dopadu elektronů na obráběný materiál se jejich kinetická energie přemění na energii tepelnou. Materiál obrobku se taví a později odpařuje. Svazek elektronů vniká do určité hloubky materiálu, kde se pohyb elektronů zastaví. Tepelná energie koncentrovaná pod povrchem materiálu způsobuje erupční odpařování materiálu. Páry odpařeného materiálu se pohybují značnou rychlostí z otvoru. Vzniklé páry jsou ionizovány a způsobí nové zaostření elektronového svazku do pracovního místa. Opakováním tohoto procesu dochází k úběru materiálu. Ze všech uvedených technologií vyžaduje obrábění nejvyšší hustotu svazku ($0,1$ až $1 \text{ MW} \cdot \text{mm}^{-2}$) tak, aby došlo k odpaření materiálu. Pracovní režim může být:

- Pulzní – nejčastěji používaný při vrtání elektronovým paprskem. Odpařování materiálu probíhá postupnými erupcemi (viz. obr. 16), kterými dosáhneme přesného opracování materiálu. Doba pulzu je od 2 μ s do 0,01 s, při frekvenci pulzů 500 až 10 000 Hz.
- Kontinuální – odpařování materiálu probíhá plynule



a) vnik elektronů do materiálu, b) erupční odpařování materiálu, c) opětový vnik elektronů do materiálu

1 - elektronový paprsek, 2 – páry odpařeného kovu [23]

Obr. 16 Postupné erupce

3.2.2 Vrtání děr svazkem elektronů [23], [24]

Vrtání děr elektronovým svazkem se využívá, pokud je potřeba vyrobit velký počet děr malých průměrů. Výhoda elektronového svazku se ukáže vždy tam, kde konvenční metody dosáhnou na své maximální limity nebo se stanou extrémně pomalé. Lze vrtat díry již od průměru 0,015 mm. V závislosti na průměru díry dokáže elektronový svazek vyprodukovat 10 až 30 000 děr/1 sec a to vše při zachování neobyčejné přesnosti průměru díry. Lze zhotovit různé tvary děr od cylindrických až po kónické, zahrnující i šikmé úhly směrem k povrchu s poměrem hloubka/průměr až do 20:1. Při vrtání hlubokých děr, s poměrem délky k průměru díry až 100, musí být průměr paprsku 2x až 4x menší, než zhotovovaný průměr díry. Tolerance vyvrtané díry je 5 až 20 % jejího průměru.

3.2.3 Texturování a gravírování svazkem elektronů [20]

Numerické řízení polohy místa dopadu svazku lze využít k zobrazení obecných textur na povrchu materiálu. Parametry nastavení procesu a vlastnosti materiálu poté rozhodují, jestli dojde k natavení materiálu nebo k jeho natavení a následnému odpaření a tím ke vzniku depresí. Tímto postupem lze vytvářet popisy nebo značky na povrchu součástek. Možné praktické využití je například zhotovení sériového čísla svaru s logem firmy apod. Uvedeným postupem lze na kov přenést i fotografii, jak lze vidět na obr. 17.



Obr. 17 Fotografie přenesená pomocí elektronového svazku na kovovou destičku [20]

3.2.4 Tepelné zpracování povrchové vrstvy [20], [24]

Elektronový svazek dovoluje vysokou rychlostí zahřát malý objem materiálu a rychle měnit polohu svazku. Tato skutečnost přináší nové možnosti v tepelném zpracování kovů. Numericky řízené vychylování svazku umožňuje libovolné rozložení tepelného příkonu v ploše, a tím lze tepelně ovlivnit přesně definovanou oblast materiálu. Kontrolou parametrů lze zajistit požadovaný teplotní profil. Všechny procesy tepelného zpracování jsou velmi krátké a výsledky jsou díky vysoké přesnosti vždy reprodukovatelné.

Do tepelného zpracování v tuhé fázi, kdy nedochází k roztavení materiálu, patří tvrzení a žíhání. Povrchové tvrzení využívá ohřevu po velmi krátkou dobu a pouze na tenké povrchové vrstvě materiálu. Po rychlém ohřátí povrchové vrstvy dochází k rychlému odvodu tepla z horkého povrchu do hloubky materiálu a tím k zakalení povrchové vrstvy. Odvod tepla dosahuje rychlosti až $10^4 \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$. Žíhání se uplatňuje především při lokální povrchové rekrystalizaci. Pokud dojde při tepelném zpracování k roztavení materiálu, mluvíme o zpracování v tekuté fázi. Přetavování povrchové vrstvy využíváme při zhutňování litiny, hliníkových licích slitin nebo ke slití porézních povlaků získaných například šopováním. Při legování je roztavená tenká vrstva spolu s deponovanou vrstvou vhodné příměsi. V tekuté fázi difuzním procesem dojde ke vzniku požadované slitiny. Při plátování dojde k celoplošnému přitavení přídavné vrstvy a jde v podstatě o navařování. Disperzním přetavením dochází k rozptýlení drobných částic v tavenině a lze tak dosáhnout vyšší otěruvzdornosti a houževnatosti obohacením materiálu o tvrdá zrna.

3.2.5 Svařování svazkem elektronů [20], [21], [24], [25], [26]

Ze všech již uvedených technologií je svařování svazkem elektronů nejrozšířenější, a to z důvodu svých charakteristických a unikátních vlastností. Svařování touto metodou si vydobylo pevné postavení v mnoha významných průmyslových odvětvích, jako například v automobilovém, jaderném a leteckém průmyslu. Zaostřený svazek elektronů zahřívá materiál spojovaných součástí na teplotu vyšší než je teplota tavení. Svařování elektronovým svazkem je náročné na přípravu svarových ploch. Při dobře sesazených komponentech (bez mezer mezi svařovanými součástkami) dojde k promísení taveniny na rozhraní a po vychladnutí vznikne svarový spoj. Při svařování není nutné přidávat svarový kov. Svazek má schopnost pronikat pod povrch vysokou rychlostí díky tzv. hloubkovému efektu. Tento efekt nám umožňuje vytvářet velmi hluboké průvary, které se vyznačují minimální šířkou tepelně ovlivněné oblasti. Dosahovaný poměr hloubky k šířce svaru je 30:1. Hloubky průvarů dosahované v dnešní době jsou více než 150 mm. Protikladem hloubkového svařování je svařování materiálu tloušťky jen několik málo mikrometrů. Na obr. 18 vidíme detail membránového vlnovce, který je svařen elektronovým svazkem z desítek nerezových mezikružích o tloušťce jen 0,05 mm.



Obr. 18 Detail membránového vlnovce [20]

Svařování elektronovým svazkem je velmi spolehlivá metoda ve výrobě hlubokých avšak úzkých a paralelních svarů. Úhlová deformace, osové smrštění a další nežádoucí efekty jsou minimální i při svařování citlivých součástí. K dalším významným charakteristickým rysům elektronového svařování patří malá deformace součástí po vychladnutí, pevnost svaru téměř stejná jako pevnost svařovaného materiálu, malé převýšení svarového kovu a díky této vlastnosti není nutné další opracování svaru. Mezi další kladné vlastnosti elektronového svařování patří velká přesnost a reprodukovatelnost, vysoká kvalita svarů a možnost svařovat obtížně svařitelné materiály a různorodé materiály. Elektronové svařování se nejvíce využívá pro svařování různorodých materiálů, kdy svařením různých materiálů s protichůdnými vlastnostmi z hlediska tepelné vodivosti, houževnatosti, tvrdosti apod. vytvoříme výslednou součást s požadovanými vlastnostmi. Jako příklad svařování různých materiálů můžeme uvést kombinace hliníku s titanem, niklem, stříbrem nebo svary mědi s nerez ocelí. Na obr. 19 lze vidět svár bronz – ocel.



Obr. 19 Bronz – ocel 30 mm

Celý proces svařování probíhá ve vakuu 10^{-2} až 10^{-3} Pa, protože jinak by docházelo k rozptylování elektronového svazku molekulami vzduchu. Velikost svařence je tedy ovlivněna velikostí vakuové pracovní komory. Dnešní elektronové svářečky disponují pracovními komorami nejrozličnějších rozměrů, od nejmenších s objemem jen několik málo litrů až po největší s objemem až 630 m^3 . Rozměr svařovaných dílců může být až $6\,000 \text{ mm} \times 12\,000 \text{ mm}$. U všech komor tedy vznikají ztrátové časy potřebné pro jejich vyčerpání. Nelze svařovat kovy s vysokou tenzí par, jako například Zn, Cd, Mg.

Hlavní charakteristiky svařování elektronovým svazkem

- Velmi vysoká koncentrace energie ve svazku $\approx 10^7 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$.
- Transfer tepla neprobíhá vedením od povrchu do objemu materiálu, ale efektivněji indukovaním tepla přímo v objemu materiálu.
- Vysoká rychlost svařování vytváří velmi úzké sváry a tepelně ovlivněná oblastí jsou s minimálními deformacemi
- Vakuum umožňuje svařovat jinak nesvařitelné materiály (silně reaktivní se vzdušným kyslíkem Ti, Zr).
- Proměnná pracovní vzdálenost mezi elektronovým dělem a svařencem dovoluje svařovat komplikované tvary na větší vzdálenost (i několik metrů).
- Díky svařování ve vakuu není potřeba přídavných materiálů (tavidla, plyny) chránící svarovou lázeň.
- Krátkých svařovacích časů lze dosáhnout úpravou vakuové komory.
- Počítačové řízení, monitoring elektrických a mechanických parametrů je dnes běžnou součástí řízení svařovacího procesu. Proces svařování je plně automatizován.
- Svařovací parametry jsou velmi stabilní a tím tedy snadno opakovatelné s přibližně stejnou kvalitou při sériové výrobě.
- Urychlovací napětí nad 60 kV vyžaduje ochranu před rentgenovým zářením.

Výhody svařování elektronovým svazkem

- Svary dosahují vysoké jakosti (bez pórů a kontaminace atmosférickými plyny) a mohou být provedeny vysokou rychlostí.
- Extrémně úzká tepelně ovlivněná oblast a natavení svaru
- Silná koncentrace elektronového svazku nezpůsobuje deformace po svařování
- Vysoké vakuum dovoluje svařovat reaktivní kovy jako je Ti a Zr při zachování vysoké čistoty svarového kovu.
- Svarové spoje jsou po svaření čisté a nevyžadují žádné čištění po svaření od oxidů, strusky nebo zbytku tavidel.
- Svary mají velký poměr hloubky závaru k šířce. Na jeden závar lze dosáhnout extrémní průvar.
- Lze svařovat tenké součásti s masivními součástmi.
- Tupé svary lze zhotovit na fóliích o tloušťce 0,025 mm.
- Nerez o tloušťce 100 mm lze svařit na jeden průchod elektronového svazku s plným průvarem rychlostí přibližně $170 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$.
- Náklady na spotřebovanou energii jsou menší v porovnání s konvenčními metodami svařování.
- Kontrola polohy svaru je velmi přesná, a tak mohou být prováděny svary i na dlouhou vzdálenost.

Nevýhody svařování elektronovým svazkem

- Vysoké pořizovací náklady svařovacího zařízení, přenosné provedení zařízení je ojedinělé.
- Svařování se musí provádět ve vakuové komoře.
- Velké časové prostoje a finanční náročnost při vakuování komory.
- Jediná metoda svařování, která vyzařuje RTG záření.
- Paprsek z elektronového děla dopadá po přímce na materiál, nelze tak svařit stíněné spoje.
- Obsluha a návrh technologie vyžaduje vysoce kvalifikovaný personál.
- Velikost svařence je omezena velikostí vakuové komory. Po vakuaci komory je svařenec nepřístupný a jakýkoliv pohyb vyžaduje speciální manipulátory.
- U velkých vakuových komor je elektronové dělo umístěno na robotickém ramenu speciálně navrženém pro práci ve vakuu

3.3 Příprava svarových ploch [21], [27]

Svarové plochy pro svařování elektronovým svazkem se velmi liší od svarových ploch pro konvenční metody svařování, kde se svarové plochy nejčastěji upravují do tvaru klasického nebo oboustranného „V“. Základním typem svarového spoje pro svařování elektronovým svazkem je svařování na tupo. Při svařování elektronovým paprskem jsou svarové plochy bez úkosu. Mírný úkos může vzniknout, pokud se svařuje s přídavným materiálem. Na rozdíl od klasických metod svařování je nutno věnovat mimořádnou pozornost přípravě a čištění povrchu svarových ploch a blízkého okolí. Svarové plochy musí být naprosto rovné po celé své délce. Mezera mezi materiálem nesmí přesáhnout 0,1 mm, jinak paprsek projde mezi materiály a nedojde k natavení materiálu a následnému svarovému spoji. Svařovaný materiál musí být nařezán laserem anebo musí být svarové plochy ofrézovány. Nevyhovující jsou například svarové plochy zhotovené na tabulových nůžkách. Důvodem je, že nevyhovují z hlediska rovinnosti a navíc zaoblená hrana je pro svařování elektronovým svazkem nepřístupná. Svarové plochy mají také doporučenou drsnost $Ra = 1,6$ až $3,2$.

Nesmí se rovněž opomenout, že vakuum má silné degradační účinky na některé materiály. Jedná se především o organické nátěry, zbytky řezných kapalin a některé konzervační kapaliny, které mohou ve vakuu velmi rychle degradovat nebo se do vakua odpařovat a znehodnocovat tak jeho čistotu v průběhu svařování. Nebezpečné může být opomenutí odstranění zbytků tavidel po pájení z povrchu svařence (například po některé z předchozích výrobních operací). Tavidla mohou obsahovat anorganické kyseliny, které se s klesajícím tlakem se odpařují a mohou napadat vakuový systém. I malé množství odpařené kyseliny může nenávratně zničit součástky vakuové difúzní pumpy. Jedná se o velmi nákladnou část vakuového systému.

Jakékoliv difúzní vrstvy (cementace, nitridace) na povrchu, anodické povlaky, fosfátování, kadmiování, zinkové povlaky musí být odstraněny z místa svaru a blízkého okolí svaru minimálně do trojnásobné vzdálenosti tloušťky svaru. Pokud je použito před svařováním moření, doporučuje se ho provádět následujícím způsobem:

- Odmaštění nejlépe pomocí ultrazvuku.
- Moření v kyselinách po daný čas s ohledem na riziko vnesení difúzního vodíku.
- Oplach destilovanou vodou.
- Vysušení horkým vzduchem.
- Skladování je možné pouze omezenou dobu před svařováním.

3.4 Svařitelnost materiálů elektronovým svazkem [21], [27]

Svařování ve vakuu umožňuje svařovat materiály chemicky velmi aktivní (např.: Ti, Zr, W), které se vyznačují vysokou afinitou k atmosférickým plynům. U těchto kovů dochází při svařování ke zhoršení mechanických a fyzikálních vlastností svarového spoje. Elektronový svazek také umožňuje svařovat těžkovitelné kovy, žárovevné slitiny typu Inconel a Nimonic. U svařování elektronovým svazkem dochází méně ke vzniku křehkých intermetalických fází díky úzké svarové lázni na rozdíl od konvenčního svařování. Na druhou stranu vlivem rychlého chladnutí svarové lázně je problematické odplynění taveniny a tím je možný vznik pórů. Tento problém lze vyřešit vhodnou volbou svařovacích parametrů, nižším proudem a svařovací rychlostí. Kvalita spoje při svařování elektronovým svazkem je velmi závislá na umístění paprsku do místa svarového spoje po dobu celého svařování. Je tedy nutné používat přesné řídicí systémy a věnovat zvýšenou pozornost přípravě materiálu, ustavení materiálu a přesnému nastavení svazku elektronů.

3.4.1 Svařitelnost ocelí [21], [28]

Elektronovým svazkem je svařitelná většina ocelí. Výjimkou jsou pouze některé typy neuklidněných ocelí. Vlivem neukončené dezoxidační reakce tato ocel v průběhu svařování elektronovým svazkem uvolňuje z taveniny plyny způsobující póry ve svaru.

Vysoký obsah fosforu a síry ovlivňuje svařitelnost nelegovaných a nízkolegovaných ocelí především u větších tloušťek materiálu. Proto jsou nevhodné pro svařování elektronovým paprskem automatové oceli s velkým obsahem síry. Například u oceli 15 Mo3 tloušťky 50 mm byl odstraněn výskyt trhlin při snížení obsahu síry a fosforu pod 0,01 %. U ocelí s obsahem uhlíku nad 0,2 % může tvrdost v tepelně ovlivněné oblasti dosahovat až 700 HV. Tohoto efektu lze využít pro vytvrzování povrchu. Skutečnost, že na hranici natavení dosahuje tvrdost až 700 HV, by neměla být posuzována jako u konvenčních metod svařování. Oblast vysoké tvrdosti je obklopena houževnatým materiálem. V některých případech lze odstranit následné tepelné zpracování po sváření vhodnou úpravou tepelného příkonu rozostřením paprsku. Úspěšně lze svařovat i cementované a nitridované povrchy, pokud z okolí svaru odstraníme povrchovou vrstvu.

Dobře svařitelné jsou vysokolegované korozivzdorné oceli. Jejich dobrá svařitelnost je zapříčiněna vyšší čistotou materiálu. Podobně jako u konvenčních metod svařování malé množství δ -feritu zabraňuje vzniku horkých trhlin. Svařování elektronovým svazkem se většinou provádí bez přídavného materiálu, a tak nelze přídavným materiálem ovlivnit chemické složení svarového kovu. Výsledný podíl δ -feritu lze mírně měnit vhodnou volbou svařovacích parametrů. Velmi rychlé ochlazování způsobuje sklon ke vzniku horkých trhlin, ale tuhnutí taveniny je nerovnovážné a podíl fází odlišný od poznatků získaných studiem svarového kovu konvenčními metodami. Stejně jako u jiných metod svařování je nutné i u vysokolegovaných korozivzdorných ocelí kontrolovat podíl O, N, Nb, Ti.

Vysokolegované vytvrditelné oceli se vyznačují vysokou tvrdostí v tepelně ovlivněné oblasti v porovnání se svarovým kovem a základním materiálem. Vznik horkých trhlin lze odstranit oscilací paprsku, která způsobí zvětšení svarové lázně a snížením rychlosti svařování. Obtížně svařitelné jsou všechny grafitické litiny, které při rychlém ochlazování vytváří velmi tvrdé ledeburitické oblasti náchylné k praskání. Tohoto lze částečně snížit následným tepelným zpracováním.

3.4.2 Měď a její slitiny [21], [28]

Měď a její slitiny vedou velmi dobře teplo, což způsobuje rychlé tuhnutí tekuté fáze a obtížné odplynění svarové lázně. Špatný vliv má i velká roztažnost, která způsobuje zbytková napětí. Bezokyslíkatá měď bez použití dezoxidačních přísad je svařitelná pouze při obsahu O a S nižším než 5%. V průběhu svařování O a S společně s C tvoří plynou fázi, která má za následek tvorbu pórů ve svaru. Výskyt nelze potlačit ani oscilací paprsku ke zvětšení roztaveného materiálu. Slitiny mědi jsou obecně dobře svařitelné. Mezi dobře svařitelné slitiny mědi patří CuCrZr, Cu-Ni slitiny, hliníkové a cínové bronzы. Nevhodné pro svařování jsou pouze mosazi. Důvodem je, že Zn ve vakuu po natavení sublimuje do vakua a způsobuje póry ve svarech.

3.4.3 Titan a jeho slitiny [21], [28]

Svařování titanu, některou z běžných technologií, vyžaduje zvláštní ochranu svarové lázně a tepelně ovlivněné oblasti. Důvodem je, že titan a jeho slitiny jsou vysoce afinní ke kyslíku, dusíku a vodíku již při teplotách nad 250 °C. V případě svařování svazkem elektronů je dostatečná ochrana svarové lázně a tepelně ovlivněné oblasti zajištěna úrovní vakua $p_a < 0,07$ Pa. Většina slitin titanu i čistý titan je svařitelný. Výjimku tvoří pouze β -slitiny, které tvoří křehké fáze.

Titan a jeho slitiny mají nízkou teplotní vodivost, která má za následek hrubnutí zrna v TOO. Používají se tedy vysoké rychlosti svařování. Z důvodu krátkého času tuhnutí svarové lázně může dojít k zvýšené porezitě svarového kovu. Titan a jeho slitiny vykazují prudký pokles rozpustnosti plynů (především vodíku) s klesající teplotou. Slitiny titanu jsou svařitelné ve vyžehnaném i vytvrzeném stavu. Oblast svaru musí být precizně vyčištěna nejlépe mořením. Svařence se doporučuje tepelně zpracovat žíháním na odstraňování prnutí.

3.4.4 Hliník a jeho slitiny [21], [28]

U svařování hliníku a jeho slitin elektronovým svazkem není nutné odstraňování oxidické vrstvy, jako je tomu u konvenčních metod svařování. Oxidická vrstva je narušena elektronovým svazkem a vakuum ji udržuje v přijatelné míře pro svařování. Svařitelnost Al slitin uvádí následující tabulka (tab. 1).

Tab. 1 Svařitelnost Al a jeho slitin [21]

Báze slitiny	Příklad slitiny	Svařitelnost
Nevytvrditelné slitiny	Al 99,5	Dobrá
	AlMn 1	Dobrá
	AlMg 3	sklon k horkým trhlinám
	AlMg 5	Dobrá, sklon k porezitě
Vytvrditelné slitiny	AlMnSi 1	sklon k horkým trhlinám
	AlCuMg 2	Dobrá
	AlZnMgCu	Nevhodná pro svařování, odpařování Zn a Mg, porezita, horké trhliny
Nevytvrditelné lité slitiny	AlSi 12	Dobrá
	AlSi 9 Cu 3	Dobrá
	AlMg 5	Dobrá, odpařování Mg, sklon k porezitě
Vytvrditelné lité slitiny	AlSi 7 Mg	Dobrá
	AlMg 5 Si	Dobrá, odpařování Mg, sklon k porezitě
	AlCu 4 Ti	Sklon k horkým trhlinám
	AlSi 8 Cu 3	porezita

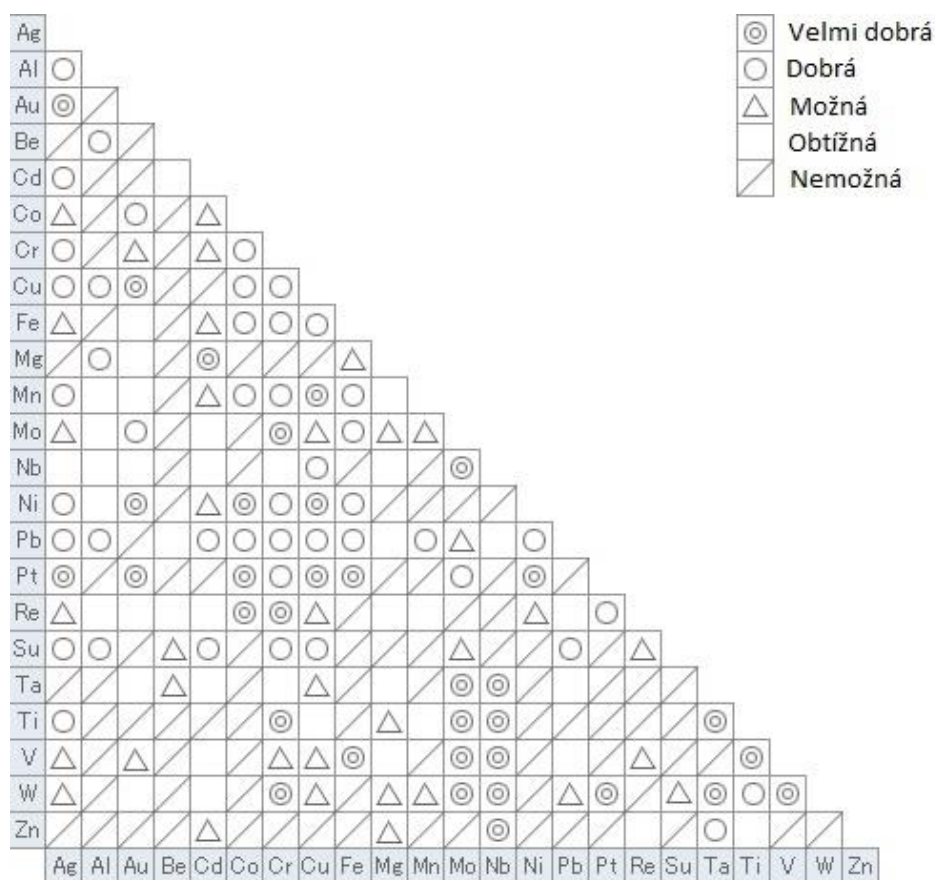
Obecně je hliník dobře svařitelný elektronovým svazkem. Jen při vyšším obsahu Mg roste náchylnost ke vzniku horkých trhlin. Když množství Mg dosáhne určité hranice, může dojít k vypařování Mg do vakua a ke vzniku porezity ve svaru. Nejvyšší citlivost k trhlinám nastává při obsahu 1 až 2 % Mg. Náchylnost k trhlinám lze odstranit změnou obsahu Mg na 5 %, kdy trhliny již nevznikají. Obdobná závislost je u slitin hliníku s obsahem Cu a Si.

Tab. 2 Náchylnost k praskání slitin Al pro kritické koncentrace legujících prvků [21]

Báze slitiny	Nejvyšší sklon ke vzniku horkých trhlin	Min. koncentrace pro praktické aplikace	Kritické rozpětí teplot, °C
AlSi	0,75 % Si	2 % Si	660 – 577
AlCu	3 % Si	5 % Si	660 - 547
AlMg	1,2 % Mg	3,5 % Mg	660 - 449
AlSiMg	0,5 – 0,8 Si 0,2 – 1,2 Mg	2 % Si	

Vytvrditelná slitina AlCuMg₂ je konvenčními metodami nesvařitelná. Jinak tomu je u svařování elektronovým svazkem, kde má skvělou svařitelnost. Slitiny hliníku a zinku jsou pro elektronové svařování nevhodné z důvodu sublimace Zn do vakua. V případě vytvrditelných slitin hliníku se v okolí svaru vyskytují všechna pásma podle dosažené teploty od přestálých precipitátů až po zcela rozpuštěné vytvrzující fáze. Je tedy nutné po svařování obnovit požadované vlastnosti tepelným zpracováním.

3.4.5 Svařitelnost ostatních materiálů elektronovým svazkem



Obr. 20 Svařitelnost kombinací materiálů elektronovým svazkem [21]

4 OCELI S VYŠŠÍ PEVNOSTÍ [1], [2], [4]

V oblasti konstrukčních materiálů vývoj směřuje ke zvyšování užitečných vlastností oceli. Poslední dobou se zvyšuje spotřeba ocelí s vyšší pevností a otěruvzdorných materiálů z důvodu potřeby snižování hmotnosti konstrukcí. Využívání ocelí s vyšší pevností nemá pouze výhodu ve snížení hmotnosti, ale také ve snížení spotřeby kovové substance, levnější dopravě, rychlejší zpracování a montáži. Zohledněním všech těchto výhod lze dospět k faktu, že cena výrobku z vysoko pevnostní oceli je srovnatelná s cenou výrobku z běžné oceli a navíc dojde k úspoře hmotnosti jednotlivých součástí. Spotřeba těchto materiálů v poslední době roste ve světě i v České republice a tyto materiály se stávají stále běžnějšími. Oceli s vyšší pevností představují více jak 10 % produkce válcovaného materiálu a vyznačují se vysokou mezí kluzu, sníženou citlivostí ke křehkému porušení a dobrou svařitelností. Využívají se především pro velké konstrukce, jako jsou mosty, haly velkých rozměrů, výškové budovy nebo pro nadměrně namáhané zařízení, kterými jsou například části důlních zařízení.

4.1 Rozdělení ocelí s vyšší pevností [1], [2], [4], [29]

Princip dělení ocelí s vyšší pevností spočívá v hodnotách mezí kluzu, kdy za ocel s vyšší pevností je považována ocel s mezí kluzu nad 350 MPa. Podstatou těchto ocelí je jemnozrnná struktura a způsob výroby, konkrétně termomechanické zpracování při válcování. V zásadě je lze rozčlenit do čtyř skupin, viz tab. 3

Tab. 3 Rozdělení termomechanicky zpracovaných ocelí [29]

	Skupina kalených ocelí	Některé obchodní názvy	Základní mechanické vlastnosti	Další mechanické vlastnosti	Podstatné technologické vlastnosti
I.	Vysokopevnostní konstrukční ocel	WELDOX DOMEX ALFORM	Re = 700 až 1100 MPa	Houževnatost	Svařitelnost Ohybatelnost
II.	Otěruvzdorné oceli	HARDOX XAR	Tvrdost 400 až 600 HB	Houževnatost	Svařitelnost Obrobitelnost Ohybatelnost
III.	Pancéřové oceli	ARMOX	Tvrdost 340 až 600 HB	Houževnatost	Svařitelnost
IV.	Nástrojové oceli	TOROX	Tvrdost 33 HRC 44 HRC		Obrobitelnost Teplotní stálost

Hlavní parametry mechanických vlastností vysoko pevnostních ocelí (skupina I.) značek DOMEX a WELDOX jsou uvedeny v tab. 4.

Tab. 4 Mechanické vlastnosti a uhlíkové ekvivalenty ocelí WELDOX a DOMEX [29]

Označení	TLoušťka	Mez kluzu a pevnosti		Uhlíkový ekvivalent
	[mm]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	CEV
WELDOX 355 DOMEX 355 MC	8 až 16 (16) až 25	355 345	450 až 610 450 až 610	0,39 až 0,43
WELDOX 420 DOMEX 420 MC	6 až 16 (16) až 40 (40) až 63 (63) až 80	420 400 390 380	500 až 660 500 až 660 500 až 660 480 až 650	
	6 až 16 (16) až 40 (40) až 63 (63) až 80	460 440 430 420	530 až 720 530 až 720 530 až 720 510 až 720	0,37 až 0,42
WELDOX 500 DOMEX 500 MC	6 až 16 (16) až 40 (40) až 63	500 480 460	570 až 720 570 až 720 570 až 720	0,37 až 0,42
WELDOX 700 DOMEX 700 MC	6 až 50 (50) až 100	700 650	780 až 930 780 až 930	0,39 až 0,64
WELDOX 900	4 až 50 (50) až 80	900 830	940 až 1100 940 až 1100	0,56
WELDOX 960	4 až 50	960	980 až 1150	0,56 až 0,64
WELDOX 1100	5 až 50	1100	1200 až 1500	0,68 až 0,72

4.2 Trendy vývoje ocelí s vyšší pevností [29]

U běžných nelegovaných konstrukčních ocelí jsou mechanické vlastnosti ovlivňovány především obsahem uhlíku, houževnatostí a potlačením vlivu uhlíku na jejich svařitelnost. Dosáhnout dolegování lze malým obsahem prvků jako Al, Ti, Nb a V. Zvýšením obsahu těchto prvků dochází ke vzniku jemnozrnné struktury a jejich vazbou na uhlík a dusík také ke zvýšení pevnostní charakteristiky. Takové oceli se nazývají jemnozrnné. Množství legujících prvků je limitováno hodnotami - Al_{min} 0,015 hm %, Ti_{max} 0,15 hm %, V_{max} 0,1 hm % a Nb_{max} 0,04 hm % (celkové množství legur se pohybuje v rozmezí 0,15 až 0,25 %). Tyto materiály jsou pak označovány jako mikrolegované jemnozrnné oceli. Z běžných konstrukčních ocelí byly vyvinuty nízkolegované, jemnozrnné materiály s vyšší pevností, systematickým zvyšováním meze kluzu. Vznikla skupina svařitelných vysoko pevnostních ocelí označovaných HSS (High Strenght Steel).

Vzrůst pevnosti je docílen zvýšením podílu tvrdých fází vedle měkkých fází. Dvojfázové oceli se skládají z feritu a až 20 % martenzitu. Mezi další směry patří TRIP oceli. Přejít k ocelím s vysokou pevností v tahu (přes 800 MPa) spočívá v použití multifázových ocelí. Struktura těchto ocelí se skládá z většího podílu tvrdých fází s jemnými precipitáty vedle měkkých fází. Celá mikrostruktura je pak velmi jemná.

Další vývoj se zakládá na částečně martenzitických ocelích. Pokud ocel obsahuje více jak 20 % martenzitu, tak se vyznačuje relativně nízkou mezí kluzu, ale vysokou mezí pevnosti. U čistě martenzitických ocelí může být dosažena mez pevnosti 1400 MPa.

Nejrealističtější směr vývoje je zmenšování velikosti zrna a vícefázová struktura. Při extrémním zmenšování zrna hrozí, že mez kluzu se nebezpečně přiblíží k mezi pevnosti. Překonat tento problém lze použitím vícefázové struktury.

4.3 Svařitelnost ocelí s vyšší pevností [1], [2], [4]

Jemnozrnné oceli mají nízký uhlíkový ekvivalent, díky čemuž lze poměrně lehce svařovat pomocí konvenčních metod. Lze je dobře svařovat navzájem i se všemi obvyklými konstrukčními materiály. Při svařování jemnozrnných materiálů platí stejné zásady jako při svařování běžných uhlíkových ocelí, což je způsobeno podobným chemickým složením jako u nelegovaných konstrukčních ocelí.

U svařování jemnozrnných ocelí nastává problém s růstem zrn v TOO. K potlačení tohoto jevu se svařuje bez předehřevu a s minimálním tepelným příkonem při svařování. Pokud je předehřev nutný, pak se volí teploty předehřevu 100 až 200°C. Oceli vyšší pevnosti jsou náchylné k trhlinám za studena, které vznikají při teplotách pod 200°C. Především k tvorbě zbrzděných trhlin indukovaným difúzním vodíkem je nárůst této citlivosti úměrný nárůstu meze kluzu. Nejčastější místo trhlin ve svaru bývá v podhousenkové oblasti. Studené trhliny jsou transkrystalického charakteru a jejich povrch je lesklý a nezoxidovaný.

Čím méně je ocel legována a čím menší má obsah uhlíku, tím je lépe svařitelná a méně náchylná ke vzniku trhlin. Množství legur a obsah uhlíku je zohledněno v tzv. uhlíkovém ekvivalentu, pro jehož výpočet se používají dva níže uvedené vzorce.

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

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

Při svařování není nutné další zvláštní opatření, pokud jsou splněny následující podmínky:

- $CEV \leq 0,45 \text{ hm.}\%$
- $C \leq 0,20 \text{ hm.}\%$
- Tloušťka $t \leq 25 \text{ mm}$

Pokud nejsou podmínky splněny, pak je nutné použít zvláštní opatření, aby se zamezilo vzniku trhlin. Mezi opatření patří především předehřev. Ekvivalent CEV klade větší váhu legujícím prvkům a CET obsahu uhlíku.

5 ZKOUŠKY SVAROVÝCH SPOJŮ [2], [4]

Zkoušky svarů rozdělujeme podle vlivu, který mají na svarový spoj na:

- Nedestruktivní (nedochází k porušení svaru)
- Destruktivní (s porušením svaru, například jeho zlomením)

Nejrozšířenější skupinou zkoušek jsou zkoušky nedestruktivní, protože po zkoušce lze výrobek dále používat. Nevýhodou je, že pomocí nedestruktivních zkoušek nelze spolehlivě zjistit pevnost svarového spoje, plastické vlastnosti, odolnost proti cyklickému namáhání apod. Proto se musí vzít v úvahu, že nedestruktivní zkoušky prokážou pouze část užitečných vlastností svarového spoje. Zbytek užitečných vlastností se neprokáže vůbec (lze zohlednit do určité míry vhodnou volbou bezpečnostních koeficientů při návrhu a výpočtu svarového spoje), nebo se prokazuje zkouškami destruktivními na zvláštních vzorcích určených pouze ke zkouškám a pak k likvidaci. Vychází se z předpokladu, jestli všechny zkušební vzorky vyhoví, tak tato technologie svařování bude dávat dobré výsledky i u dalších vyrobených kusů.

5.1 Nedestruktivní zkoušky [1], [2], [4], [30]

Nedestruktivní kontroly zajišťují kvalitu součásti, technickou způsobilost a funkční bezpečnost. Nedestruktivní metody se dělí podle toho, zdali se zjišťují vady na povrchu svaru nebo uvnitř svaru.

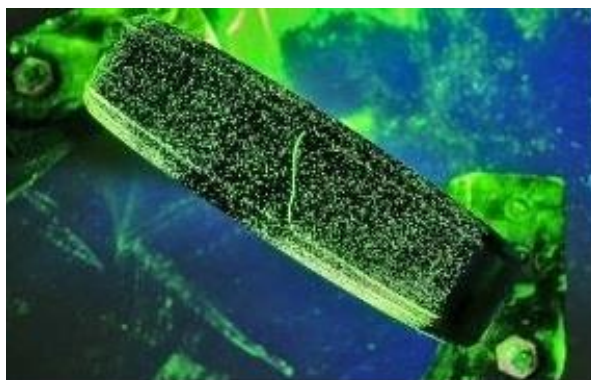
K zjišťování povrchových vad se používají metody:

- Vizuální

Je to základní, nejjednodušší, nejlevnější a nejstarší metoda. Vizuální zkouška se provádí jako první a předchází ostatním zkouškám. Posuzuje se zrakem povrchový stav svarů a je možné použít jednoduché optické pomůcky (lupa), v takovém případě se jedná o přímou vizuální kontrolu. Při použití endoskopů hovoříme o nepřímé kontrole. Zkouška se řídí normou ČSN EN 970.

- Penetrační (kapilární)

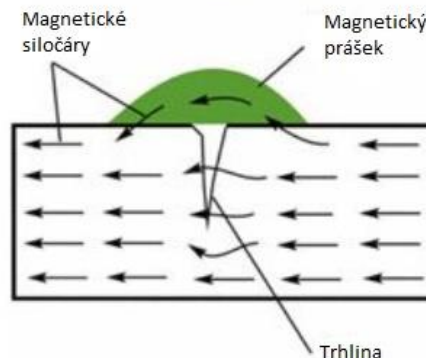
Zkouška slouží k zjišťování povrchových vad, které musí být na povrchu otevřené, aby do nich mohla vniknout detekční tekutina. Zkouška je tedy založena na vztlakovosti detekční kapaliny, která musí zatéct do dutin v materiálu. Podle detekčních prostředků rozeznáváme metodu barevné indikace a metodu fluorescenční (viz. obr. 21). Metoda barevné indikace se projeví kontrastní změnou na denním světle a fluorescenční metoda se vyhodnocuje pod ultrafialovým světlem. Penetrační zkouška se provádí dle normy ČSN EN 579-1 a svary se vyhodnocují dle normy ČSN EN 1289.



Obr. 21 Fluorescenční indikace vady [30]

- Magnetická prášková

Principem metody je zviditelnit magnetické siločáry, které vystupují na povrch. Metoda umožňuje zjistit vady na povrchu nebo těsně pod povrchem (2 až 3 mm). Siločáry tuto feromagnetickou vadu (např. trhlinu, struska, bublina) zviditelní na povrchu rozptylem magnetického pole (viz obr. 22). Pro zviditelnění se využívá jemný železitý prášek, který ulpí v místě vady. V neporušených místech se prášek neudrží a steče. Provádění magnetických zkoušek se řídí normami ČSN EN 1290 a ČSN EN 1291.



Obr. 22 Magnetické pole nad povrchem [30]

K zjištění vnitřních vad se používají metody:

- Prozářením (RTG)

Metoda slouží především k zjišťování vnitřních vad. Jedná se o nejstarší nedestruktivní zkoušku. Je založena na pohlcování ionizačního záření. Při ozařování materiálu RTG lampou určitá část záření projde materiálem. Intenzitu prošlého záření zaznamenáváme na fotografický papír (viz. obr. 23). Místa kde se vyskytují vady, se zobrazují tmavěji z důvodu snadnějšího průchodu záření materiálem (bubliny, póry, trhliny).



Obr. 23 RTG snímek s trhlinami [42]

- Ultrazvukem

Zkouška umožňuje zjištění vad v poměrně velké hloubce pod povrchem. Princip zkoušky spočívá v odrazu vlnění na rozhraní dvou prostředí s odlišnými vlastnostmi. Vlnění se šíří prostředím bez vad určitou rychlostí v přímém směru, pokud ale narazí na jiné prostředí (vměstky, bubliny a póry) dojde ke změně rychlosti a směru (vlnění se láme nebo odráží).

5.2 Destruktivní zkoušky [1], [2], [4]

Destruktivní zkoušky pro svarové spoje jsou obdobou zkoušek pro zjišťování mechanických vlastností materiálů. U destruktivních zkoušek dochází k znehodnocení vzorku a je tedy potřeba vyrobit speciální vzorky ze zkoušeného materiálu. Mezi nejpoužívanější destruktivní zkoušky svarů patří:

- Příčná zkouška tahem
- Zkouška lámavosti
- Zkouška rázem v ohybu
- Zkouška rozlomením
- Zkouška makrostruktury a mikrostruktury
- Zkouška tvrdosti

6 PRAKTICKÁ ČÁST

Technická praxe vyžaduje svařování materiálů s odlišnými vlastnostmi. Svařování odlišných materiálů nabízejí vysokoenergetické metody jako například svařování laserem a svařování elektronovým svazkem. Cílem práce je tedy pořízení svarů oběma zmíněnými metodami a jejich vyhodnocení z hlediska mechanických vlastností, makrostruktury a mikrostruktury. Pro experiment byla vybrána vysoko pevnostní ocel DOMEX 420 a ocel pro hluboký tah DC01.

6.1 Návrh experimentu

U plechů nastříhaných na tabulových nůžkách se musí nejdříve připravit svarové plochy a až poté budou svařovány. Po svaření všech vzorků oběma metodami bude teprve započato se samotnou experimentální částí, kdy se zvolí destruktivní zkoušky, z důvodu prokázání přesnějších výsledků než u nedestruktivních zkoušek. Z destruktivních zkoušek byly vybrány dvě metody:

- Příčná zkouška tahem dle ČSN EN 895
- Kontrola makrostruktury a mikrostruktury svaru dle ČSN EN 1321

Rázová zkouška v ohybu nebyla provedena z důvodu nemožnosti zhotovení předepsaného zkušebního vzorku dle normy (ze svařeného vzorku o tloušťce 3 mm nelze vyrobít vzorek 10 x 10 x 50 mm). V úvahu připadala zkouška lámaivosti, která nebyla provedena z časových důvodů.

6.2 Vlastnosti oceli DOMEX 420 MC [31]

Jedná se o za tepla válcovanou ocel, kterou vyrábí švédská firma SSAB Tunnplat. Ocel se vyznačuje vysokou pevností, zaručenou mezí kluzu a dobrou tvářitelností. Tyto oceli mají jemnou strukturu, nízký obsah uhlíku a jsou mikrolegovány niobem, titanem a vanadem viz tab. 5. Označení 420 MC znamená, že ocel má zaručenou mez kluzu min. 420 MPa a zkratka MC označuje ocel určenou k tváření za studena. Chemické složení a mechanické vlastnosti materiálu Domex 420 MC viz příloha 3.

Tab. 5 Chemické složení dle katalogu SSAB [32]

C [%] max	Si [%] max	Mn [%] max	P [%] max	S [%] max	Al [%] max	Nb [%] max	V [%] max	Ti [%] max
0,100	0,030	1,5	0,025	0,010	0,015	0,090	0,200	0,150

Tab. 6 Mechanické vlastnosti dle katalogu SSAB [32]

Mez kluzu	Mez pevnosti	Tažnost min. [%]	
R _e [MPa] min.	R _m [MPa]	A ₈₀ t < 3 mm min.	A ₅ t ≥ 3 mm min.
420	480 až 620	16	20

DOMEX oceli se používají v aplikacích, jako jsou lodě, mosty, budovy, stroje, různé typy vozidel, zdvihací zařízení, nádrže a kontejnery. Díky své vysoké pevnosti umožňují snížení váhy objektu, což je obzvláště užitečné např. při výrobě koreb či kontejnerů.

6.2.1 Uhlíkový ekvivalent

Hodnoty pro výpočet uhlíkového ekvivalentu jsou uvedeny v atestu pro příslušnou tloušťku materiálu. (viz příloha 1)

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

Výpočet uhlíkového ekvivalentu podle chemického složení

$$CEV = 0,06 + \frac{0,59}{6} + \frac{0,03 + 0 + 0}{5} + \frac{0,01 + 0,04}{15} = 0,17$$

Pokud jsou splněny podmínky $CEV \leq 0,45$ hm.%, $C \leq 0,2$ hm.% a svařovaná tloušťka je menší než 25 mm, tak nejsou nutné žádné zvláštní opatření v podobě předehřevu. Je tedy patrné, že materiál Domex 420 MC má zaručenou svařitelnost.

6.3 Vlastnosti oceli DC01 [33]

Jedná se o hlubokotažnou ocel válcovanou za studena, která má lepší kvalitu povrchu, tvárnost a nižší tloušťku než plechy válcované za tepla. Vyznačuje se širokým uplatněním v oblastech automobilového průmyslu, stavebního průmyslu, k výrobě trubek, sudů a vhodnosti ke smaltování. Chemické složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v materiálových listech DC01 viz příloha 4.

Tab. 7 Chemické složení dle materiálového listu DC01 [33]

C [%] max	Si [%] max	Mn [%] max	P [%] max	S [%] max
0,120	-	0,600	0,045	0,045

Tab. 8 Mechanické vlastnosti dle materiálového listu DC01 [33]

Mez Kluzu	Mez pevnosti	Tažnost min. [%]
R_{eL} nebo $R_{p0,2}$ [MPa] max.	R_m [MPa]	$A_{80 t < 3 \text{ mm}}$ min.
280	270 až 420	28

6.3.1 Uhlíkový ekvivalent

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

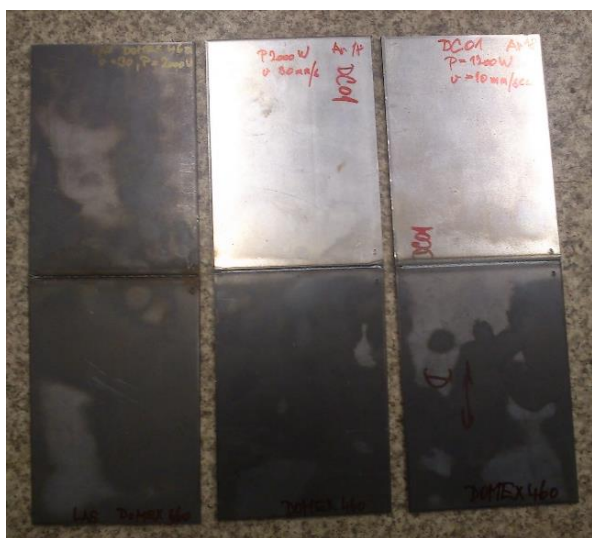
Výpočet uhlíkového ekvivalentu podle chemického složení

$$CEV = 0,12 + \frac{0,6}{6} + \frac{0 + 0 + 0}{5} + \frac{0, + 0}{15} = 0,22$$

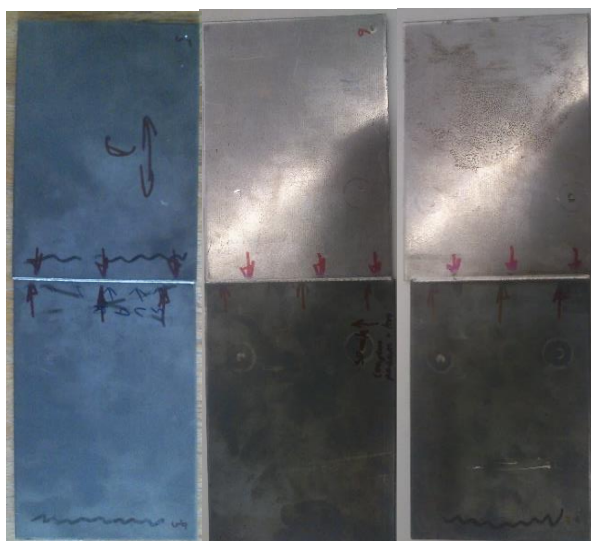
Pokud jsou splněny podmínky $CEV \leq 0,45$ hm.%, $C \leq 0,2$ hm.% a svařovaná tloušťka je menší než 25 mm, tak nejsou nutné žádné zvláštní opatření v podobě předehřevu. Je tedy patrné, že materiál DC01 má zaručenou svařitelnost stejně jako Domex 420 MC.

6.4 Metodika zkoušení

Z plátu plechu o tloušťce 3 mm došlo k nastříhání plechů na tabulových nůžkách v počtu deseti kusů z materiálu Domex 420 MC a deseti kusů z materiálu DC01. Z plechů se svařilo celkem 6 vzorků, na které bylo potřeba 8 kusů plechů z materiálu Domex 420 MC a 4 kusy plechů z materiálu DC01. Svary byly zhotoveny metodou svařování laserem (obr. 24) a metodou svařování svazkem elektronů (obr. 25). Každou metodou byly zhotoveny tři vzorky. Konkrétně jeden vzorek ze stejného materiálu Domex 420 MC a zbylé dva vzorky se skládaly z materiálu Domex a DC01. Vzorky se ovšem svařovaly s odlišnými parametry. Z každého vzorku se vyřezaly na laseru 3 zkušební tyčky pro příčnou zkoušku tahem a jeden vzorek pro metalografické zkoušky. Bylo tedy celkem zhotoveno 18 zkušebních tyčí na tahovou zkoušku a 6 metalografických vzorků.



Obr. 24 Vzorky svařené laserem



Obr. 25 Vzorky svařené svazkem elektronů

6.5 Použitá zařízení

První polovina vzorků byla svařena vláknovým laserem YLS 2000, který vyrábí firma IPG Photonics. Laser se nachází na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky a je vybaven manipulačním robotem IRB 2400-10. Druhá polovina vzorků byla svařena svazkem elektronů. Konkrétně elektronovou svářečkou Probeam K26, která je umístěna ve výzkumném a vývojovém centru NETME Centre. K nařezání zkušebních tyčí na tahovou zkoušku byl použit opět laser YLS 2000 osazen řezací hlavou.

Příčná zkouška tahem byla provedena na Ústavu strojírenské technologie VUT v Brně pomocí zkušebního stroje pro tahové zkoušky ZD 40. Měření tvrdosti proběhlo na tvrdoměru ZWICK 3212 s CCD kamerou umístěném také na Ústavu strojírenské technologie VUT v Brně.

6.5.1 Laser YLS 2000 [33]

Laser YLS 2000 je vláknový laser vyráběný firmou IPG Photonics. Jde o všestranný laser, který lze využít ve více technologických operacích. Na Ústavu přístrojové techniky v Brně lze laser osadit svařovací nebo řezací hlavou. Zdroj laserového paprsku je umístěn ve vzduchem chlazené skříni (obr. 26), která je určena a přizpůsobena do průmyslových prostor.

Technické parametry:

- výrobce: IPG Photonics (USA);
- výstupní výkon: 2 kW;
- možnost rozšíření na 4 kW;
- vlnová délka: 1070 až 1080 nm;
- účinnost: >30 %;
- režim: CW, QCW, SM;
- max. tloušťka řezu:
 - konstrukční ocel 12 mm
 - nerezová ocel 6 mm
 - mosaz 4 mm
 - hliníkové slitiny 5 mm
 - měděné slitiny 3 mm
- přesnost řezání: +/- 0,1 mm
- max. hloubka průvaru: cca 5 mm.



Obr. 26 Laser YLS 2000

6.5.2 Průmyslový robot IRB 2400-10 [34]

Jedná se o jeden z nejpoužívanějších polohovacích robotů od firmy ABB (obr. 27). Důvodem velkého rozšíření ve své třídě je jeho univerzální uplatnění v oblasti svařování, řezání, broušení, lepení, montáže, manipulace s materiálem, lakování, frézování atd. Robot nemusí být umístěn pouze vodorovně, ale umožňuje uchycení na stěnu či strop.

Technické parametry:

- výrobce: ABB;
- dosah: 1,55 m;
- zatížení: 12 kg;
- stupňů volnosti: 6;
- hmotnost: 380 kg;
- přesnost: 0,03 až 0,07 mm.



Obr. 27 Průmyslový robot IRB 2400-10

6.5.3 Svařovací zařízení Pro Beam

Probeam K26 je univerzální vakuová komora s víceosým numericky řízeným polohovacím systémem a elektronovým dělem umožňujícím horizontální i vertikální svařování (viz. obr. 28). Dále je osazen manipulátorem pro podávání drátu do prostoru svaru či návaru. Celé zařízení je ovládáno řídicím systémem Siemens Sinumerik. V možnostech zařízení je svařování běžných (oceli) i reaktivních (titan zirkon) kovů, včetně svařování dvojic materiálů jinak nesvařitelných (heterogenní svary).

Technické parametry:

- Objem komory: $2,6\text{m}^3$
- Rozměry stolu: 500 x 800 mm
- Max výška: 700 mm
- Pohyby v osách x, y: 500 x 800 mm
- Max. výkon svazku: 15kW
- Max. proud svazku: 100mA
- Urychlovací napětí: 80 až 150 kV
- Vakuum až 10^{-6} mBar



Obr. 28 Svařovací zařízení Probeam

6.5.4 Zkušební stroj ZD 40 [35]

Hydraulický zkušební stroj ZD 40 umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálu do maximálního zatížení 400 kN. Stroj je vybaven inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60. Řídicí jednotka EDC 60 je speciálně navržena pro servo-hydraulické zkušební stroje.

Naměřené hodnoty se zpracovávají na počítači, který je vybaven programem M-TEST verze 1.7. Program slouží k vyhodnocení a ke grafickému zpracování naměřených hodnot z tahové, tlakové nebo ohybové zkoušky.

Technické parametry:

- výrobce: HBM (SRN);
- měřicí rozsah: 8 až 400 kN;
- chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly
- měřicí rozsah dráhy: 0 až 280 mm;
- chyba měření dráhy: $\pm 0,01$ mm
- inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy;
- sériové rozhraní RS 232.



Obr. 29 Zkušební stroj ZD 40

6.5.5 Tvrdoměr Zwick 3212 [36]

Použitý tvrdoměr slouží pro stanovení tvrdosti podle Vickerse dle ČSN EN ISO 6507-1. Tvrdoměr je vhodný pro měření běžných ocelí, ale také velmi tvrdých materiálů. Přístrojem lze provádět zkoušku podle Brinella, při níž se vtlačuje do materiálu kulička o průměru 1 mm silou 100 N. Pro snímání a vyhodnocení je tvrdoměr připojen k PC, který je vybaven programem testXpert od firmy Zwick.

Technické parametry:

- souřadnicový stůl 200 x 200 mm
- zkušební zatížení max. 30 kg
- testovací výška 0 až 300 mm
- LED osvětlení



Obr. 30 Tvrdoměr Zwick 3212

6.5.6 Metalografický lis [37]

Jedná se o automatický zalévací lis za horka od firmy Struers, který disponuje poměrně vysokou rychlostí zhotovení vzorku. Zařízení je vybaveno hydraulickým systémem pro lisování vzorků s vysokou přesností požadovaného tlaku a teploty.

Technické parametry:

- tlak 50 až 350 bar
- teplota 120 až 180 °C
- čas zhotovení vzorku 1 až 15 min



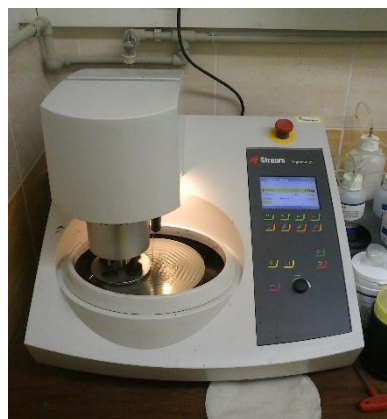
Obr. 31 Lis CitoPress-1

6.5.7 Brousící zařízení Tegramin [38]

Zařízení pro broušení a leštění metalografických vzorků se vyznačuje robustní a tuhou konstrukcí zabezpečující velmi vysokou kvalitu výbrusu spolehlivý každodenní provoz. Vysoká reprodukovatelnost výsledků je zabezpečena automatickým řízením provozu při současně pozoruhodně snadném ovládání. Zařízení má automatickou aplikaci leštících diamantových roztoků.

Technické parametry:

- průměr brousícího disku 200 mm
- počet vzorků: max. 4
- přitlačná síla vzorků: 5 až 50 N



a

Obr. 32 Brousící zařízení Tegramin

6.6 Postup svařování laserem

U plechů byla styčná plocha srovnána smirkovým plátnem, aby nevznikala mezi plechy mezera. V případě vzniku mezery mezi svařovanými díly větší jak 0,3 mm by nedošlo k natavení materiálu a tedy ani ke vzniku svaru.

Jednotlivé kusy se ustavily na stole a zajistily upínkami proti pohybu. Na jednom konci plechů se zhotovily stehové svary z důvodu, aby nedošlo k rozevření plechů při samotném svařování. Po sestehování každého kusu došlo ke svaření vzorku předem určenými parametry. Parametry se volily podle tloušťky svařovaného materiálu, aby došlo k průvaru v celé síle materiálu (viz příloha 2). Svařovací parametry pro jednotlivé kusy jsou uvedeny v tab. 9. Jako ochranný plyn byl použit argon.

Tab. 9 Parametry svařování - laser

Svar č.	Materiál	Tloušťka [mm]	Výkon laseru [W]	Svařovací rychlost [mm·s ⁻¹]	Tepelný příkon [kJ·m ⁻¹]
1	Domex - Domex	3	1200	10	96
2	Domex – DC01	3	2000	30	53,3
3	Domex – DC01	3	1200	10	96

Pozn.: $\eta=0,8$ použité výpočtové vztahy: $\frac{P}{v} \cdot \eta$

6.7 Postup svařování elektronovým svazkem

U svařování elektronovým svazkem nebyly známy svařovací parametry, a tak bylo nutné vhodné svařovací parametry zjistit na přebytečných vzorcích viz obr. 33. Svařovací rychlosti se zvolily totožné jako u svařování laserem. Obtížné ovšem bylo nalézt správnou polohu ohniska a velikost proudu svazku elektronů. Při hledání velikosti proudu svazku se vždy nastavil určitý rozsah (např. 11 až 15 mA), kdy na začátku svařování byl proud 11 mA a na konci 15 mA. Po svaření pak bylo možné sledovat, kdy došlo k průvaru materiálu viz obr. 34.



Obr. 33 Hledání svařovacích parametrů



Obr. 34 Hledání průvaru

Po nalezení optimálních svařovacích parametrů pro jednotlivé vzorky se plechy upnuly pomocí vhodných upínek a došlo ke svaření. Po svaření dvou vzorků bylo pomocí vizuální kontroly zjištěno, že svár je nadměrně propadnutý v důsledku velké svařovací mezery. Příčinou byla nedostatečná rovinnost svarových ploch, která byla docílena stejně jako u laseru smirkovým plátnem. Bylo tedy nutné svarové plochy srovnat na frézce a znovu svařit. Vhodné svařovací parametry jsou v tab. č. 10. Poloha ohniska je definována vůči povrchu a kladné hodnoty jsou nad povrchem.

Tab. 10 Parametry svařování – elektronový svazek

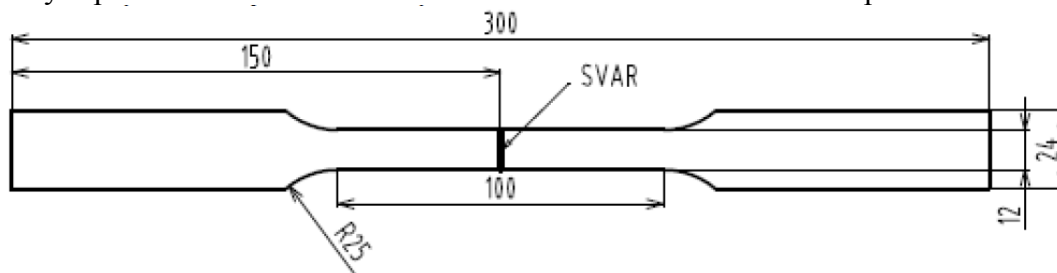
Svar č.	Materiál	Proud svazku [mA]	Poloha ohniska [mm]	Svařovací rychlost [mm·s ⁻¹]	Urychlující napětí [kV]	Oscilační frekvence [Hz]	Tepelný příkon [kJ·m ⁻¹]
4	Domex - Domex	7,9	+12,5	10	120	500	75,84
5	Domex – DC01	7,9	+12,5	10	120	500	75,84
6	Domex – DC01	14	+12,5	30	120	500	44,8

Pozn.: $\eta=0,8$

použité výpočtové vztahy: $\frac{P}{v} \cdot \eta$

6.8 Příprava vzorků

Vzorky pro příčnou tahovou zkoušku byly vyřezány na vláknovém laseru umístěném na Ústavu přístrojové techniky v Brně. Jedná se o stejný stroj, kterým byly svařeny první tři vzorky. Došlo pouze k záměně svařovací hlavy za řezací hlavu. Tvar a rozměry vzorů byly voleny podle ČSN EN 895 v závislosti na tloušťce plechu viz obr. 35.



Obr. 35 Rozměr vzorku pro příčnou tahovou zkoušku

Vzorky pro metalografické zkoušky byly vystřiženy ze zbytků, které zůstaly po vyřezání vzorků pro příčnou tahovou zkoušku viz obr. 36. Vystřižené vzorky byly zality do pryskyřice na stroji CitoPress-1 viz kapitola 6.5.6 a následně vybroušeny a vyleštěny. Pro lepší viditelnost svarů následně naleptány 2% Nitalem.



Obr. 36 Zbytek materiálu po vyřezání vzorků

6.9 Příčná tahová zkouška

Tahová zkouška byla provedena na stroji ZD 40, jehož podrobné technické informace jsou uvedeny v kapitole 6.5.4. Před začátkem zkoušky bylo nutné určit předběžnou zatěžující sílu z průřezu zkušební tyče viz tab. 11.

Tab. 11 Síly potřebné pro tahovou zkoušku.

Tl. plechu a [mm]	Šířka plechu b [mm]	Průřez S_0 [mm ²]	Mez Pevnosti R_m [MPa]	Síla F [N]
3	12	36	600	21600
3	12	36	290	10440

Použité výpočtové vztahy: $F = R_m \cdot S_0$ [N], $S_0 = a \cdot b$ [mm²]

Na základě těchto parametrů byla zvolena rychlost zkoušení 500 MPa/min pro všechny vzorky. Vzorky byly upnuty ve stroji za pomoci kleštin viz obr. 37.



Obr. 37 Upnutí vzorků do kleštin

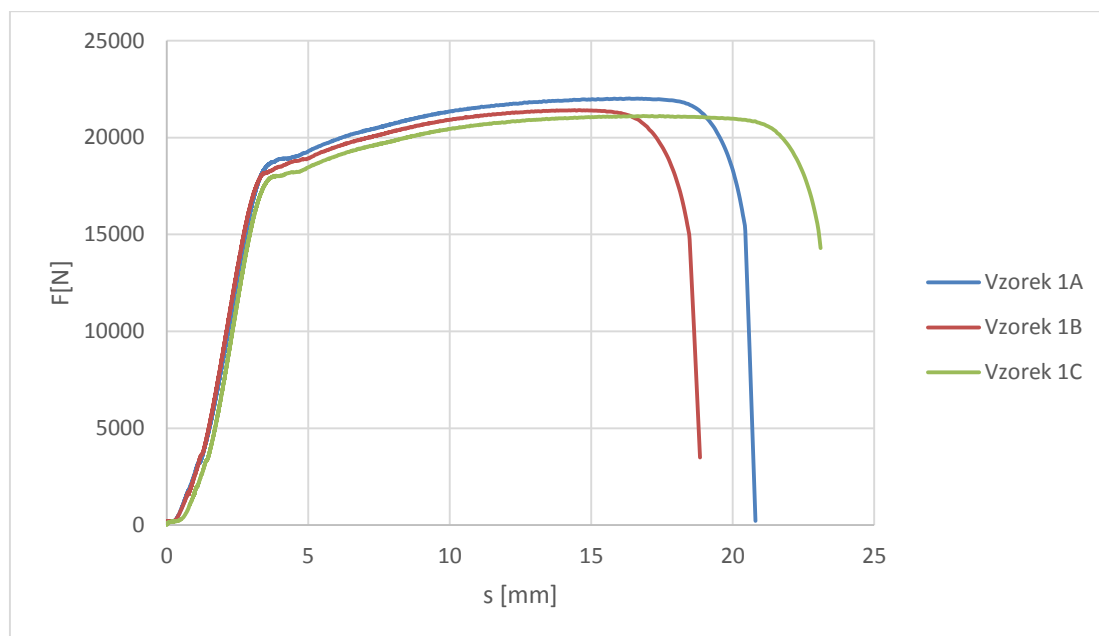
6.9.1 Metoda svařování laserem

- Svařovaný materiál Domex 420 – Domex 420, svařovací rychlost 10 m/s

U všech tří vzorků došlo k lomu mimo svár, lze je tedy vyhodnotit svary jako kvalitně provedené s dobře zvolenými svařovacími parametry. Naměřené hodnoty jsou vlastnostmi základního materiálu.

Tab. 12 Naměřené hodnoty: Výkon laseru 1200 W, rychlost svařování 10 m/s

Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	S ₀ [mm ²]	F _m [N]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
1A	3	12,3	36,9	22016,8	505,15	596,66	13,75
1B	3	12	36	21414,8	504,46	594,86	15
1C	3	11,7	35,1	21114	509,36	601,54	20



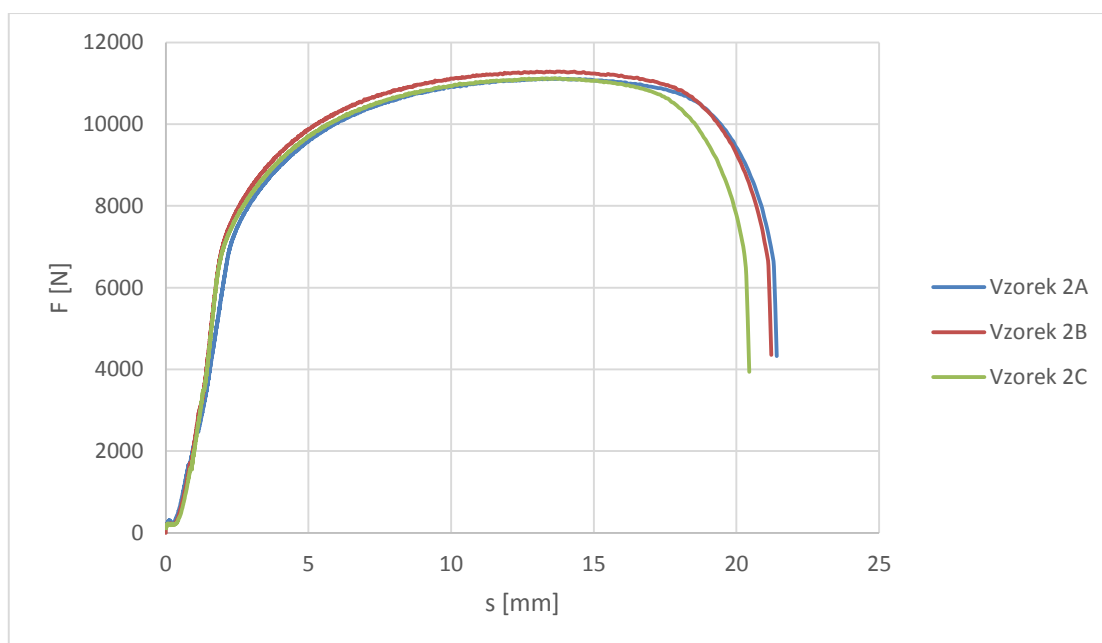
Obr. 38 Tahový diagram pro Domex – Domex, P = 1200 W

- Svařovaný materiál Domex 420 – DC01, svařovací rychlost 30 m/s

K přetržení došlo u všech tří vzorků v základním materiálu DC01. Svary lze vyhodnotit jako dobře provedené se správně zvolenými svařovacími parametry. Naměřené hodnoty jsou vlastnostmi základního materiálu.

Tab. 13 Naměřené hodnoty: Výkon laseru 2000 W, rychlost svařování 30 m/s

Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	S_0 [mm ²]	F_m [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
2A	3	11,6	34,8	11116,4	227,29	319,44	20
2B	3	11,75	35,25	11285,6	224,65	320,16	18,75
2C	3	11,75	35,25	11126	219,31	315,63	18,75



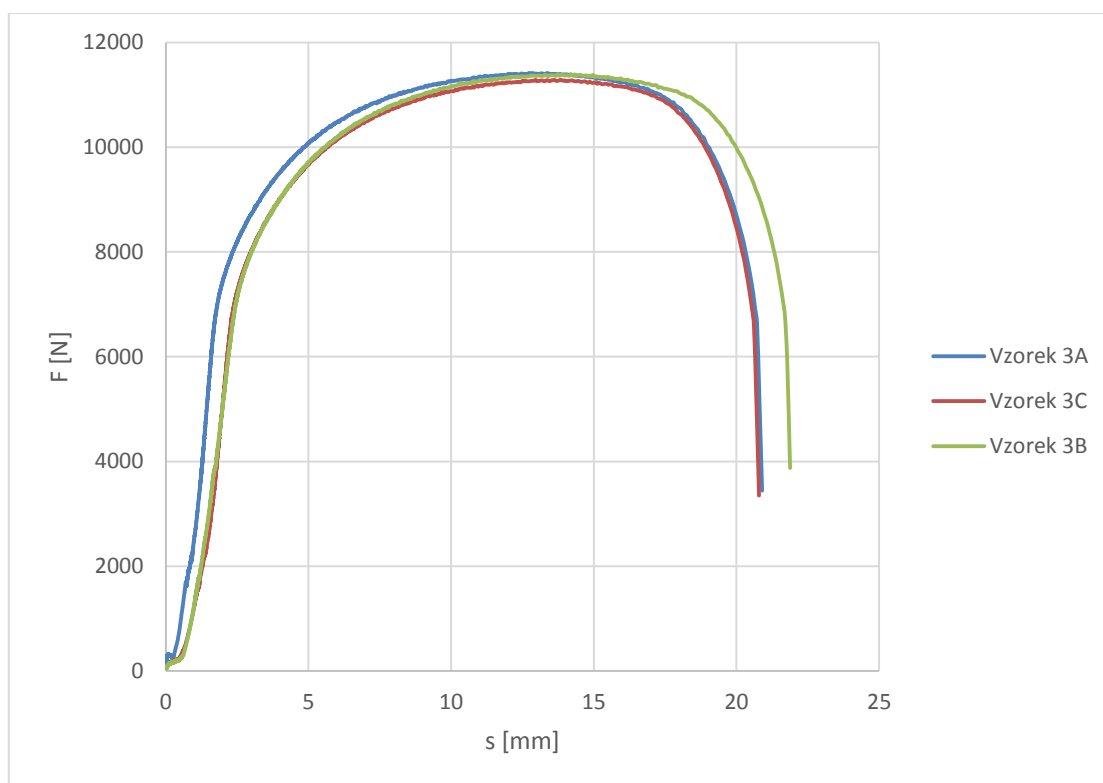
Obr. 39 Tahový diagram pro Domex – DC01, P = 2000 W

- Svařovaný materiál Domex 420 – DC01, svařovací rychlost 10 m/s

K přetržení došlo u všech tří vzorků v základním materiálu DC01. Svary lze vyhodnotit jako dobře provedené se správně zvolenými svařovacími parametry. Naměřené hodnoty jsou vlastnostmi základního materiálu.

Tab. 14 Naměřené hodnoty: Výkon laseru 1200 W, rychlost svařování 10 m/s

Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	S_0 [mm ²]	F_m [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
3A	3	12	36	11417,6	222,84	317,16	18,75
3B	3	11,9	35,7	11389,2	226,82	319,03	20
3C	3	11,85	35,55	11285,6	223,81	317,46	20



Obr. 40 Tahový diagram pro Domex – DC01, P = 1200 W

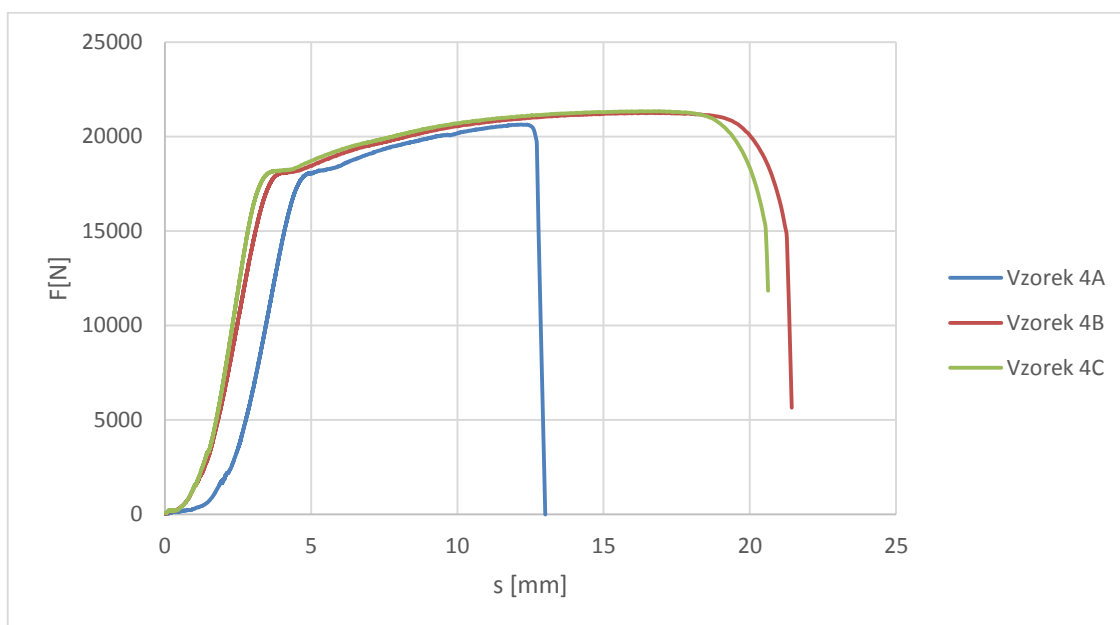
6.9.2 Metoda svařování elektronovým svazkem

- Svařovaný materiál Domex 420 – Domex 420, svařovací rychlost 10 m/s

U prvního vzorku (4A) došlo k porušení v tepelně ovlivněné oblasti v blízkosti svaru. K porušení došlo až za mezi kluzu. U zbylých dvou svár nebyl porušen a k přetržení vzorku došlo v základním materiálu. Svary 4B a 4C můžeme vyhodnotit jako dobře provedené se správně zvolenými svařovacími parametry.

Tab. 15 Naměřené hodnoty: Proud svazku 7,9 mA, rychlost svařování 10 m/s

Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	S ₀ [mm ²]	F _m [N]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
4A	3	11,85	35,55	20634,4	506,35	580,43	20
4B	3	11,8	35,4	21245,6	507,44	600,16	18,75
4C	3	11,85	35,55	21349,2	508,21	600,54	18,75



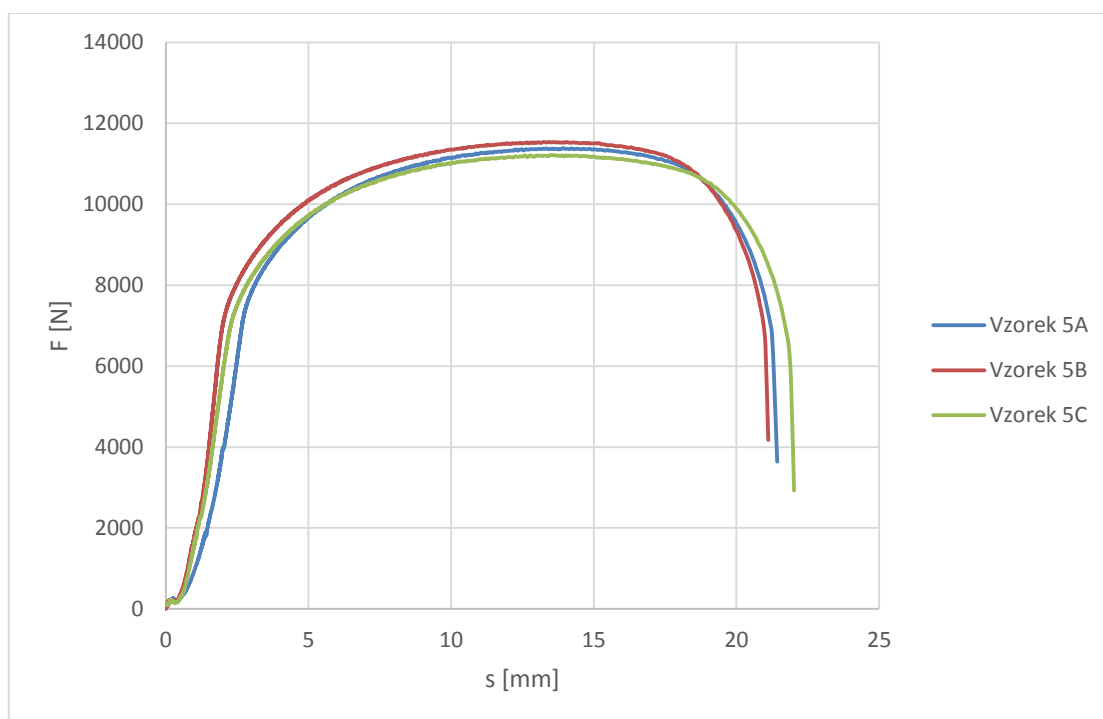
Obr. 41 Tahový diagram pro Domex – Domex, proud svazku 7,9 mA

- Svařovaný materiál Domex 420 – DC01, svařovací rychlost 10 m/s

K přetržení došlo u všech tří vzorků v základním materiálu DC01. Svary lze vyhodnotit jako dobře provedené se správně zvolenými svařovacími parametry. Naměřené hodnoty jsou vlastnostmi základního materiálu.

Tab. 16 Naměřené hodnoty: Proud svazku 7,9 mA, rychlost svařování 10 m/s

Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	S_0 [mm ²]	F_m [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
5A	3	11,75	35,25	11389,2	235,05	323,10	18,75
5B	3	12	36	11539,6	226,23	320,54	18,75
5C	3	11,6	34,8	11220	231,33	322,41	20



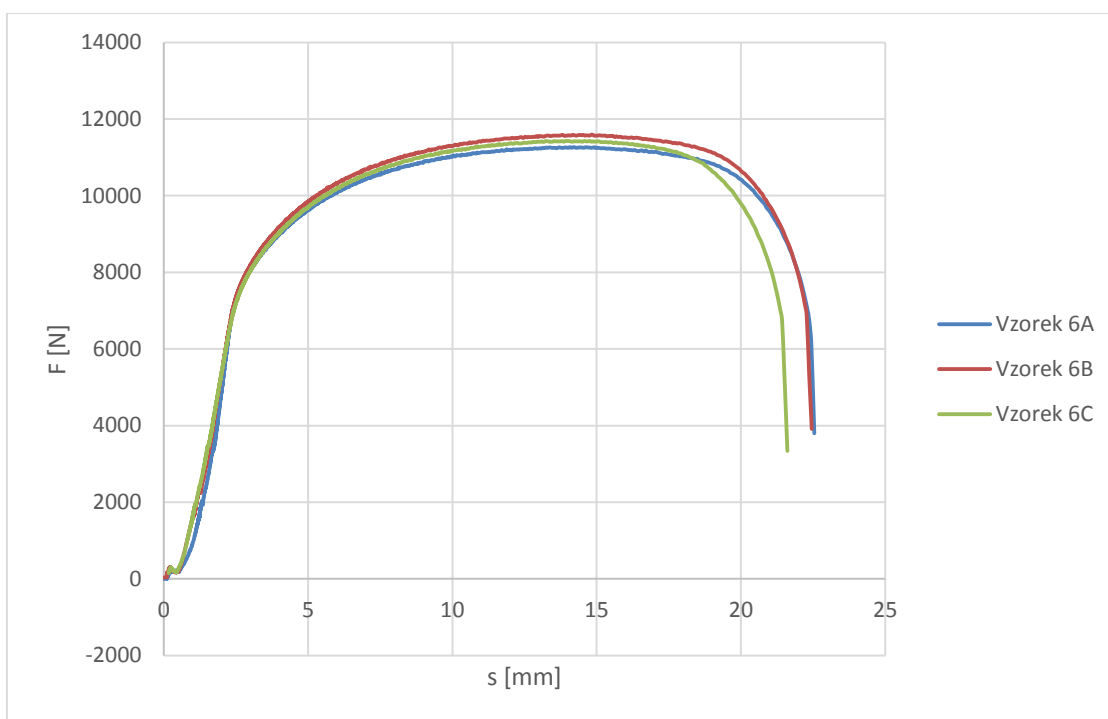
Obr. 42 Tahový diagram pro Domex – DC01, proud svazku 7,9 mA

- Svařovaný materiál Domex 420 – DC01, svařovací rychlost 30 m/s

K přetržení došlo u všech tří vzorků v základním materiálu DC01. Svary lze vyhodnotit jako dobře provedené se správně zvolenými svařovacími parametry. Naměřené hodnoty jsou vlastnostmi základního materiálu.

Tab. 17 Naměřené hodnoty: Proud svazku 14 mA, rychlost svařování 30 m/s

Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	S ₀ [mm ²]	F _m [N]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
6A	3	11,6	34,8	11266,8	230,53	323,76	21,25
6B	3	12	36	11596	229,38	322,11	21,25
6C	3	11,8	34,4	11426,8	231,13	322,79	21,25



Obr. 43 Tahový diagram pro Domex – DC01, proud svazku 14 mA

6.9.3 Zhodnocení příčné zkoušky tahem

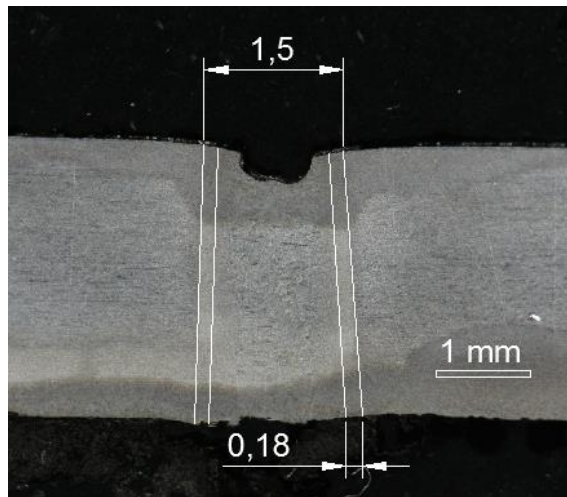
Z příčné zkoušky tahem je patrné, že pouze v jediném případě došlo k lomu v tepelně ovlivněné oblasti svaru. Jednalo se o vzorek z materiálu Domex 420 svařený elektronovým svazkem. Protože všechny tři vzorky byly svařeny na jeden závar a pouze jediný praskl v TOO, lze se tedy domnívat, že se pravděpodobně jednalo o neprůvar.

Tažnost A₈ je u obou metod svařování téměř totožná. Pouze u vzorku 1A a 1B je výrazněji nižší, ale tato odlišnost je způsobena tím, že se vzorky přetrhly mimo rysky (téměř u čelistí stroje).

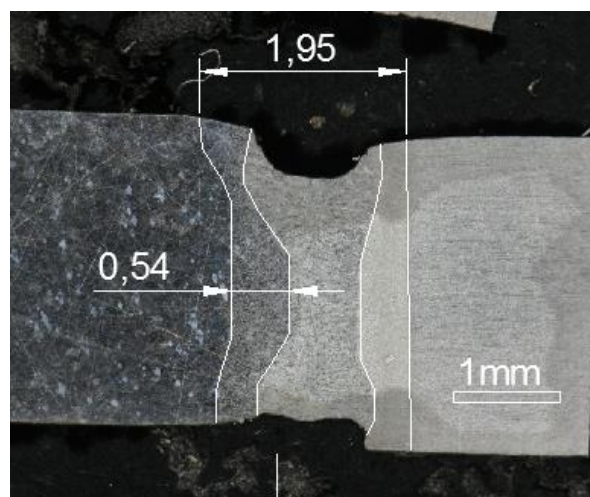
6.10 Makroskopické zkoušky

Zkouška makrostruktury byla provedena na Ústavu přístrojové techniky v Brně. Makroskopické zkoušky byly využity k vyhodnocení velikostí jednotlivých částí svarového spoje pomocí programu AutoCAD 2014. Vyhodnocení případných vad dle ČSN EN ISO 13919-1.

6.10.1 Makrostruktury pro metodu svařování laserem



Obr. 44 Materiál Domex - Domex, rychlost svařování 10 m/s, P = 1200 W

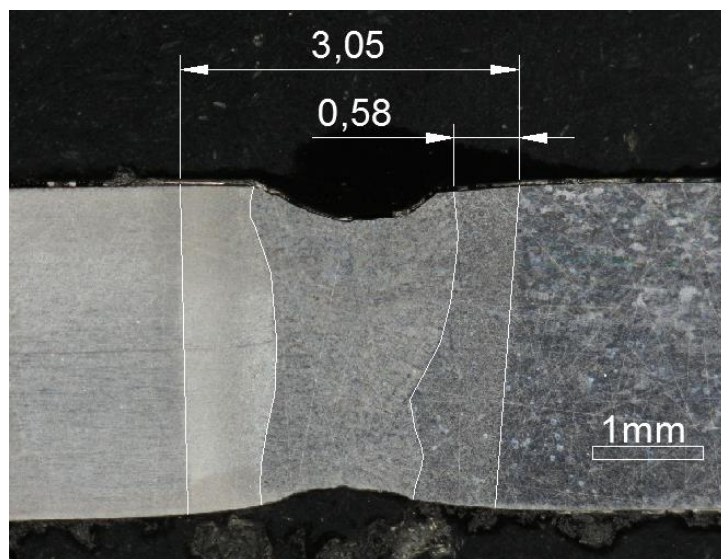


Obr. 45 Materiál DC01 – Domex, rychlost svařování 30 m/s, P = 2000 W

Na obrázku 44 je makrostruktura svaru materiálu Domex 420 – Domex 420, kde lze pozorovat, že materiál není lineárně přesazený. Lze vidět mírné zhrubnutí zrna a výrazný propad v oblasti svarového kovu. Všechny tyto vady jsou přípustné.

Na obrázku 45 je svařený materiál DC01 a Domex 420 rychlostí 30 m/s. Lze pozorovat lineární přesazení svařovaného materiálu. Dále lze vidět propadlý svár ve svarovém kovu a také lehce v kořenu svaru. Všechny tyto vady jsou přípustné. Rozdílnost tepelně ovlivněných oblastí je pravděpodobně způsobena svařováním odlišných materiálů.

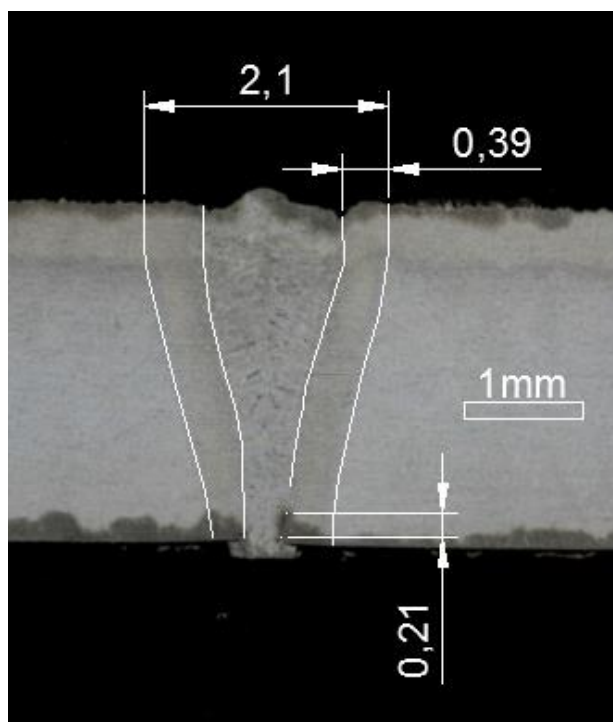
Na obrázku 46 je svařený materiál Domex 420 a DC01 rychlostí 10 m/s. Lze pozorovat, že velikost svaru je o třetinu větší a tedy i tepelně ovlivněná oblast je větší, než při svařování vyšší rychlostí a vyšším výkonem laseru. Svár je propadený ve svarovém kovu a rozdílnost TOO je způsobena svařováním odlišných materiálů. Všechny tyto vady jsou přípustné.



Obr. 46 Materiál Domex - DC01, svařovací rychlost 10 m/s

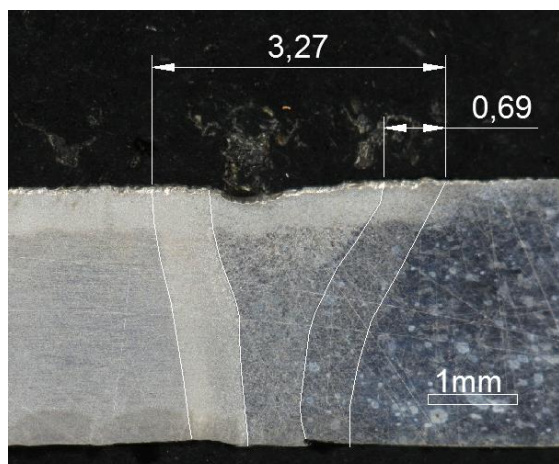
6.10.2 Makrostruktury pro metodu svařování svazkem elektronů

Na obrázku 47 je svařený materiál Domex 420. Svařovaný materiál není lineárně přesazen. Došlo k nadměrnému propadu svarového kovu v kořenu svaru, který je ještě přípustný. Nepřípustný je ovšem studený spoj, který zapříčinil lom v tepelně ovlivněné oblasti před mezí pevnosti. Velikost studeného spoje je přibližně 0,21 mm.

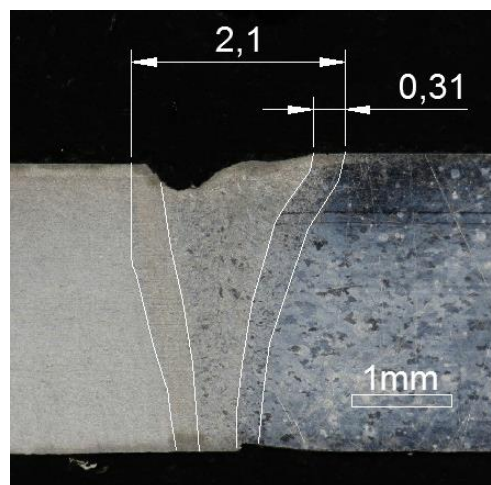


Obr. 47 Materiál Domex - Domex, svařovací rychlost 10m/s

Na obrázku 48 je svařen materiál Domex 420 a DC01 rychlostí 10 m/s a je patrné, že velikost svaru a tepelně ovlivněné oblasti je větší než při svažování rychlostí 30 m/s viz. obr. 49. Oba vzorky nejsou lineárně přesazeny ani nemají propadlý kořen svaru.



Obr. 48 Materiál Domex - DC01, svařovací rychlost 10m/s



Obr. 49 Materiál Domex - DC01, svařovací rychlost 30m/s

6.11 Mikroskopické zkoušky

Mikroskopické zkoušky byly provedeny na konfokálním mikroskopu Olympus Lext 3100 umístěném na Ústavu přístrojové techniky v Brně. Na následujících obrázcích lze pozorovat jemnozrnnou strukturu materiálu Domex 420. V první tepelně ovlivněné oblasti (TOO) dochází k zjemnění struktury základního materiálu. S přibližováním se ke svarovému kovu dochází k postupnému hrubnutí zrna v TOO. Svarový kov je tvořen feritem a perlitem.

6.11.1 Mikrostruktura pro metodu svařování laserem

Pro vyhodnocení mikrostruktury byl vybrán vzorek č. 3, jedná se o materiál Domex 420 a DC01 svařovaný rychlostí 10 m/s. Byly pořízeny 4 snímky přechodových oblastí viz. obr. 50.

Přechodová oblast TOO - svarový kov



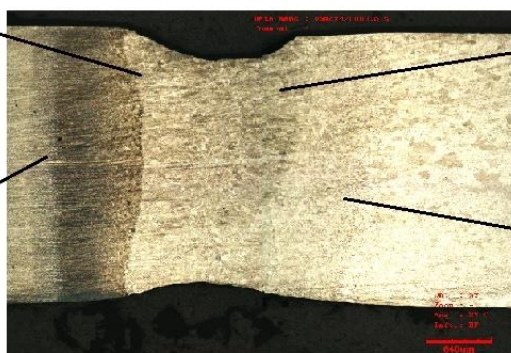
Přechodová oblast Domex - TOO



Přechodová oblast svarový kov - TOO

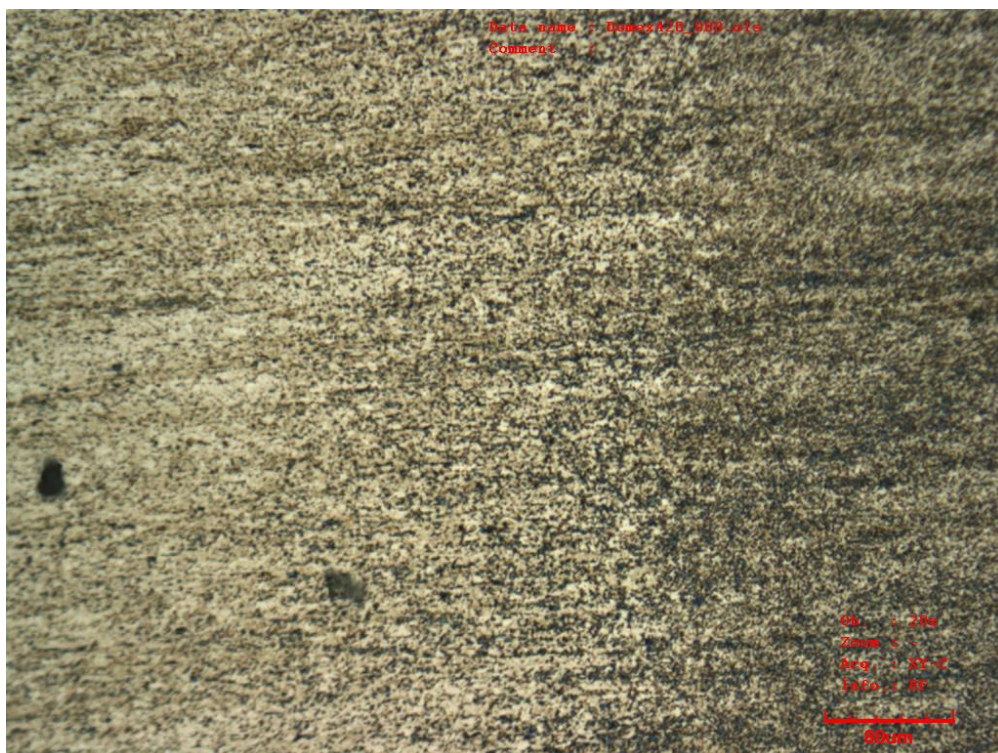


Přechodová oblast TOO - DC01



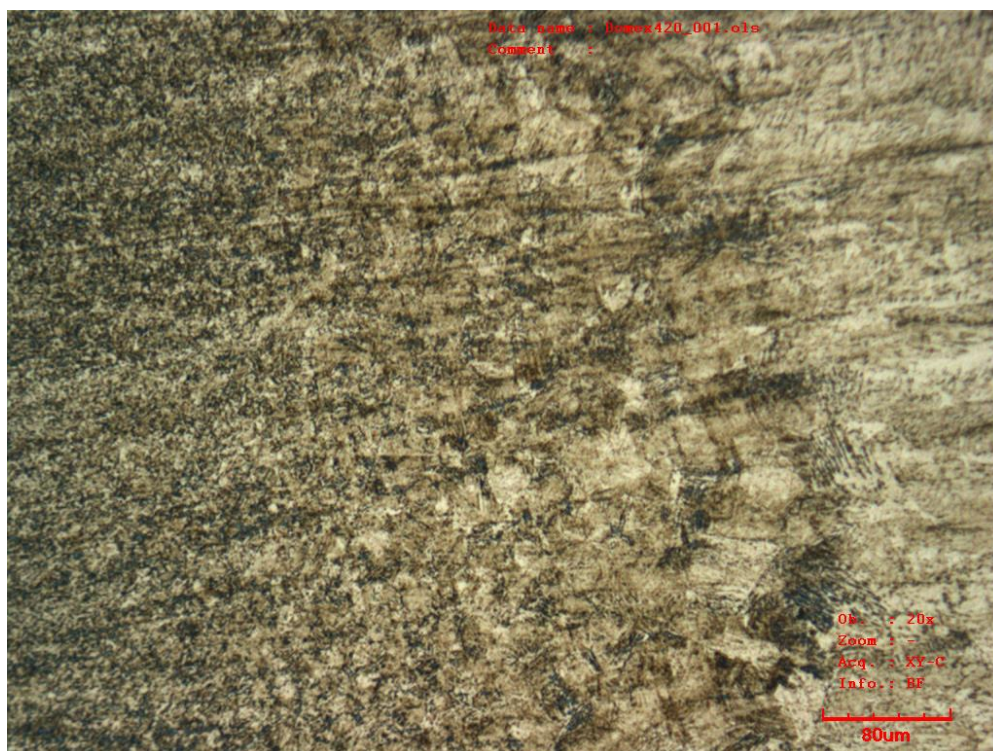
Obr. 50 Místa snímků mikrostruktury

Na obr. 51 lze vidět bainiticko-martenzitickou strukturu a v TOO bainitickou.



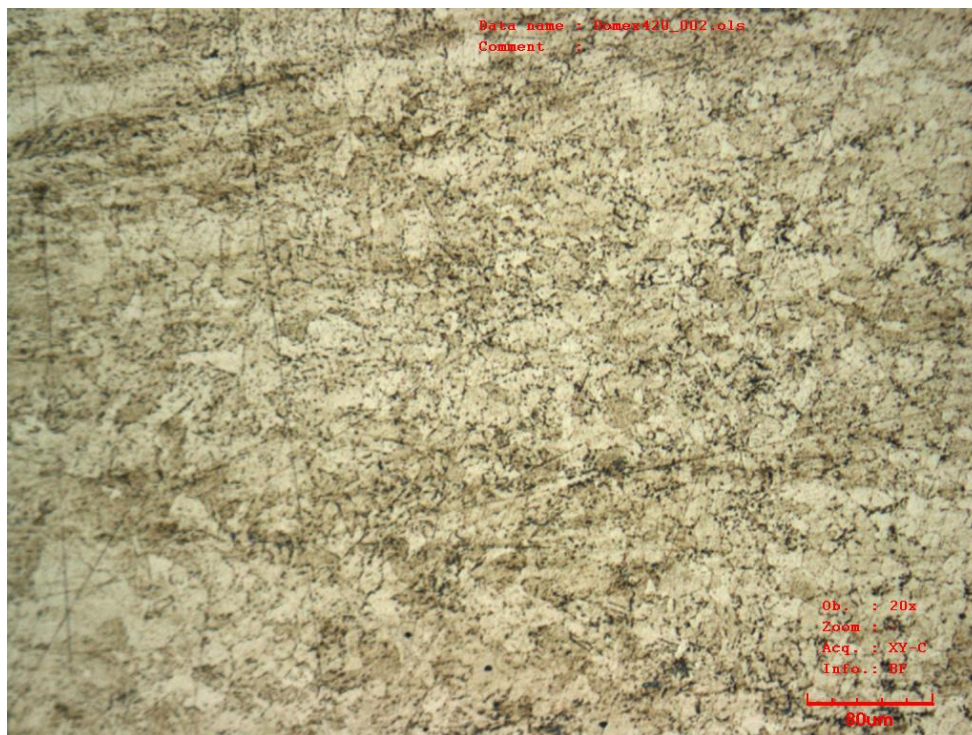
Obr. 51 Mikrostruktura přechodové oblasti Domex 420 – TOO

Na obr. 52 lze vidět jemná zrna bainitu.



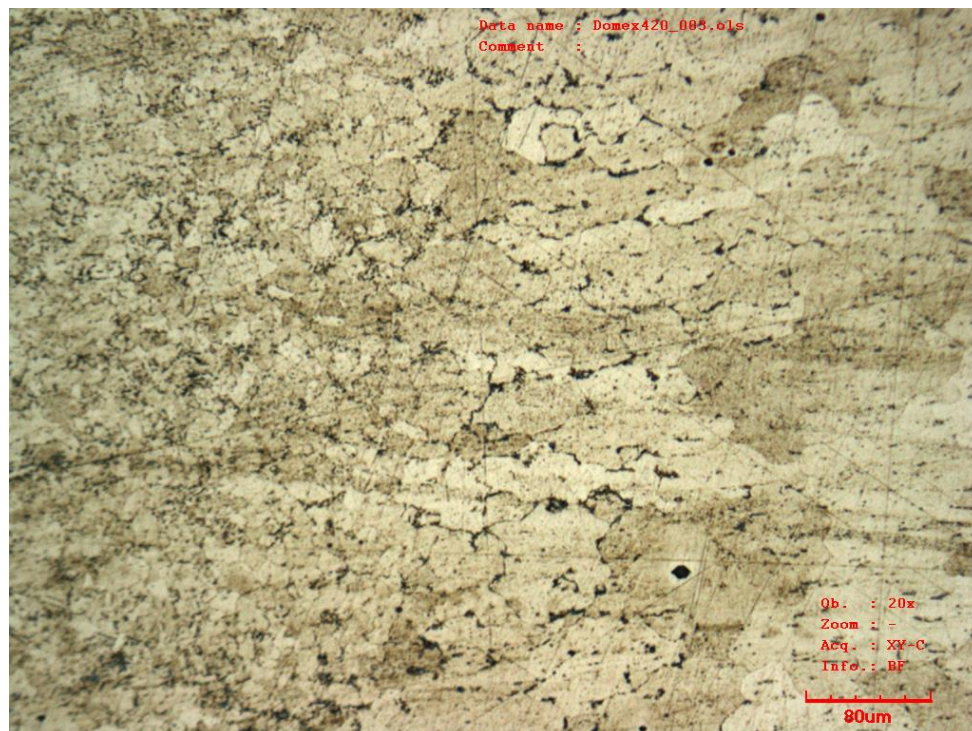
Obr. 52 Mikrostruktura přechodové oblasti TOO – svarový kov

Na obr. 53 lze vidět bainiticko-martenzitickou strukturu. TOO oblast, která vlivem velkého vneseného tepla hrubne, dále bainit s místy pozorovatelnou Widmannstättenovou morfologií.



Obr. 53 Mikrostruktura přechodové oblasti svarový kov – TOO

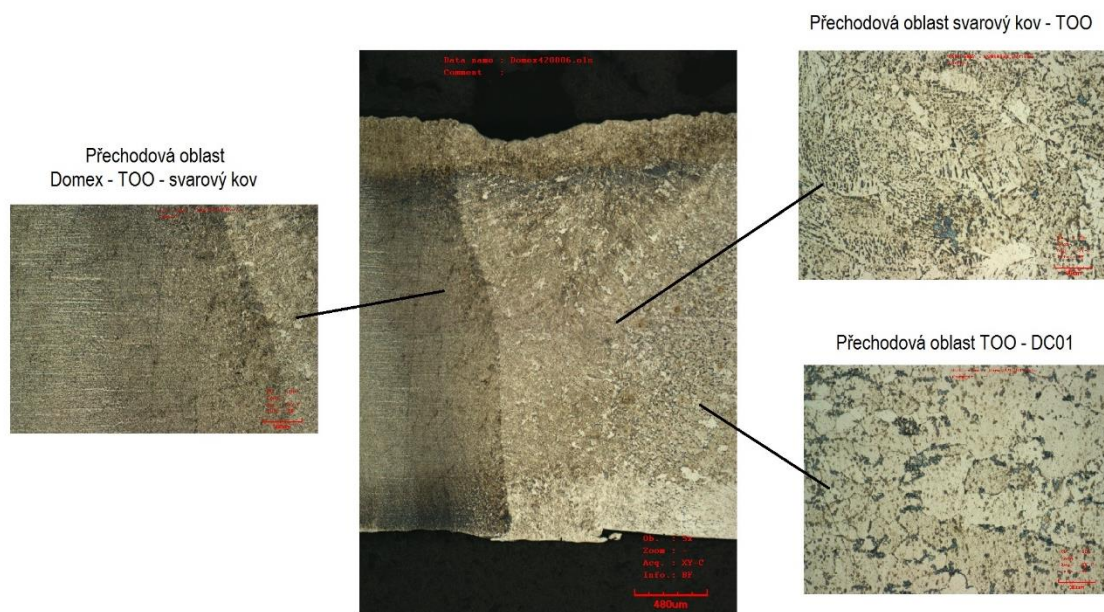
Na obr. 54 je jemná bainitická struktura, která vlivem velkého vneseného tepla začala hrubnout.



Obr. 54 Mikrostruktura přechodové oblasti TOO – DC01

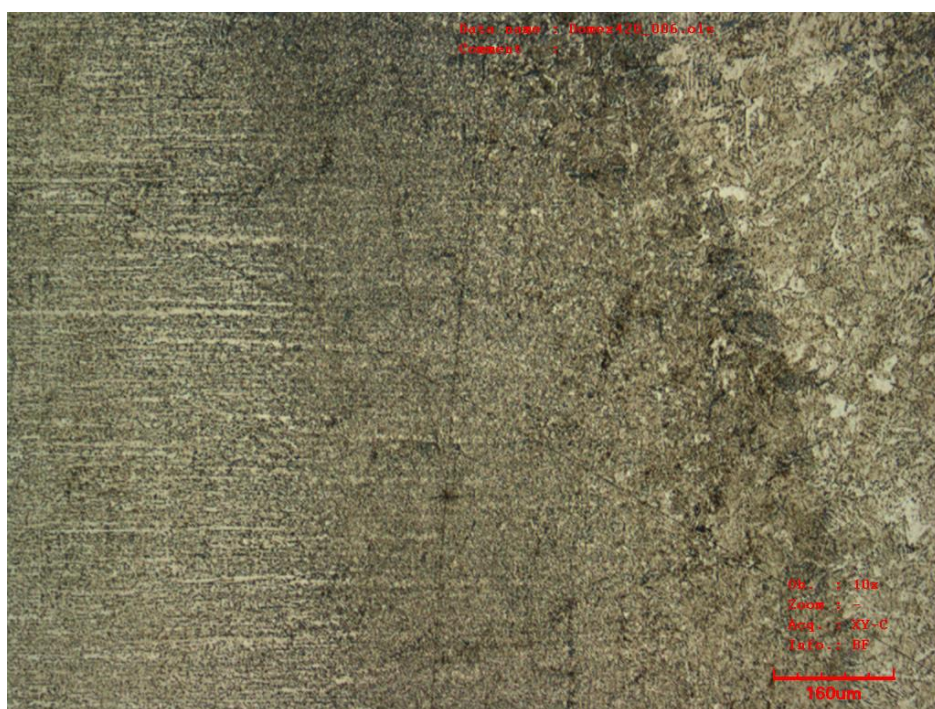
6.11.2 Mikrostruktura pro metodu svařování elektronovým svazkem

Pro vyhodnocení mikrostruktury byl vybrán vzorek č. 5 svařovaný rychlostí 10 m/s. Svařovacím materiálem byl Domex 420 a DC01. Byly pořízeny celkem tři snímky z přechodových oblastí viz. obr. 55.



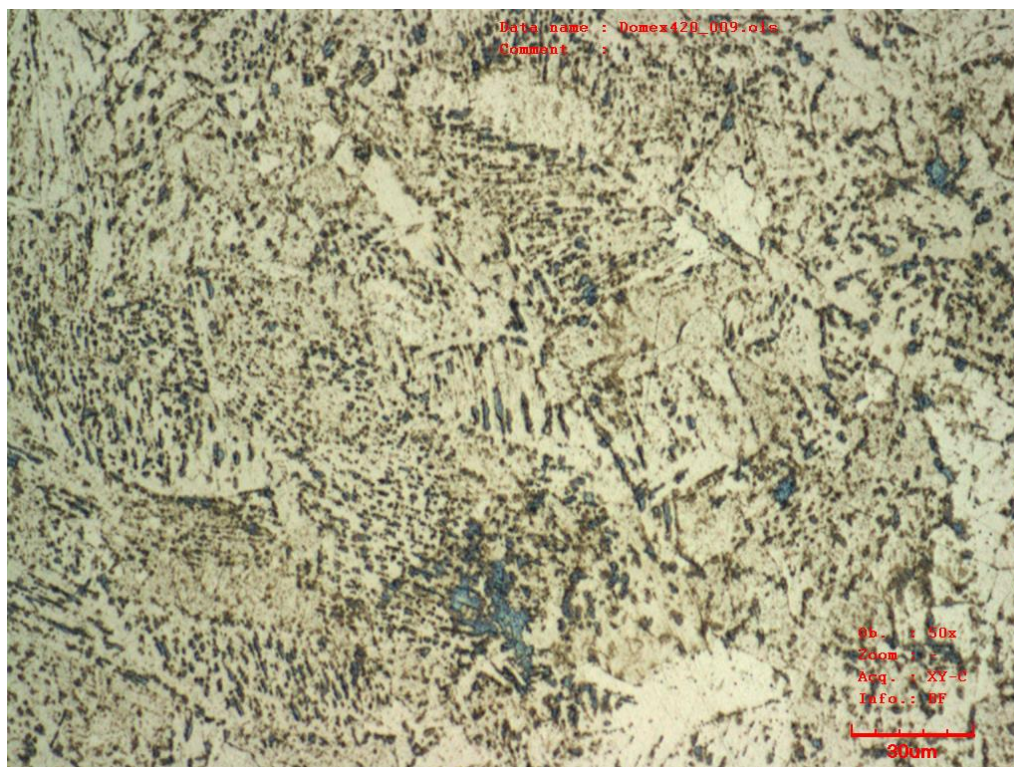
Obr. 55 Místa snímků mikrostruktury

V levé části obr. 56 lze vidět jemnou feriticko-karbidickou strukturu (bainit) základního materiálu, dále jemnozrnnou TOO přecházející v hrubozrnnou vlivem velkého vneseného tepla. Svarový kov feriticko-karbidický s nežádoucí Widmannstättenovou morfologií, která vede k horším plastickým vlastnostem.



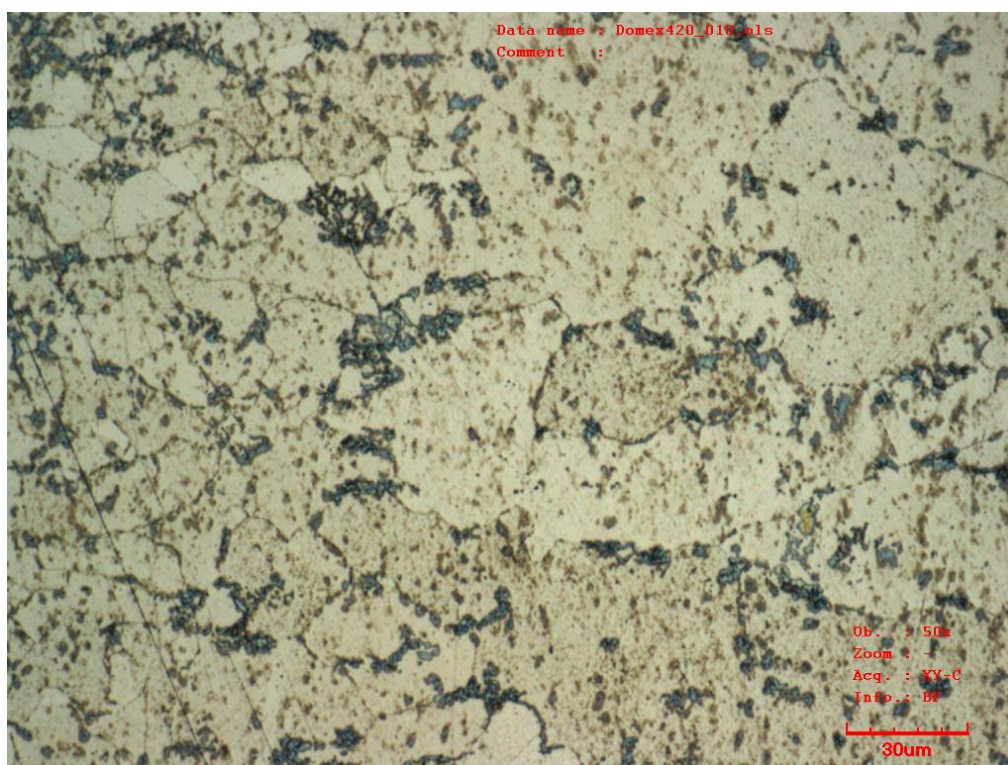
Obr. 56 Mikrostruktura přechodové oblasti, Domex – TOO – svarový kov

Na obrázku 57 vidíme bainitickou strukturu.



Obr. 57 Mikrostruktura přechodové oblasti, svarový kov – TOO

Na obr. 58 lze vidět hrubnutí původní bainitické struktury.



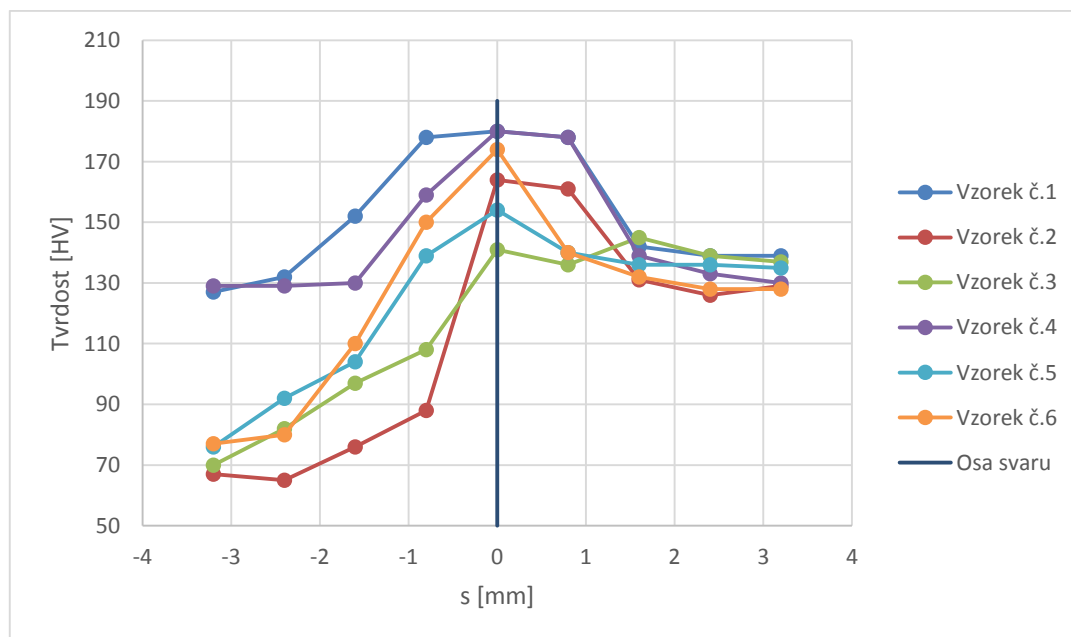
Obr. 58 Mikrostruktura přechodové oblasti TOO – DC01

6.12 Zkouška tvrdosti

Zkouška tvrdosti byla provedena na tvrdoměru Zwick 3212 umístěném na Ústavu strojírenské technologie FSI v Brně dle normy ČSN EN ISO 6507-1. Podrobné informace o přístroji viz kapitola 6.5.5. Na každém vzorku bylo provedeno 9 vtisků při zatížení 5 kg. Vzdálenost mezi jednotlivými vtisky byla 0,8 mm. Tvrdost byla měřena od středu svaru na obě strany přes TOO až do základního materiálu. Naměřené hodnoty lze vidět v tabulce 18 a vyhodnocení naměřených tvrdostí na obr. 59.

Tab. 18 Naměřené hodnoty tvrdosti

	Tvrdost HV								
Vzorek č.1	127	132	152	178	180	178	142	139	139
Vzorek č.2	67	65	76	88	164	161	131	126	129
Vzorek č.3	70	82	97	108	141	136	145	139	137
Vzorek č.4	129	129	130	159	180	178	139	133	130
Vzorek č.5	76	92	104	139	154	140	136	136	135
Vzorek č.6	77	80	110	150	174	140	132	128	128



Obr. 59 Tvrdost

6.13 Technickoekonomické zhodnocení

Srovnání bylo provedeno pro svařování laserem a pro svařování elektronovým svazkem na základě pořizovací ceny zařízení, příkonu zařízení, ceny elektrické energie, servisu zařízení, ochranné atmosféry a v neposlední řadě mzdy operátora. Na základě výpočtu hodinové sazby se pak stanovila cena svaru pro určitou svařovací rychlost a cena svaření jednoho vzorku pro danou rychlost.

Jednotlivé výpočty hodinových sazeb:

- Společné hodnoty
 - 50 týdnů/rok
 - 3 směny
 - 5 dní/týden
 - 6000 celkem hodin/rok
 - 5 let doba odpisů
- Výpočet hodinové sazby pro svařování laserem

Tab. 19 Výpočet hodinové sazby pro laser

	cena jednotková		
odpisy	9000000	30000	300
elektrická energie	2,50/kWh	příkon 40	100
Ochranný argon	160 Kč/m ³	1,2 m ³ /hod	192
Stlačený vzduch	0,5 Kč/m ³	5Nm ³	3
Mzda operátora	180 Kč/hod	32% odvody	238
Spotřební díly	50000 Kč/rok		8
Servis	50000 Kč/rok		8
CELKEM			848
Režie		200%	1697
Zisk		10%	1867

- Výpočet hodinové sazby pro svařování elektronovým svazkem

Tab. 20 Výpočet hodinové sazby pro elektronový svazek

	cena jednotková		
odpisy	30000000	30000	1000
elektrická energie	2,50/kWh	příkon 16,5	42
Stlačený vzduch	0,5 Kč/m ³	5Nm ³	3
Mzda operátora	180 Kč/hod	32% odvody	238
Spotřební díly	40000 Kč/rok		7
Servis	50000 Kč/rok		8
CELKEM			1297
Režie		200%	2594
Zisk		10%	2854

Tab. 21 Cena 1 m svaru

Metoda svařování	Svařovací rychlost [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	Cena 1 hodiny [Kč]	Cena svaření 1 m [Kč]	Cena svaření jednoho vzorku [Kč]
Laser	10	1867	51,9	5,19
Laser	30	1867	17,3	1,73
Elektronový svazek	10	2854	79,3	7,93
Elektronový svazek	30	2854	26,4	2,64

Cena svaření jednoho metru vychází přibližně o necelé dvě třetiny draž u metody svařování elektronovým svazkem. Metoda svařování elektronovým svazkem je navíc náročná na přípravu svarových ploch. Pokud svařujeme po jednotlivých kusech, musíme počítat s časovou náročností vakuování pracovní komory. Pro stroj Probeam K26 o velikosti pracovní komory $2,6\text{ m}^3$ trvá vyvakuování přibližně 10 minut.

ZÁVĚRY

V teoretické části diplomové práce jsou shrnuty základní fyzikální principy laseru a elektronového svazku. Je zde popsáno jejich hlavní uplatnění ve strojírenství, tepelném zpracování, dělení materiálu a především svařování. V experimentální části práce jsou analyzovány svary vytvořené pomocí vysokoenergetických metod svařování prostřednictvím různých destruktivních zkoušek jako např. příčná zkouška tahem, zkouška makrostruktury a mikrostruktury a také zkouška tvrdosti podle Vickerse. Základním materiálem pro svařování byla zvolena vysoko pevnostní ocel Domex 420 MC a hlubokotažná ocel DC01. Oba materiály jsou určené k tváření za studena a mají zaručenou svařitelnost.

Příčná zkouška tahem prokázala vysokou kvalitu svarů, a tedy dobře zvolené svařovací parametry. U zkoušky tahem došlo pouze v jediném případě k porušení svaru v tepelně ovlivněné oblasti. K porušení došlo u vzorku svařovaného elektronovým svazkem a až za mezí kluzu, což je stále dobrý výsledek. Důvodem porušení byl studený svar, který byl zjištěn již při makroskopické zkoušce. Všechny zbylé vzorky praskly v základním materiálu, a tedy průběhy všech zbylých vzorku vypovídají o vlastnostech základního materiálu. Další provedenou zkouškou byla zkouška makrostruktury, pomocí níž byly vyhodnoceny rozměry svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti. Rozměry svarů a tepelně ovlivněné oblasti byly nepatrně menší u metody svařování laserem. Výraznější změny velikosti tepelně ovlivněné oblasti byly způsobeny změnou svařovací rychlosti, kdy při svařovací rychlosti 10 mm/s byla tepelně ovlivněná oblast o jednu třetinu větší než při svařování rychlostí 30 mm/s a to u obou metod. Při hodnocení mikrostruktury bylo zjištěno, že svarový kov i tepelně ovlivněná oblast je převážně tvořena fetiticko-karbidickou strukturou (bainit).

Z ekonomického hlediska při svařování ocelí s odlišnými vlastnostmi vychází lépe metoda svařování laserem. Důvodem je především nákladnost přípravy svarových ploch u metody svařování elektronovým svazkem a také časová náročnost na vakuování komory. Nesmíme opomenout ani několikanásobně vyšší pořizovací náklady na svařovací zařízení elektronovým svazkem. Elektronové svařování se využívá především při svařování úplně odlišných materiálů, které nejsou možné svařit jinými metodami nebo při svařování tlustých materiálů.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- 1 KOLLENEROVÁ, *Svařování jemnozrnných ocelí typu DOCOL vláknovým Yb:YAG laserem* [online]. Brno, 2013 [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65569. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
- 2 ČÍP, T. *Svařování vysokopevnostních ocelí laserem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 107 s. Vedoucí diplomové práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D. Dostupný z WWW: <ust.fme.vutbr.cz/tvareni/publikace>.
- 3 Rozdělení laserů. *Centrum laserových a automatizačních technologií* [online]. 2000, 2015 [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/rozdeleni-laseru>
- 4 NĚMEČEK, Tomáš. *Svařování jemnozrnných ocelí typu DOMEX vláknovým YbYAG laserem*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
- 5 LEIDORF, M. *Srovnání svarů vytvořených CO2 laserem a vláknovým laserem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 48 s. Vedoucí diplomové práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
- 6 Lasery info learning. *Leonardo technology* [online]. 2005, 2013 [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/cs/znaceni-laserem-solaris/lasery-info-learning?start=12>
- 7 Plynové lasery. *Lasery* [online]. 2011, 2013 [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: http://lasery.wz.cz/plynove_lasery.html
- 8 Hlavní typy laserů v průmyslové praxi. *Průmyslové spektrum* [online]. 2012 [cit. 2015-04-02]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>
- 9 Kalení laserem urychluje výrobu součástí a nástrojů: Kalení laserem. *Průmyslové spektrum* [online]. 2011 [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/kaleni-laserem-urychluje-vyrobu-soucasti-a-nastroju.html>
- 10 Laserové kalení. *Trumpf* [online]. 2015 [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/obrabeni-povrchu/laserove-kaleni.html>
- 11 NĚMEČEK. *Využití laseru v průmyslu: Materiálová podstata kalení laserovým paprskem*. Plzeň: Tribun EU s.r.o., 2013. ISBN 978-80-263-0359-6.
- 12 Vysoce přesné laserové 3D obrábění a texturování. *Technika a trh* [online]. 2015 [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: <http://www.technikaatrh.cz/obrabeni/vysoce-presne-laserove-3d-obrabeni-a-texturovani>

- 13 3D obrábění laserem. *Ok-form* [online]. 2015 [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: <http://www.ok-form.cz/3d-obrabeni-laserem>
- 14 Laserové svařování. *Centrum laserových a automatizačních technologií* [online]. 2000, 2015 [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/laserove-svarovani>
- 15 Svařování laserovým paprskem a pájení laserem. *TRUMPF* [online]. 2015 [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-svareni.html>
- 16 Hluboké svařování. *TRUMPF* [online]. 2015 [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-svareni/hluboke-svarovani.html>
- 17 Kondukční svařování. *TRUMPF* [online]. 2015 [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-svareni/kondukcni-svarovani.html>
- 18 Hybridní svařování. *TRUMPF* [online]. 2015 [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-svareni/hybridni-svarovani.html>
- 19 Laserové hybridní svařování. *AWL-Techniek* [online]. 2015 [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: http://www.awl.nl/cz/technologies/laser_welding/hybrid_laser
- 20 Elektronový svazek v technologiích. ZOBAČ, Martin. *UPT AVČR* [online]. 2010 [cit. 2015-04-03]. Dostupné z: <http://ebt.isibrno.cz/elektronovy-svazek-v-technologiich>
- 21 [AUTOŘI JAROSLAV KOUKAL, Martin Sondel]. *Nekonvenční metody svařování: studijní materiály*. 1. vyd. Ostrava: Český svářečský ústav, 2013. ISBN 978-802-4828-879.
- 22 Zájem o technologii elektronového paprsku překonal očekávání. *Ústav materiálových věd a inženýrství* [online]. 2013 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://imse.fme.vutbr.cz/index.php/home/39-zajem-o-technologie-elektronoveho-paprsku-prekonalo-ocekavani>
- 23 Nekonvenční metody obrábění: Obrábění paprskem elektronů. *Průmyslové spektrum* [online]. 2008, č. 080625 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/nekonzvencni-metody-obrabeni-2.html>
- 24 Pro beam. *Ecosond* [online]. 2013 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.ecosond.cz/pro-beam.html>
- 25 Nové možnosti efektivního využití technologie svařování elektronovým paprskem v sériové výrobě rozměrných součástí. *Konstrukce* [online]. 10.11.2010 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/nove-moznosti-efektivniho-vyuziti-technologie-svarovani-elektronovym-paprskem-v-seriove-vyrobe-rozmernych-soucasti/>

- 26 ZOBAČ, Martin. Základní informace o svařování elektronovým svazkem. *UPTAVČR* [online]. 2.2.2010 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: <http://ebt.isibrno.cz/zakladni-informace-o-svarovani-elektronovym-svazkem>
- 27 MORAVEC, Jaromír. *Teorie svařování a pájení II: speciální metody svařování*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009, 150 s. ISBN 978-80-7372-439-9.
- 28 SKALKA, Jan. [online]. Brno, 2014 [cit. 2015-04-12]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=84912. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. Tomáš Rychter.
- 29 Allforpower. NOVÁK, Stanislav a Jiří MRÁČEK. *Allforpower* [online]. 2009 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/UserFiles/files/2009/svarovani%20oceli%20vys%20pevnosti.pdf>
- 30 Nedestruktivní zkoušení N D T. VANĚK, VANĚK WELDING s.r.o. [online]. 2014 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.vanek-welding-s-r-o.cz/ndt-zkousky-skoleni-korozni-technolog/>
- 31 Válcované pásy DOMEX. *Gama ocel* [online]. 2014 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.gamaocel.cz/20360/domex/>
- 32 Domex 420 MC. SSAB [online]. 2014 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: http://www.ssab.com/Global/Domex/Datasheets/en/414_Domex%20420%20MC.pdf
- 33 Plechy za studena. *Davi steel* [online]. 2014 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.davisteel.cz/nabidka-plechu/plechy-za-studena/>
- 34 IRB 2400 Industrial Robot. ABB [online]. 2012 [cit. 2015-05-20]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/898b798f7e4ed57bc1257a1d0050dc5f/PR10034%20EN%20R7_HR.pdf?filename=PR10034%20EN%20R7_HR.pdf
- 35 PODANÝ, Kamil. *Problematika mezní tvařitelnosti dílců z trubek*. Brno, 2008. 32 s. Dizertační práce. VUT FSI.
- 36 Měření tvrdosti. KUBÍČEK, Jaroslav. *Ateko* [online]. 2005 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://www.ateko.info/download/2005/kubicek.pdf>
- 37 Citopress1. *Struers* [online]. 2015 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://ipaper.ipapercms.dk/StruersAS/CitoPress1English/>
- 38 Tegramin. *Struers* [online]. 2015 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: http://www.struers.com/default.asp?top_id=3&main_id=10&sub_id=300&doc_id=1197
- 39 Řezání laserem. *Lao* [online]. 2013 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/obrazky/web/2377.jpg>

- 40 Obrábění povrchů laserem. *Trumpf* [online]. 2014 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/cs/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/obrabeni-povrchu.html>
- 41 Laserové řezání. KOŘÁN, Pavel. *Lao* [online]. 2013 [cit. 2015-05-24]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
- 42 Defektoskopie v průmyslu. *NDT* [online]. 2009 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.ndt.cz/index.php?mnu=27,0>
- 43 Obrazek. *Lao* [online]. 2015 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: http://www.lao.cz/obrazky/web/2798_st.jpg
- 44 Laser. *Mega-blog* [online]. 2015 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: http://www.mega-blog.cz/files/2013/02/laser_ilustracni.jpg
- 45 Laser. *Okstavebni* [online]. 2015 [cit. 2015-05-27]. Dostupné z: <http://www.okstavebni.cz/wp-content/themes/okstavebni/pic/laser.jpg>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
CCD	[-]	Charge Coupled Device
CET	[-]	uhlíkový ekvivalent
CEV	[-]	uhlíkový ekvivalent
CNC	[-]	Computer Numeric Control
HB	[-]	tvrdost dle Brinella
HRC	[-]	tvrdost dle Rockwella
HV	[-]	tvrdost dle Vickerse
MAG	[-]	metal active gas
MIG	[-]	metal inert gas
ÚPT	[-]	Ústav přístrojové techniky
WIG	[-]	wolfram inert gad

Symbol	Jednotka	Popis
A	[%]	tažnost
a	[mm]	tloušťka zkušební tyče – plechu
b	[mm]	šířka zkušební tyče - plechu
E₁	[J]	energie na základní hladině
E₂	[J]	energie na excitační hladině
F	[N]	síla
F_m	[N]	maximální síla
P	[W]	výkon
p_a	[Pa]	atmosférický tlak
R_a	[-]	drsnost povrchu
R_e	[MPa]	mez kluzu
R_{p0,2}	[MPa]	mez kluzu
R_m	[MPa]	mez pevnosti
S₀	[mm ²]	průřez vzorku
s	[mm]	dráha
t	[mm]	tloušťka

U_A	[V]	urychlující napětí
U_C	[V]	napětí na katodě
U_w	[V]	napětí na třetí katodě
η	[-]	účinnost

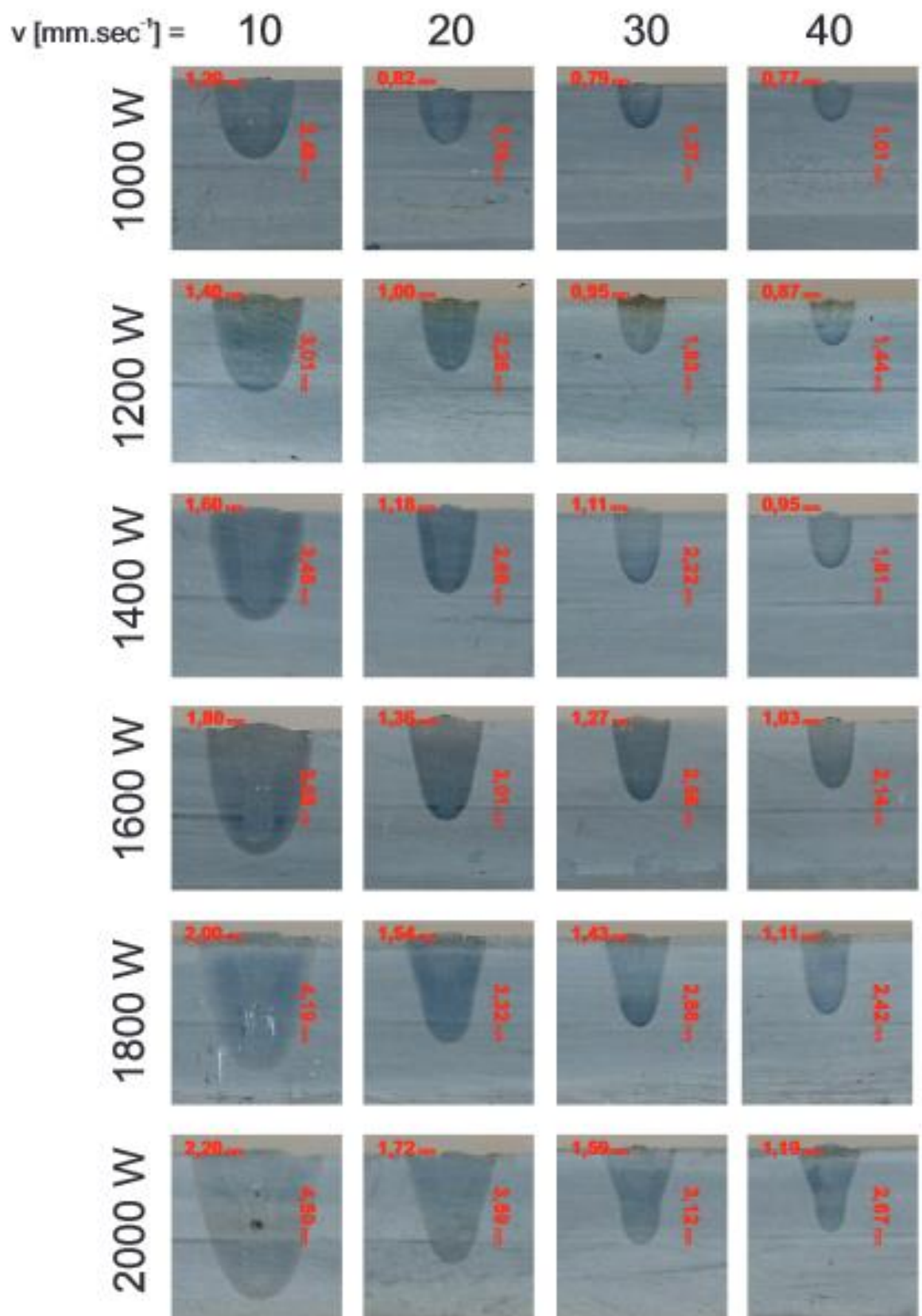
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Atest oceli Domex 420 MC pro tloušťku plechu 3 mm
Příloha 2	Svařovací parametry - laser
Příloha 3	Materiálový list Domex 420 MC
Příloha 4	Materiálový list DC01

PŘÍLOHA 1 - Atest oceli Domex 420 MC pro tloušťku plechu 3 mm

		Översättning/Mill sheet and Provningsprotokoll/Test certificate English/Version of certificate		Side/ Page 2				
		INSPECTION CERTIFICATE		B010204-3.1B				
Order/Order no. DOMEX 420 MC D FINE GRAIN STEEL Standard and basissättning/Standard according to the order INTERNAL MILL STANDARD		Spec. nr/Spec. No. 239580		Var/Curr. no. 472090				
Product/Produkt HOT ROLLED WIDE STRIP IN SHEETS		Köparens/Buyer's order (Data) 000000 21574/004-03099(1)		Köpare/Buyer 59564				
Pos. Item	Charge/Cast	tp	tp	Proven/Test, No.	Dimension	Kg/Kilos	St/Pieces	Lev. TALLST
2	21-1123	LD	S	246349	3000 X 1500	3.00	3335	31
3	21-1644	LD	S	251809	6000 X 1500	3.00	9625	14
3	59-5610	LD	S	258786	6000 X 1500	3.00	4710	22
Chemical Analysis %								
Charge/Cast	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Ni
21-1123	17	0	59	7	4	7	3	4
21-1644	17	7	57	10	5	5	4	4
59-5610	17	0	58	9	5	5	3	4
* 100 * 1000 * 100 * 1000 * 100 * 10000								
Proven/Test No.	REB	REB	AS	AS	BEND			
246349	5	548	555	51	G			
251809	5	491	555	33	G			
258786	5	514	570	28	G			
	5	483	572	25	G			
	5	541	567	30	G			
	5	500	567	26	G			
ANMÄRKNINGAR/NOTES								
Vi intygar härmed att materialet är tillverkat och provat i överensstämmelse med vår egen produktionsplan. We hereby certify that the material has been made and tested in accordance with our the above mentioned order.								
Borlänge 05-02-28 Yvonne Hedenskog		YVONNE HEDENSKOG						
Företagets Adress S-781 84 BORLÄNGE Sweden		Telefon/Fax 0243-720 00 + 46 243 720 00		Telex 0243 720 00 +46 241 720 00		* = FÖRELÄNINGAR, SE BAKSIDA EXPLANATIONS, PLEASE TURN OVER PRELÄNINGAR, SE BAKSIDA		

PŘÍLOHA 2 - Svařovací parametry - laser



Domex 420 MC

High Strength Cold Forming Steel

General Product Description

Domex 420 MC is a hot-rolled structural steel with a minimum yield strength of 420 MPa. Domex 420 MC meet and exceed the requirements of S420 MC in EN 10149-2.

Applications

Typical applications are components subjected to demanding forming operations.

Available dimensions

Domex 420 MC is available in thicknesses of 2.00-13.00 mm and widths up to 1600 mm as coils, slit coils and as cut to length in lengths up to 16 meters.

Mechanical Properties

Steel grade	Yield strength R_{eH} (MPa)	Tensile strength R_m (MPa)		Elongation A_{50} % $t \leq 3$ mm	Elongation A_{50} % $t \geq 3$ mm
	min	min	max	min	min
Domex 420 MC	420	480	620	16	20

The mechanical properties are valid in the longitudinal direction.

Impact toughness

	Designation	Test temperature (°C)	Impact energy (J)
Min. impact energy for longitudinal Charpy V-notch test	B	Not tested	
	D	- 20	40
	E	- 40	27

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

Bending properties

	Sheet thickness, t		
	$t \leq 3$ mm	$3 \text{ mm} < t \leq 6$ mm	$t > 6$ mm
Min. inner bending radius for a 90° bend	0.4 xt	0.5 xt	0.8xt

For both longitudinal and transversal directions.

Chemical Composition (Ladle analysis)

C % max	Si % max	Mn % max	P % max	S % max	Al _{tot} % min	Nb % max	V % max	Ti % max	CEV typical	CET typical
0.10	0.03 ¹⁾	1.50	0.025	0.010	0.015	0.09 ²⁾	0.20 ²⁾	0.15 ²⁾	0.26	0.18

1) Domex 420 MC meets the requirements of Category A (thin coatings) for hot-dip zinc-coating in EN 10149-2. Category B for thick coatings is available on request (Si 0.15-0.21%).

2) The sum of Nb, V and Ti is max 0.22%.
The steel is grain refined.

Tolerances

Domex 420 MC is supplied with tolerances in accordance with EN 10051. More narrow tolerances according to the SSAB standard are available on request.

Delivery condition

Thermomechanically rolled.

Surface and edge condition

Domex 420 MC is available in as rolled or pickled surface condition with mill or cut edge.

Fabrication and other recommendations

Domex 420 MC is a cold forming steel not suited for heat treatments at temperatures above 580°C, since the material then may lose its guaranteed properties.

Domex 420 MC has good welding, cold forming and cutting performance.

For information concerning fabrication, see SSAB's brochures on www.ssab.com or consult Tech Support, help@ssab.com.

Appropriate health and safety precautions must be taken when bending, welding, cutting, grinding or otherwise working on the product.

Contact and Information

Tech Support will be pleased to assist you with additional information concerning this SSAB product.

PŘÍLOHA 4 - Materiálový list DC01

1.0330		Nelegovaná jakostní hlubokotažná ocel		DC01 ³⁾ Značka
Číselné označení				
Chemické složení [hm. %] ⁴⁾				
C	Si	Mn	P	S
max 0,12	—	max 0,60	max 0,045	max 0,045
Normy EN				
[1] 10130 + A1 [2] 10139 [3] 10152 [4] 10271				
Mechanické vlastnosti ¹⁾²⁾				
Norma EN	[1]	[3]	[4]	
Rozměr t [mm] ⁵⁾	0,35–3,00			
Stav	—	+ZE	+ZN	
Mez kluzu R _{el} nebo R _{p0,2} [MPa] min	max 280	max 280	max 280	
Mez pevnosti R _m [MPa]	270–410	270–410	270–410	
Tažnost A ₈₀ [%] min	28	28	28	
Součinitel plastické anizotropie r ₉₀ min	—	—	—	
Exponent deformačního zpevnění n ₉₀ min	—	—	—	

Norma EN	[2]								
Rozměr t [mm] ¹⁾	0,35–3,00								
Stav	žháný (+A)	lehce převálcovaný (+LC)	zpevněný za studena						
			C290	C340	C390	C440	C490	C590	C690
Mez kluzu R_{el} nebo $R_{p0,2}$ [MPa] min	–	max 280	200–380	min 250	min 310	min 360	min 420	min 520	min 630
Mez pevnosti R_m [MPa]	270–390	270–410	290–430	340–490	390–540	440–590	490–640	590–740	min 690
Tažnost A_{80} [%] min	28	28	18	–	–	–	–	–	–
Tažnost A_{50} [%] min	30	30	20	–	–	–	–	–	–
Tažnost A_5 [%] min	32	32	24	–	–	–	–	–	–
Součinitel plastické anizotropie r_{90} min	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Exponent deformačního zpevnění n_{90} min	–	–	–	–	–	–	–	–	–
Tvrdost HV	max 105	max 115	95–125	105–155	117–172	135–185	155–200	185–225	min 215
Ostatní vlastnosti									
Způsob desoxidace – podle volby výrobce Druh elektrolyticky naneseného povlaku ZE, resp. ZN									
Použití									
Pro tváření za studena, vhodná k žárovému pokovování nebo pokovování ponorem (podle [1], [2]), elektrolytickému pokovování (podle [1], [3] a [4]) a nanášení organických a jiných povlaků (podle [1] a [2]).									
Porovnání se zahraničními materiály									
<i>EURO</i>		<i>Česká republika</i>			<i>Německo</i>				
FeP01	EN 10130	11 321	ČSN 41 1321		St12	DIN 1623-T1			
<i>Francie</i>		<i>Velká Británie</i>			<i>Itálie</i>				
C	NF A36-301	CR4	BS 1449-1		FeP01	UNI 5866			
<i>ISO</i>		<i>USA</i>			<i>Rusko</i>				
–	–	1008	ASTM A29		–	–			
<i>Japonsko</i>		<i>Čína</i>			–				
CR1	JIS G3141	–	–		–	–			
Poznámky									
¹⁾ Hodnoty, s výjimkou normy [2], platí pouze pro výrobky převálcované za studena. ²⁾ U tloušťek od 0,5 do 0,7 mm se dovoluje min. hodnota tažnosti o 2 % nižší a max. hodnota meze kluzu o 20 MPa vyšší. U tloušťek < 0,5 mm se dovoluje min. hodnota tažnosti o 4 % nižší a max. hodnota meze kluzu o 40 MPa vyšší. ³⁾ Doba bez vzniku deformačních čar 3 měsíce, doporučuje se zpracovat do 6 týdnů od předání k expedici (platí pouze pro jakost povrchu B). Maximální hodnota meze kluzu platí pouze po dobu 8 dnů. Pro konstrukční účely lze počítat s min. hodnotou meze kluzu 140 MPa. ⁴⁾ Ocel může být dodávána legovaná (např. B nebo Ti), pokud nebylo při objednávání dohodnuto jinak. ⁵⁾ U povlakovaných výrobků se tloušťkou rozumí celková tloušťka po povlakování.									