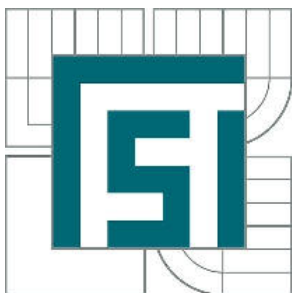


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



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

SVAŘOVÁNÍ JEMNOZRNNÝCH OCELÍ TYPU DOMEX VLÁKNOVÝM YBYAG LASEREM.

WELDING OF FINEGRAIN STEEL FROM RANGE OF DOMEX STEEL BY YBYAG FIBER LASER.

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. TOMÁŠ NĚMEČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.

BRNO 2012

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2011/2012

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Tomáš Němeček

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:

Svařování jemnozrnných ocelí typu DOMEX vláknovým YbYAG laserem.

v anglickém jazyce:

Welding of finegrain steel from range of DOMEX steel by YbYAG fiber laser.

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jemnozrnné oceli z řady DOMEX (420 - 700) jsou moderní typy vysokopevnostních ocelí, které se stále častěji využívají v automobilovém průmyslu. Jednou z velmi perspektivních svařovacích metod pro tyto oceli je svařování laserem. Pro dané druhy bude nutné prostudovat možnosti technologie a navrhnout svařovací postup, zjistit strukturní a mechanické vlastnosti výsledného spoje. Vyzkoušet i svaření různých druhů navzájem.

Cíle diplomové práce:

Seznámení se s možnostmi technologie laserového svařování.

Seznámení se s metodikou návrhu svařovacího postupu pro danou technologii a typ materiálu.

Seznámit se se specifickými vlastnostmi svařovaného materiálu, zjistit technologické a technické limity technologie a materiálu.

Seznam odborné literatury:

- 1.BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.l: Laserové technologie,1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9
- 2.DULEY W.W.: Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4
- 3.TURŇA M., Špeciálne metódy zvarovania, ALFA Bratislava, 1989, ISBN 80-05-00097-9
- 4.KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292s. ISBN 80-85771-85-3
- 5.KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0
- 6.KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214s. ISBN 80-85771-72-1

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

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2011/2012.

V Brně, dne 21.11.2011

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

NĚMEČEK Tomáš: Svařování jemnozrnných ocelí typu DOMEX vláknovým YbYAG laserem.

Projekt vypracovaný v rámci inženýrského studia oboru Strojírenská technologie předkládá experiment svařování vysokopevných ocelí Domex s použitím vláknového laseru. Práce obsahuje literární rešerši, která popisuje vlastnosti svařovaného materiálu, princip a jednotlivé typy laseru a technologii svařování laserem. V experimentální části bylo provedeno ověření nastavených svařovacích parametrů pomocí normy ČSN EN ISO 15614-11. V závěru práce jsou uvedeny a zhodnoceny jednotlivé výsledky experimentu.

Klíčová slova: Domex, vysokopevné oceli, vláknový laser, laserové svařování, svařitelnost.

ABSTRACT

NĚMEČEK Tomáš: Welding of finegrain steel from range of DOMEX steel by YbYAG fiber laser.

The project elaborated within the engineering studies of the branch Manufacturing technology presents an experiment of welding of high strength steel by fiber laser. The project includes a theoretical study, which deals with the welding material properties, principles and types of lasers and laser welding technology. The practical part contains a verification of the welding parameters according to the standard ČSN EN ISO 15614-11. The final evaluation results of the experiment at the close of the project are presented.

Keywords: Domex, high strength steel, fiber laser, laser welding, weldability.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

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.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 21. 5. 2012

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce a také panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D. za provedení destruktivních zkoušek.

Experimentální svary byly provedeny na zařízení pořízeném za podpory Evropské komise a Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy České republiky (projekt. č. CZ.1.05/2.1.00/01.0017).

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	11
1 OCELI S VYŠŠÍ PEVNOSTÍ.....	12
1.1 Podstata zvýšení pevnosti	12
1.1.1 Zpevnění hranicemi zrn a subzrn.....	12
1.1.2 Zpevnění precipitační	13
1.1.3 Zpevnění substitučními a intersticiálními atomy.....	13
1.1.4 Vliv struktury matrice	14
1.2 Aplikace zpevňovacích mechanismů při výrobě	15
1.2.1 Legování a mikrolegování	15
1.2.2 Termomechanické zpracování	16
1.3 Rozdělení	19
1.4 Využití	21
1.5 Svařitelnost jemnozrnných ocelí.....	22
2 LASER.....	23
2.1 Historie a vývoj.....	23
2.2 Fyzikální princip činnosti	24
2.3 Vlastnosti laserového paprsku	25
2.4 Absorpce a reflexe	27
2.5 Základní prvky laseru	28
2.6 Rozdělení laserů.....	29
2.6.1 Plynové lasery.....	29
2.6.2 Pevnolátkové lasery	31
2.6.3 Polovodičové lasery	35
2.7 Využití laseru v průmyslu.....	36
2.8 Současné vývojové trendy	37
3 SVAŘOVÁNÍ LASEREM	39
3.1 Mechanismus svařování.....	39
3.1.1 Kondukční svařování	40
3.1.2 Svařování penetrační metodou.....	41
3.2 Ochranné plyny.....	42
3.3 Parametry svařování	43
3.3.1 Kontinuální režim	43

3.3.2	Pulzní režim	43
3.4	Navrhování svarů	44
3.5	Deformace	46
3.6	Svařitelnost materiálů	46
4	ZKOUŠENÍ SVAROVÝCH SPOJŮ	47
4.1	Typy vad svarových spojů	47
4.2	Nedestruktivní zkoušení	47
4.2.1	Vizuální zkouška	48
4.2.2	Kapilární zkouška	48
4.3	Destruktivní zkoušení	48
4.3.1	Příčná zkouška tahem	48
4.3.2	Zkouška ohybem	49
4.3.3	Zkouška rázem v ohybu	49
4.3.4	Metalografické zkoušení	49
4.3.5	Zkouška tvrdosti	49
5	PRAKTICKÁ ČÁST	50
5.1	Charakteristika svařovaného materiálu Domex MC	50
5.2	Metodika zkoušení	50
5.3	Použitá zařízení	50
5.4	Postup svařování	52
5.5	Vizuální kontrola	52
5.6	Kapilární zkouška	53
5.7	Příčná zkouška tahem	53
5.8	Zkouška ohybem	57
5.9	Zkouška tvrdosti	59
5.10	Makroskopické zkoušení	59
6	Závěry	62

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam příloh

ÚVOD

Svařitelné oceli se zvýšenou pevností představují progresivní konstrukční materiál, který tvoří ve vyspělých průmyslových státech více než 10 % z produkce válcovaného materiálu. Nejúčinnější cestou k získání vysokých pevnostních vlastností doprovázených i vysokými křehkolomovými charakteristikami je zajištění jemnozrnné finální struktury.

Pro svařování jemnozrnných ocelí s vyšší mezí kluzu se doporučuje upřednostňovat svary tupé před koutovými. Teplo vnesené do svaru jemnozrnných zvláště termomechanicky zpracovaných ocelí musí být co nejmenší. Pro takové spoje je technologie svařování laserem díky svým vlastnostem ideální.

Laser je unikátní všestranný nástroj pro zpracování obrovského rozsahu materiálů jako kovy a jejich slitiny, keramika, sklo, polymery a různé kompozity. Laserový paprsek je zdrojem elektromagnetické energie, který je možné přenášet bez jeho rozptylu a může být koncentrovaný do přesného bodu. Může být produkován v pulzním nebo kontinuálním režimu, s vlnovou délkou od ultrafialové přes viditelnou po infračervenou, rozsah výkonu od miliwatů až po kilowatty. Paprsek z jednoho zdroje může být použit pro několik různých aplikací.

Při svařování laserovým paprskem se dosahuje poměru hloubky ku šířce svaru větší než jedna. V porovnání s obloukovými metodami svařování je objem svarového kovu a tepelně ovlivněná oblast několikanásobně menší. Napětí a deformace se zmenšují 5 až 10 krát.

1 OCELI S VYŠŠÍ PEVNOSTÍ [1]

V průmyslově vyspělých zemích směřuje vývoj k trvalému zvyšování užitných vlastností vyráběných ocelí a doplňování sortimentu o nové druhy. V posledních dvaceti letech byla rozvinuta výroba konstrukčních svařitelných ocelí se zvýšenou pevností, které představují více než 10 % produkce válcovaného materiálu. Tyto oceli se vyznačují především vysokou mezí kluzu, sníženou citlivostí ke křehkému porušení a dobrou svařitelností. Jejich zavedení umožňuje snížení hmotnosti konstrukcí a zařízení se všemi vyplývajícími výhodami, jako je snížení spotřeby kovové substance, levnější doprava, rychlejší zpracování a montáž, nižší cena výrobků apod.

1.1 Podstata zvýšení pevnosti [1, 2]

Pro dosažení vysoké pevnosti při dostatečné houževnatosti se používají u různých materiálů různé, v řadě případů sofistikované způsoby ovlivňování struktury. Výsledkem výzkumu podstaty pevnosti zejména kovových materiálů, který kulminoval v šedesátých letech minulého století, byla identifikace několika mechanismů zpevňování, které různou intenzitou přispívají k výsledné pevnosti.

Plastická deformace kovových materiálů se realizuje pohybem dislokací. Zpevňování kovových materiálů je možno charakterizovat jako růst jejich odporu proti vzniku a pohybu dislokací. Napětí potřebné k uskutečnění plastické deformace závisí na typu překážek bránících dislokacím v pohybu, na množství a rozložení těchto překážek. Z tohoto hlediska patří mezi účinné překážky především hranice zrn a subzrn, dislokační sítě, atomy příměsí a jejich shluky, precipitáty. Interakci dislokací s těmito překážkami odpovídají základní zpevňovací mechanismy využívané u ocelí s vyšší pevností. Výsledná pevnost je významně ovlivněna i strukturou matrice.

1.1.1 Zpevnění hranicemi zrn a subzrn [1]

Znalost, že pevnost materiálů roste s klesající velikostí zrn v jejich struktuře (s rostoucí plochou hranic zrn), byla známa již v dávnověku. Hranice zrn a subzrn tvoří významnou překážku pohybu dislokací, velkoúhlové hranice zrn jsou pro pohybující se dislokace neprůchodnou překážkou. Ve skluzových rovinách proto dochází u hranic zrn ke kupení dislokací. Během pokračující plastické deformace množství nahromaděných dislokací roste. V souladu s tím roste napěťové pole nahromaděných dislokací a tím i jeho smyková složka τ_2 , která působí proti napětí τ_1 , uvádějícímu v činnost Frank-Readův zdroj dislokací FRZ 1. Když hodnota τ_1 dosáhne hodnoty τ_2 , činnost zdroje se zastaví. Napěťové pole nakupených dislokací však současně zasahuje do sousedních zrn a po dosažení určité velikosti může jeho smyková složka τ_3 aktivovat další dislokační zdroj FRZ 2. Na základě těchto představ byl odvozen Hallův-Petchův vztah, udávající vliv velikosti zrna na mez kluzu:

$$R_e = \sigma_0 + K_z \cdot d_z^{-1/2}, \quad (1)$$

kde: R_e – mez kluzu [MPa],
 σ_0 – třecí napětí mřížky [MPa],
 K_z – faktor vlivu hranic zrn [$\text{N} \cdot \text{mm}^{-3/2}$],
 d_z – střední velikost zrna [mm].

Mez kluzu je tedy nepřímo úměrná odmocnině střední velikosti zrna d_z . Třecí napětí mřížky σ_0 je napětí potřebné pro pohyb dislokací uvnitř zrn. Pro nízkolegovanou ocel platí, že

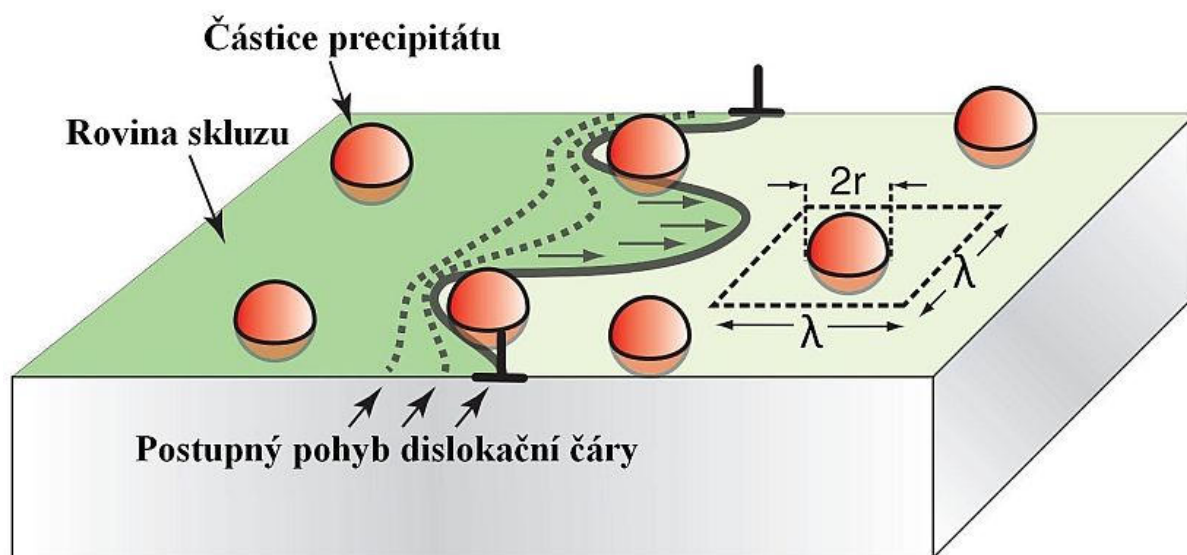
$\sigma_0 \approx 40$ MPa. Konstanta K_z zahrnuje vliv hranic zrn na indukovaný skluzový proces v sousedních, dosud nedeformovaných zrnech. Pro nízkolegovanou ocel je $K_z \approx 20 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-3/2}$. Velikost σ_0 a K_z je ovlivněna legováním, finální strukturou i deformačním stavem materiálu.

Zjemňování zrn jako jediný zpevňovací mechanismus má za následek jak zvýšení pevnosti, tak i zvýšení plastických vlastností materiálů. Proto se zájem koncentruje především na tento způsob zpevnění struktury a hledají se jeho limitní možnosti.

1.1.2 Zpevnění precipitační [1]

Dojde-li v základní kovové matici k vyloučení dostatečně jemného precipitátu, dochází při plastické deformaci k výrazné interakci pohybujících se dislokací s tímto precipitátem. Tento jev je označován jako precipitační zpevnění.

V případě, že částice vzniklé rozpadem tuhého roztoku nemají mřížku koherentní s maticí, hovoří se o tvrdých (nedeformovatelných) částicích. Při překonávání těchto částic dislokacemi dochází k uplatňování Orowanova mechanismu. Dislokace se při setkání s částicemi tak prohýbá, že dojde k jejímu rozdělení na uzavřené dislokační smyčky okolo částic a dislokační čáru, která pokračuje po překonání překážek ve svém pohybu.



Obr. 1 Precipitační zpevnění – Orowanův mechanismus [4]

V případě, že vznikající precipitát je ve stavu, kdy jeho mřížka je koherentní s maticí, hovoří se o měkkých (deformovatelných) částicích. Dislokace při svém pohybu tyto částice nebo shluky atomů protíná. Uplatňuje se zde Friedlův mechanismus. Dislokace v tomto případě vniká do částice a prochází jí. Přitom se zruší energeticky nejvýhodnější meziatomové vazby uvnitř částice.

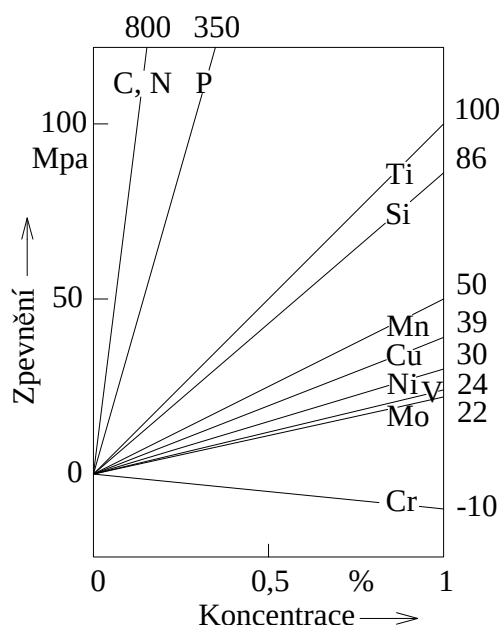
1.1.3 Zpevnění substitučními a intersticiálními atomy [1, 2]

Rozpustí-li se atomy příměsí v tuhém roztoku, vytváří se kolem nich pole napětí za předpokladu, že způsobí distorzi mřížky železa. Tomu se tak stane díky odlišnému rozměru atomů příměsí a atomů tvořící tuhou roztok. Atomy mohou jednak nahrazovat atomy mřížky v jejích polohách (substituční zpevnění) nebo v určitých prostorách mezi atomy mřížky (intersticiální zpevnění).

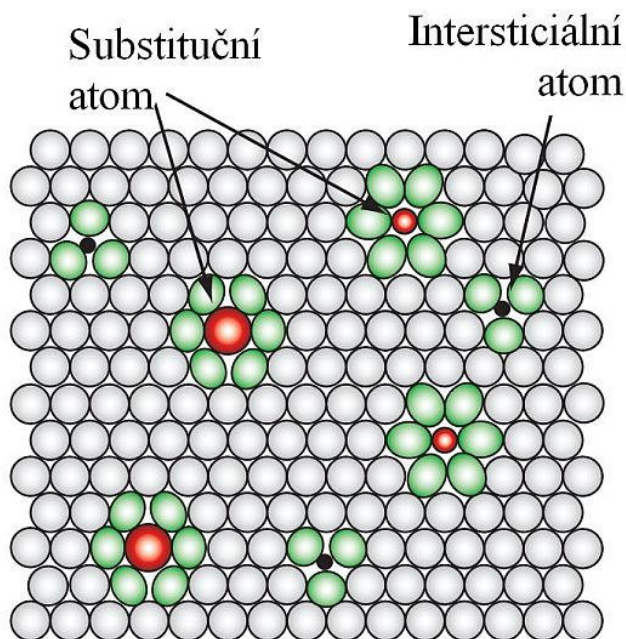
Substitučně rozpuštěnými atomy je pohyb dislokací brzděn v důsledku interakce napětového pole způsobeného distorzi mřížky s napětovým polem dislokace – dochází k tzv.

pružné rozměrové interakci. V případě, že se atomy základního a legujícího prvku neliší velikostí, ale pouze modulem pružnosti ve smyku, nedochází k distorzi mřížky, ale pohyb dislokací je přesto ztížen v důsledku tzv. pružné modulové interakce.

V případě substitučního zpevnění feritu v ocelích přispívají nejvíce atomy fosforu, křemíku a manganu. Při intersticiálním zpevnění přispívají ke zpevnění atomy uhlíku a dusíku. Zpevňující účinek legujících substitučních prvků se vždy překrývá s vlivem intersticiálních prvků. Z obr. 2 je zřejmé, že tyto prvky zpevňují ferit intenzivněji, než prvky substituční. Jejich zpevňující účinek však nelze využít, protože současně zhoršují svařitelnost a zvyšují tranzitní (přechodovou) teplotu. Proto bývá obsah uhlíku v těchto ocelích nižší než 0,2 %, v řadě případů pouze v setinách procent.



Obr. 2 Příspěvek zpevnění feritu vybranými rozpuštěnými prvky [1]



Obr. 3 Cizí atom v substituční a intersticiální poloze [4]

1.1.4 Vliv struktury matrice [1]

Mez kluzu a mez pevnosti oceli lze výrazně ovlivnit i finální strukturou matrice, která bývá feriticko-perlitická, bainitická, feriticko-bainitická, feriticko-martenzitická, případně u zušlechťené oceli tvořená popuštěným martenzitem.

U feriticko-perlitických ocelí se využívá ke zpevnění všech výše uvedených mechanismů. Rostoucí podíl perlitu v těchto ocelích zvyšuje mez pevnosti, na mez kluzu má však menší vliv. Současně způsobuje pokles vrubové houževnatosti a růst tranzitní teploty a proto se zpevňujícího účinku perlitu nevyužívá.

Další zpevnění matrice lze dosáhnout pomocí bainitické struktury. Vhodnou kombinací legování a tepelného zpracování lze zajistit vznik jemnozrnné precipitačně zpevněné bainitické struktury, která vedle vysokých pevnostních hodnot zaručuje i dobré rázové vlastnosti.

Výhodná kombinace pevnostních a rázových vlastností se dosahuje vytvořením dvoufázových ocelí feriticko-bainitických a feriticko-martenzitických. Tyto se vyznačují vysokým koeficientem deformačního zpevnění a vysokým stupněm rovnoměrné plastické deformace za studena. Pevnost samotného martenzitu je funkcí podílu uhlíku v tuhém roztoku, hrubosti martenzitu, hustoty dislokací a karbidického precipitátu.

1.2 Aplikace zpevňovacích mechanismů při výrobě [1, 2]

K dosažení požadovaných pevnostních hodnot se u zaručeně svařitelných konstrukčních ocelí využívá všech výše uvedených zpevňovacích mechanismů. Rozhodující význam má zpevnění hranicemi zrn a subzrn a zpevnění precipitační. Na dosažených hodnotách meze kluzu se podílejí až 80 %.

Při využívání uvedených mechanismů zpevnění je zapotřebí nejdříve zvolit vhodné chemické složení oceli a za druhé použít vhodnou technologii výroby jako jsou termomechanické válcování, mnohostupňové ochlazování vývalku a/nebo zrychlené ochlazování. Za tím účelem se upravují postupy výroby a tepelného zpracování (tepelné zpracování zásadně provádí výrobce).

1.2.1 Legování a mikrolegování [1, 5]

Mez kluzu, křehkolomové chování, svařitelnost i další vlastnosti svařitelných ocelí se zvýšenou mezí kluzu jsou výrazně ovlivněny jejich chemickým složením. Při jeho volbě je třeba uvážit, že jednotlivé legury a mikrolegury působí často na uvedené vlastnosti protichůdně.

Nejužívanějšími legurami pro zpevnění feritu jsou mangan a křemík. Obsah manganu bývá v rozmezí 1,0 až 1,7 %, obsah křemíku v rozmezí 0,2 až 0,6 %. Při tomto legování mangan přispívá jak k růstu pevnostních vlastností, tak k růstu houževnatosti a poklesu tranzitní teploty. Vyšší obsahy mangan však vedou ke vzniku bainitických struktur, které zhoršují lomovou houževnatost a zvyšují tranzitní teplotu. Křemík způsobuje výraznější růst pevnostních hodnot než mangan. Již při obsazích nad 0,6 % však způsobuje pokles vrubové houževnatosti, růst tranzitní teploty a zhoršení svařitelnosti. Vyšší množství křemíku (až 1,5 %) obsahují pouze některé feriticko-martenzitické oceli.

U nízkolegovaných ocelí se vyskytují další legury (řádově v desetinách procent) jako chrom, nikl, molybden, vanad a případně bór (v tisícinách procent). Vysoké meze kluzu se u těchto ocelí dosahuje kalením a následným popouštěním se zlepšuje houževnatost.

Pro řadu těchto ocelí je charakteristické mikrolegování, tj. úmyslné obohacení oceli malými přísadami karbido, nitrido, případně karbonitridotvorných prvků. Celkový obsah těchto prvků většinou nepřesahuje 0,15 %. Nejpoužívanější mikrolegující prvky jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1 Nejpoužívanější mikrolegující prvky [1]

Mikrolegující prvek	Al	Ti	Nb	V	Zr
Obvyklý obsah [%]	0,02 ÷ 0,08	0,02 ÷ 0,15	0,01 ÷ 0,06	0,01 ÷ 0,12	do 0,15

Hlavním účelem mikrolegování není zpevnění nalegováním tuhého roztoku těmito prvky, ale precipitační zpevnění feritické matrice karbidy, nitridy, případně karbonitridy uvedených prvků. Přítomnost těchto minoritních fází navíc blokuje růst austenitického zrna při rekrystalizaci a přispívá tak k tvorbě jemnozrnné sekundární struktury. Precipitační zpevnění těmito prvky bývá doprovázeno nežádoucím růstem tranzitní teploty. Tento nepříznivý účinek je třeba korigovat zjemňováním zrna. Precipitáty mikrolegujících prvků váží i část intersticiálního dusíku. Pravděpodobnost vzniku nitridů železa Fe_4N a Fe_{16}N_2 způsobujících stárnutí oceli je proto minimální.

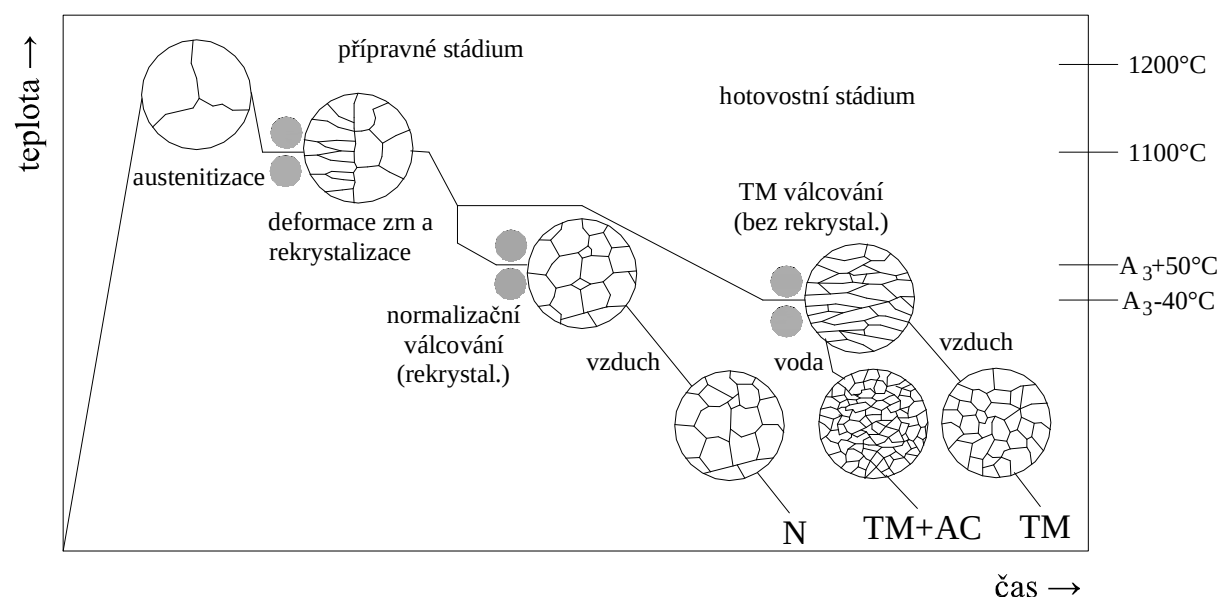
Při posouzení mikrolegování z ekonomického hlediska je nutno zvážit na jedné straně intenzitu jejich působení na mechanické vlastnosti, na druhé straně je třeba zvážit potřebné množství a cenu mikrolegury. Z tohoto pohledu klesá progresivita využití mikrolegury v řadě

Ti – Nb – V. Titan se tak jeví jako nejvýhodnější mikrolegury. Často se však používá různých kombinací mikrolegujících prvků.

Ke zlepšení užitných vlastností, zvláště pak plasticity, se využívá legování kovy vzácných zemin. Tyto prvky (Ce, La, Nd, Pr) působí rafinačním účinkem, který způsobuje snížení obsahu síry a nekovových vměstků a vede k celkovému zlepšení chemické homogenity.

1.2.2 Termomechanické zpracování [1, 2, 3, 30]

Požadovaných finálních vlastností svařitelných ocelí se zvýšenou pevností lze dosáhnout buď spojením válcování a normalizačního žíhání, případně jiného tepelného zpracování, nebo aplikací řízeného válcování a ochlazování. Na obrázku 4 jsou schématicky ukázány podmínky termomechanického zpracování, které zajišťuje jemnozrnnost konstrukčních ocelí.

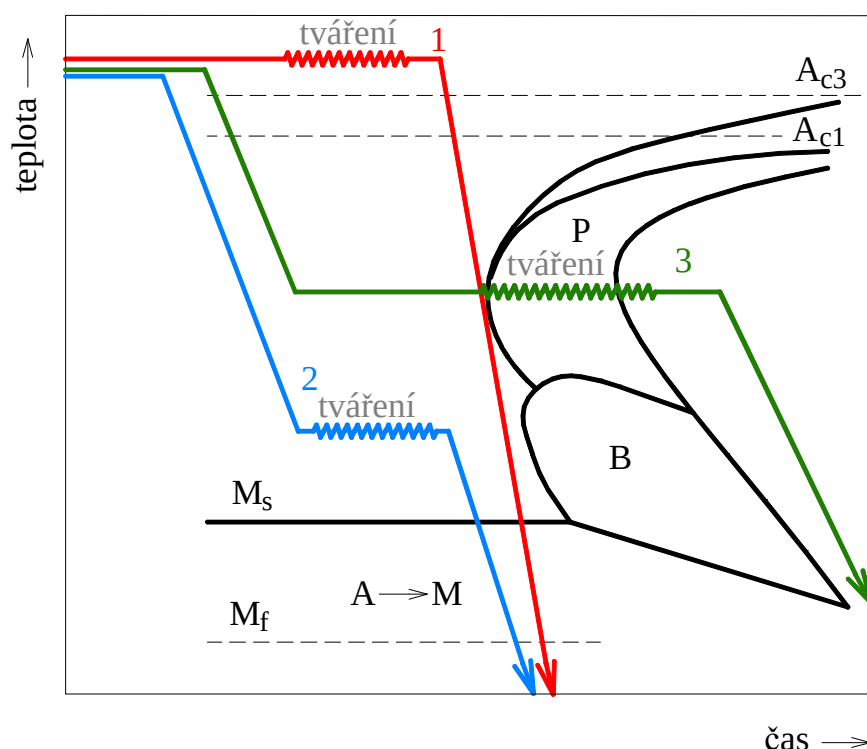


Obr. 4 Schéma postupů pro zajištění jemnozrnnosti, N – normalizační žíhání, TM+AC – termomechanické zprac. se zrychlením ochlazováním, TM – termomechanické zprac. [29]

Termomechanické zpracování spojuje přeměny s deformací. Podstatou tohoto zpracování zpravidla bývá rychlé ochlazení tvářeného austenitu. Tvářením austenitu může dojít k podstatnému zjemnění jeho zrna a tedy i produkty jeho následujících přeměn (martenzit, ferit, perlit) budou jemnější. Dalším důsledkem tvářením je zvýšená hustota dislokací.

Mezi nejčastější postupy termomechanického zpracování patří:

- nízkoteplotní termomechanické zpracování – NTMZ;
- vysokoteplotní termomechanické zpracování – VTMZ;
- izoforming;
- řízené válcování;
- zerolling.



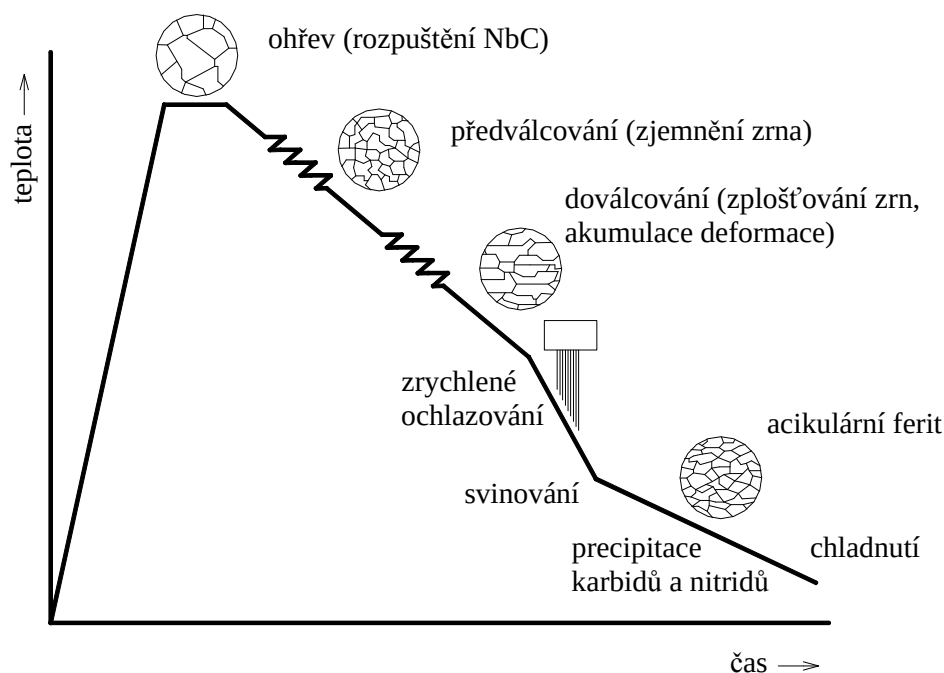
Obr. 5 Schéma průběhu (1) vysokoteplotního, (2) nízkoteplotního termomechanického zpracování a (3) izoformingu [30]

Při vysokoteplotním termomechanickém zpracování se ocel intenzivně tváří nad teplotou A_{c3} , tedy v oblasti stabilního austenitu, přičemž stupeň deformace se pohybuje v rozmezí 40 až 90 %. V silně deformované struktuře probíhá zároveň i rekrytalizace zjemňující austenitické zrna, které při martenzitické transformaci během následujícího kalení vede i k celkovému zjemnění martenzitu. VTMZ lze prakticky aplikovat na všechny druhy ocelí.

Nízkoteplotní termomechanické zpracování spočívá v austenitizaci nad teplotou A_{c3} , v prudkém ochlazení do oblasti metastabilního austenitu (asi 500 až 600 °C), kde se ocel plasticky deformuje zpravidla kováním nebo válcováním (deformace až 50 %), a poté následuje kalení. NTMZ lze použít u ocelí s širokou oblastí metastabilního austenitu (tedy u legovaných ocelí), je však technologicky náročné zajistit prudké ochlazení na tvářecí teplotu a udržet podmínky tváření tak, aby nedošlo k perlitické či bainitické přeměně. Technologické problémy s sebou nese i vysoký přetvárný odpor spojený s nízkou tvářecí teplotou.

Polotovary nebo součásti po NTMZ a VTMZ se zpravidla popouštějí při teplotách 200 °C až 300 °C a výsledná struktura je tvořena velmi jemným popuštěným martenzitem.

K NTMZ se řadí i proces označovaný jako izoforming, představující kombinaci izotermické perlitické přeměny a deformace. Vlastní deformace se může uskutečnit buď před transformací nebo i v průběhu přeměny austenitu na perlit. Izoforming vede ke zjemnění a k částečné sferoidizaci perlitu, jehož mechanické vlastnosti jsou lepší než u perlitu získaného izotermickým žíháním.



Obr. 6 Stádia řízeného válcování a ochlazování ve Steckelově válcovně [2]

Řízené válcování a ochlazování je variantou TMZ, která se aplikuje převážně a spojitých válcovacích tratích při výrobě mikrolegovaných svařitelných ocelí. Rozumí se tím řízení válcovacích teplot, velikost úběrů a rychlosti ochlazování tak, aby po skončení celého výrobního cyklu dosáhl válcovaný polotovár požadovaných finálních vlastností (bez dalšího tepelného zpracování).

Schéma technologie řízeného válcování a ochlazování používaného pro výrobu ocelových pásů z mikrolegované vysokopevné oceli ve Steckelově válcovně je znázorněno na obrázku 6. Plynule odlitá brama o tloušťce cca 220 mm se rovnoměrně ohřeje v peci. Teplota ohřevu předválců musí být volena tak, aby na jedné straně garantovala austenitizaci, rozpuštění většiny minoritních fází a dostatečné snížení deformačních odporů, na druhé straně by ohřev neměl způsobit přílišné zhrubnutí austenitického zrna. Převodění většiny karbidů, karbonitridy a nitridů do tuhého roztoku (které je podmínkou účinného precipitačního zpevnění v dalších fázích výroby) se stává prioritním, případné zhrublé zrno lze odstranit rekrystalizací. U ocelí mikrolegovaných titanem se proto volí teploty ohřevu okolo 1150 °C.

Poté jsou odstraněny okuje a brama je válcována v předválcovací stolici na tloušťku 20–38 mm. Válcování v přípravném pořadí musí zajistit vedle požadované redukce průřezu i dostatečné zjemnění austenitického zrna. Velikost zrna je funkcí teploty, stupně a rychlosti deformace.

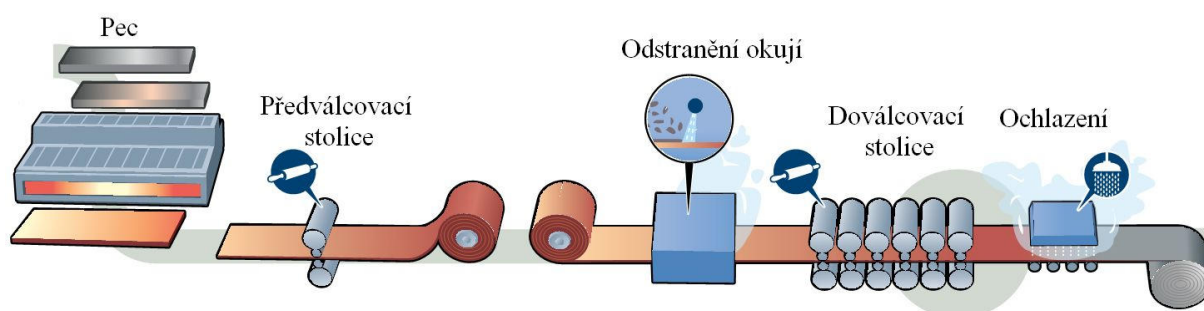
Následuje doválcování vývalku s počáteční teplotou nižší, než je teplota ukončení rekrystalizace. Při válcování v hotovném pořadí, při teplotách 950 až 700 °C, dochází k výraznému zbrzdění rekrystalizace v důsledku snížení difúzní rychlosti a působení brzdicího účinku jemného precipitátu. Deformace precipitaci urychluje (deformačně indukovaná precipitace). Navíc dochází v uvedeném teplotním intervalu k částečné transformaci Fe_γ na Fe_α , takže válcování je často dokončováno v dvoufázové oblasti ($\gamma + \alpha$). Deformační zpevnění feritických zrn a tvorba substruktury je příčinou růstu meze kluzu v tomto stádiu.

Vhodně zvolenou rychlostí ochlazování austenitu z doválcovací teploty lze ovlivnit transformaci jemnozrného austenitu (částečně nebo úplně rekrystalizovaného) na tzv. aciku-

lární (jehlicovitý) ferit anebo na ferit a perlit s výhodnou kombinací pevnosti a ostatních mechanických vlastností.

Ochlazení z doválcovací teploty musí být dostatečně rychlé, aby došlo ke vzniku jemného feritického zrna. Zrychlené chlazení je v závislosti na chemickém složení ukončeno v teplotním rozsahu 625–525 °C, což je obvyklý rozsah teplot navíjení pásu. Výsledná mikrostruktura obsahuje jemná zrna acikulárního feritu o velikosti cca 4–5 µm. Po navinutí pásu se rychlost ochlazování výrazně zpomalí a dochází k precipitaci minoritních fází z mikrolegujících prvků.

Mez kluzu vývalků roste se stoupající teplotou ohřevu, velikostí deformace, při doválcování v hotovném pořadí, rychlostí ochlazování a s klesající doválcovací teplotou.



Obr. 7 Schéma Steckelovy válcovny [31]

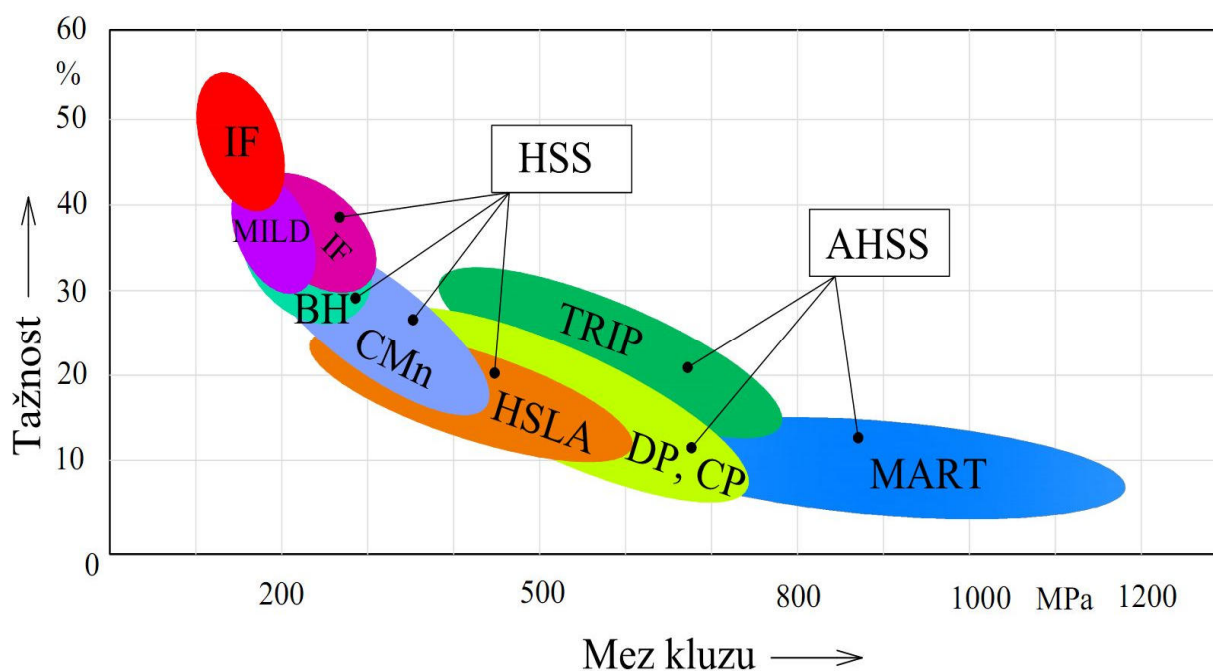
Zerolling se uplatňuje u vysocelegovaných ocelí se strukturou metastabilního austenitu, jehož teplota M_s leží v oblasti záporných teplot. Plastická deformace austenitu usnadňuje vznik zárodků martenzitu, což se projeví zvýšením teploty počátku martenzitické přeměny na teplotu M_d . V intervalu teplot $M_d - M_s$ se plastické deformace využívá k přeměně austenitu na martenzit. Tato přeměna vede ke zvýšení hodnot meze kluzu při malé ztrátě houževnatosti a ke značnému zvýšení plasticity (transformačně zvýšená plasticita – TRIP).

1.3 Rozdělení [1, 2]

Rozdělení těchto ocelí vychází především z hodnot jejich meze kluzu. Do skupiny ocelí s vyšší mezí kluzu patří ty, jejichž mez kluzu je větší než 300 MPa. V poslední době je tendence řadit do této skupiny až oceli s mezí kluzu přesahující 350 MPa.

Dalšími kritérii pro dělení těchto ocelí je jejich chemické složení, způsob zpracování ve válcovnách a tepelné zpracování. Při odstupňované mezi kluzu rozhodují tato další kritéria o úrovni ostatních užitečných vlastností a tedy i o vhodnosti pro různé účely.

Vysokopevné a ultrapevné oceli pokrývají široký rozsah pevnosti – od hodnoty 300 MPa pro termomechanicky válcované mikrolegované oceli po jakosti s pevností nad 1200 MPa s martenzitickou strukturou. Skupina svařitelných ocelí s vyšší mezí kluzu je v anglosaské literatuře označována jako HSS (High Strength Steel), popř. AHSS (Advanced High Strength Steel) pro oceli s velmi vysokou mezí kluzu. Tyto oceli jsou ve výrobních programech všech světových producentů. [2] Standardní HSS bývají feriticko-perlitické oceli, AHSS mají obvykle strukturu bainitickou či martenzitickou.



Obr. 8 Závislost meze pevnosti na tažnosti vybraných druhů ocelí [32]

BH (bake hardened steel) – ocel, u níž je zvýšení pevnosti výsledkem kombinace deformace a stárnutí při teplotách a časech typických pro vytvrzování laku dílce v peci.

IF (interstitial-free steel) – ocel s velmi nízkým obsahem uhlíku a dusíku, do které je přidáno malé množství Ti a Nb k zamezení nežádoucího zpevnění způsobeného zbytkovým množstvím C a N interstiticky rozpuštěných ve struktuře.

MILD – „měkké“ nízkouhlíkové oceli běžných jakostí.

HSLA (high strength, low alloy steel) – oceli známé též jako mikrolegované. Obsahují přísadu mikrolegujících prvků jako Al, Ti, V a Nb, které zvyšují pevnost řízením velikosti zrna a rovněž precipitačně zpevňují strukturu. Dalším možným příspěvkem ke zvýšení pevnosti je substituční zpevnění.

DP (dual phase steel) – dvoufázová ocel sestávající z feritické matrice, která obsahuje druhou tvrdou fázi ve formě ostrůvků martenzitu.

CP (complex-phase steel) – vícefázová ocel s velmi jemnou feritickou strukturou s vysokým podílem tvrdých fází (martenzit, bainit), které jsou dále zpevněny jemnými precipitáty.

TRIP (transformation induced plasticity) – ocel s multifázovou strukturou obsahující 50–60 % feritu, 25–40 % bainitu a 5–15 % zbytkového austenitu. Zbytkový austenit je při 20°C nestabilní a vlivem napětí nebo při deformaci transformuje na martenzit. Tato fázová přeměna je provázána nejen zpevněním, ale i zvětšením plasticity.

MART (martensitic steel) – ocel, ve které se struktura v průběhu zpracování téměř úplně přeměnila na tvrdý martenzit.

CMn (uhlíko-manganové oceli) – oceli s vyšším obsahem uhlíku a manganu. Při vyšších hodnotách meze kluzu se zhoršuje svařitelnost.

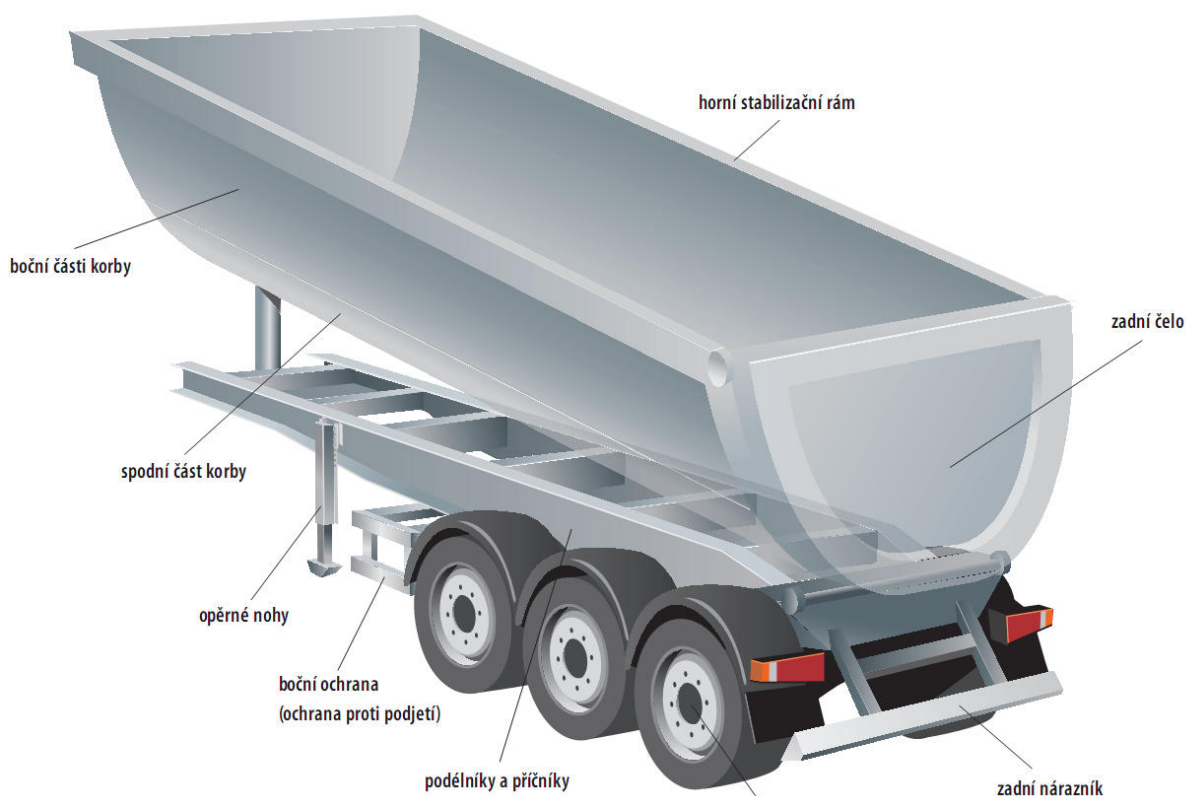
1.4 Využití [2]

Poptávka po ocelích se specifickými vlastnostmi, které jsou využitelné v určitých technických oblastech stále roste. Z hromadně vyráběných ocelí jsou to zejména oceli pro dálkové plynovody, oceli pro automobilový průmysl, oceli pro ocelové konstrukce (mosty, výškové budovy, věže pro podmořskou těžbu) a další kategorie ocelí.

Materiály používané v automobilech musí mít celou řadu důležitých vlastností, jako například vysokou pevnost, odolnost proti únavě, svařitelnost různými způsoby svařování, vhodnost pro tváření za studena, hlubokotažnost, odolnost proti rázu (i za nízkých teplot), schopnost absorbovat energii při srážce a mnoho dalších. Tyto leckdy protichůdné požadavky nemůže splnit jeden materiál, a proto se používají kombinace více druhů materiálů.

Navzdory značnému zvyšování využití hliníkových a hořčíkových slitin v automobilovém průmyslu je jisté, že základním materiálem pro výrobu vozidel bude ještě stále mnoho let ocel. Novou a velice perspektivní technologií je tzv. „tailored blanks“. Jedná se o polotovary pro lisování svařené ze dvou a více materiálů. Tato technologie umožňuje použít vysokopevnou ocel pouze tam, kde je namáhání největší a naopak tam, kde je namáhání minimální použít běžnou konstrukční ocel nebo opět vysokopevnou ocel s menší tloušťkou. Toto řešení přináší snížení nákladů na materiál a také snížení hmotnosti konstrukce.

Aplikace ocelí s vyšší pevností obvykle nepřináší přímý pozitivní ekonomický efekt. Ačkoliv ceny mikrolegovaných ocelí se odvíjí od cen běžných uhlíkových ocelí a nikoliv od cen vysokolegovaných, oceli s vyšší pevností jsou stále dražší. Velký ekonomický přínos spočívá v tom, že využití vysoké pevnosti bude mít za následek snížení hmotnosti konstrukce, přičemž dobrá houževnatost přispěje k bezpečnosti konstrukce a životnosti konstrukce. Přínosem nižší hmotnosti vozidla je buď zvýšení užitečného zatížení nebo snížení spotřeby paliva.



Obr. 9 Příklad použití oceli se zvýšenou pevností pro snížení hmotnosti [33]

1.5 Svařitelnost jemnozrnných ocelí [5, 6]

Vzhledem k tomu, že chemické složení jemnozrnných mikrolegovaných ocelí je podobné jako chemické složení nelegovaných konstrukčních ocelí, dá se předpokládat, že pro ně platí obecné zásady svařitelnosti jako u běžných konstrukčních ocelí s několika odlišnostmi.

Při svařování jemnozrnných ocelí může dojít k růstu zrn v tepelně ovlivněné oblasti. Svařuje se proto pokud možno bez předehřevu a s limitovaným měrným tepelným příkonem při svařování. V případě nutnosti aplikace předehřevu postačí obvykle teploty v rozmezí 100°C až 150°C. U svarových spojů termomechanicky zpracovaných ocelí se dá také očekávat snížení tvrdosti v tepelně ovlivněné oblasti a tím pádem také pokles pevnosti spoje. I v tomto případě je řešením snížení vneseného tepla do svaru, aby šířka tepelně ovlivněné oblasti byla co nejmenší.

Po svaření se tuhé svarové spoje z jemnozrnných mikrolegovaných ocelí pouze žíhají ke snížení vnitřních pnutí. Materiály tohoto typu jsou však precipitačně zpevněné. Žíhací teploty se proto musí volit tak, aby nedošlo k tvorbě nevyhovující disperze karbo-nitridické fáze, to je precipitaci velkého počtu malých částic s velmi malou střední vzájemnou vzdáleností. Tento stav by vedl ke zvýšení meze kluzu, meze pevnosti a tvrdosti a také ke snížení plastických schopností materiálu, tedy ke zkrěhnutí materiálu. Tento stav bývá nazýván popouštěcí křehkost materiálu. Proto se volí žíhací teploty nižší, obvykle pod 600°C.

Oceli s vyšší pevností se považují za citlivé vůči trhlinám za studena, především k tvorbě zbrzděných trhlin indukovaných difúzním vodíkem. Tato citlivost roste s narůstající mezí kluzu. Trhliny vznikají při nízkých teplotách asi pod 200°C. Vyskytují se často v podhousenkové oblasti spojů. Orientaci mohou mít podélnou i příčnou přes všechny oblasti svarového spoje. Studené trhliny jsou transkrystalického charakteru, povrch je lesklý, nezoxidovaný.

Hlavní příčiny vzniku trhlin za studena je vzájemné působení tří faktorů:

- přítomnost vodíku ve svarovém spoji;
- vznik struktury citlivé na účinek vodíku (martenzit, bainit);
- působení tahových zbytkových napětí.

Náchylnost oceli na vznik studených trhlin úzce souvisí s prokalitelností, respektive s transformačním zkrěhnutím. Souhrnný vliv chemického složení na náchylnost oceli na zakažení a tím i náchylnost na vznik trhlin za studena lze vyjádřit uhlíkovým ekvivalentem. Nejrozšířenější rovnici pro výpočet uhlíkového ekvivalentu odvodil Mezinárodní svářečský institut (IIW) na základě měření tvrdosti.

$$CE_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (2)$$

Trhliny za horka vznikají především ve svarovém kovu za vysokých teplot (nad 850°C) během krystalizace. Nejčastěji se vyskytují v kovech s plošně středěnou krystalickou mřížkou, tedy v austenitických ocelích a hliníkových slitinách. Krystalizační trhliny za horka bývají rozevřené a poměrně tvarově složité. Vyskytují se v místech ukončení tuhnutí svaru, což bývá střed svaru.

2 LASER [17, 18, 21]

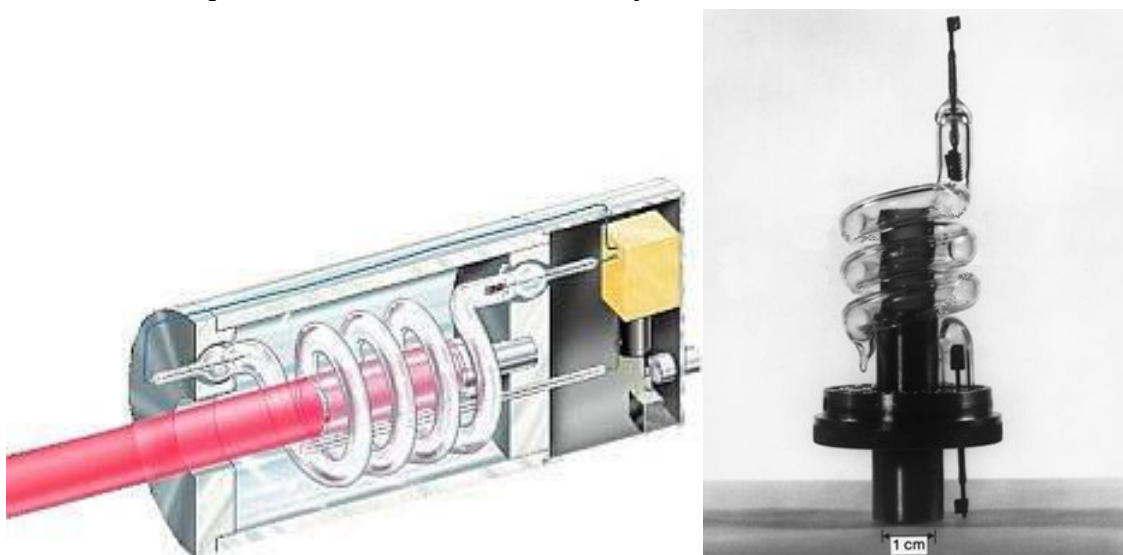
Pojem LASER vznikl z počátečních písmen anglického popisu samotné podstaty jeho principu činnosti „Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation“, což v češtině znamená zesílení světla stimulovanou emisí záření.

Laser je přístroj zkonstruovaný na principech kvantové mechaniky, generující světlo zcela unikátních vlastností, které se v přírodě nikde nevyskytuje. Je monochromatické a má podobu úzkého směřovaného paprsku s velmi nízkou rozbíhavostí a díky svým jedinečným vlastnostem jej lze zaostřit na velmi malý průměr.

2.1 Historie a vývoj [7, 10, 15, 17]

V oblasti kvantové elektroniky platí zákony objevené a zformulované na počátku dvacátého století fyziky M. Planckem, N. Bohrem a A. Einsteinem. Vznik stimulované emise, která se stala základem kvantových zesilovačů, jako první objasnil Albert Einstein v roce 1917. První experimentální důkazy o stimulované emisi podali v roce 1928 Ladenburg a Kopferman. Až v roce 1959 byl udělen patent V. A. Fabrikantovi na zesílení elektromagnetického záření v látce v nerovnovázném stavu získaným pomocným zařízením. Předchůdcem laseru byl tzv. MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Jedná se o zařízení pracující na stejném principu, ale generuje mikrovlnné záření. První kvantové generátory mikrovlnného záření vznikly téměř současně v tehdejší Sovětskému svazu (N. G. Basov a A. M. Prochorov) a USA (Ch. H. Townes). [7]

Návrh laseru byl položen v roce 1954. První projekt zveřejnil Ch. H. Townes v roce 1958. V roce 1960 se podařilo dosáhnout laserového efektu v krystalu syntetického rubínu a uvést do chodu první model laseru americkému fyziku T. Maimanovi.



Obr. 10 Schéma a fotografie prvního rubínového laseru [17]

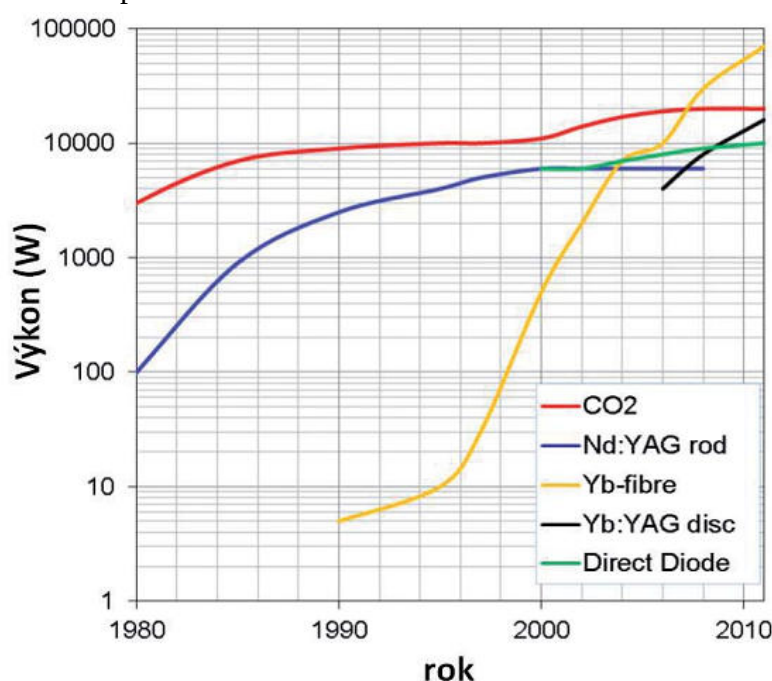
Brzy se začaly objevovat další typy laserů. Lišili se vlnovou délkou generovaného záření, konstrukčním uspořádáním a také výkonem a účinností. Každý laser našel své uplatnění v jiné oblasti, protože ne každý laser se hodí pro daný účel a neexistuje univerzální laser, který by vyhovoval všem podmínkám a požadavkům.

V roce 1988 byl sestaven první, v té době nejsilnější, Nd:YAG laser o výkony 1 kW pro komerční využití. To bylo umožněno díky objevu optického vlákna, které může přenášet záření o vlnové délce blízké infračervenému záření. Nepružný systém zrcadel používaný pro

přenos záření CO₂ laseru mohl být nahrazen flexibilním optickým vláknem namontovaným na průmyslové roboty.

V devadesátých letech se však vývoj zaměřoval na CO₂ lasery, konkrétně na zvyšování výkonů, zlepšování kvality paprsku, zvyšování spolehlivosti a snižování potřeby údržby a zdokonalování ovládání. Koncem této dekády reprezentovali CO₂ lasery kolem 55 % prodaných laserů pro průmyslové využití, drtivá většina v rozsahu výkonu od 3 do 5 kW. V roce 1997 firma Trumf uvedla na trh Nd:YAG laser o výkonu 4 kW, který znamenal přímou konkurenci pro CO₂ lasery. Navíc možnost přenosu záření optickými vlákny otevřelo nové možnosti využití pro zpracování součástí složitých tvarů. V automobilním průmyslu postupně pevnolátkové YAG lasery začali nahrazovat lasery plynové především v oblasti svařování.

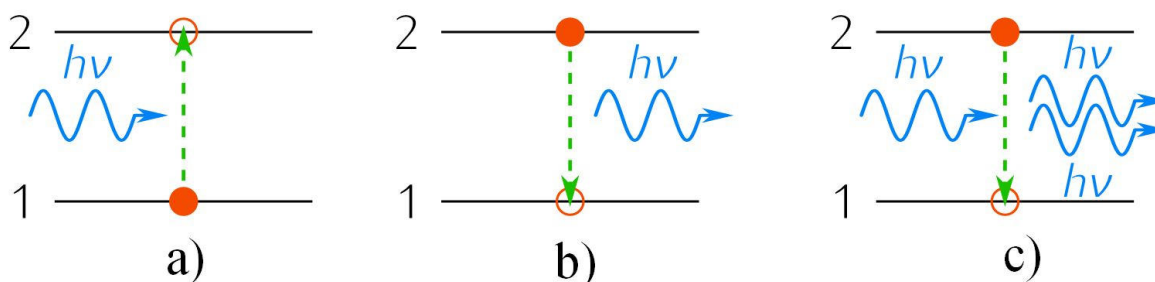
V současné době však stále jako zdroj laserového záření převažují CO₂ lasery, které nabízejí nejen dostatečný výkon, ale jsou i značně robustní a snášejí drsné průmyslové prostředí i nasazení ve vícesměnném provozu.



Vývoj laserových zdrojů [16]

2.2 Fyzikální princip činnosti [17]

Základem každého laseru je aktivní prostředí. Jde o medium schopné zesilovat jím procházející záření díky stimulované emisi. Jde o jev, který může nastat při interakci fotonu s atomem nebo molekulou. Obecně jsou možné tři základní typy interakcí. Jejich schémata znázorňuje obrázek 11.



Obr. 11 Schéma a) absorpce, b) spontánní emise, c) stimulované emise [17]

Princip stimulované emise záření je schématicky vysvětlen na dvou hladinovém systému. Jsou zde zobrazeny dvě libovolné energetické hladiny 1 a 2 některého atomu daného materiálu s energiemi E_1 a E_2 ($E_1 < E_2$). Pro jednoduchost lze hladinu 1 považovat za hladinu základní, to je kvantový stav s minimální energií.

Atom nejdříve leží na hladině 1 a má tendenci na základní hladině setrvat, dokud mu není nějakým způsobem dodána energie. Tímto stimulem ke změně jeho energetického stavu může být dopadající elektromagnetická vlna reprezentovaná fotony. Je-li energie jejích fotonů rovna rozdílu $E_2 - E_1$, absorbuje atom tuto energii a s konečnou pravděpodobností přejde na hladinu 2. Tento jev je nazýván absorpcí záření (obr. 11a).

Atom se již nachází na hladině 2. Vzhledem k tomu, že $E_2 > E_1$, má atom tendenci přejít do energeticky výhodnějšího stavu, tj. na hladinu 1. Současně musí snížit svoji energii o rozdíl $E_2 - E_1$. Je-li energie vyzařena v podobě elektromagnetického záření, nazývá se tento děj spontánní emise (obr. 11b). Frekvence uvolněného vlnění splňuje vztah:

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}, \quad (3)$$

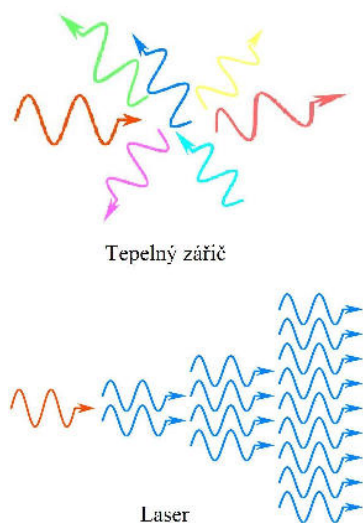
kde: ν – frekvence uvolněného vlnění [s^{-1}],
 E_1, E_2 – energie jednotlivých hladin [J],
 h – Planckova konstanta ($6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot s^{-1}$).

V případě, že se atom nachází na hladině 2 a současně na něj dopadá elektromagnetická vlna s frekvencí ν , tedy frekvencí spontánně emitované vlny, existuje pravděpodobnost, že dopadající vlna donutí atom přejít do stavu 1 za současné emise záření s energií o velikosti $h \cdot \nu$. Dopadající a emitované vlnění mají stejný směr, jsou ve fázi, skládají se a tím dochází k zesílení původního vlnění. Došlo ke stimulované emisi záření (obr. 11c).

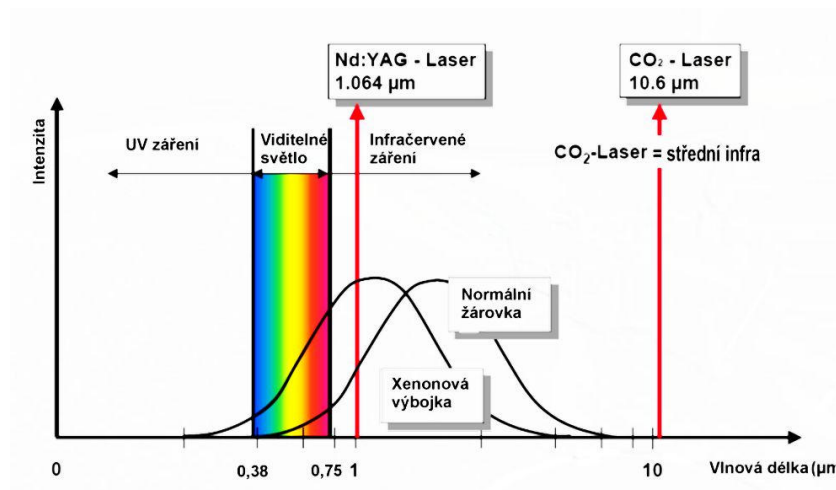
Nutným předpokladem nepřetržité stimulované emise je přítomnost inverzní populace, tedy přebytky částic na vyšších energetických hladinách vůči počtu částic na hladinách nižších. V opačném případě by došlo k opětovné absorpci uvolněné energie částicemi z nižších hladin.

2.3 Vlastnosti laserového paprsku [7, 17, 19, 24]

Jak již bylo uvedeno, laser je zdrojem unikátních vlastností. Mezi nejdůležitější vlastnosti patří monochromaticnost, koherentnost, směrovost a módová struktura. Srovnání emise záření běžného světelného (tepelného) zdroje, např. žárovka, výbojka apod., a laseru uvádí obrázky 12 a 13.



Obr. 12 Srovnání emise [17]



Obr. 13 Elektromagnetické spektrum [34]

Monochromaticita

Monochromaticita charakterizuje schopnost zdroje zářit v úzkém rozmezí vlnových délek. Stimulovaně emitované fotony (záření) mají všechny stejnou vlnovou délku a tím i energii. Vlnová délka záření definuje jeho barvu. Laserové záření je proto monochromatické. Se zkracující se vlnovou délkou roste energie fotonů.

Koherentnost

Fotony laserového záření emitované z různých míst aktivního prostředí jsou ve fázi a postupují stejným směrem.

Směrovost

Vysoká směrovost nebo-li nízká rozbíhavost (divergence) je jedinečnou vlastností laserového záření. Rozbíhavost je charakterizována prostorovým úhlem. V praxi se však jako parametr neuvádí prostorový úhel, ale rovinný úhel divergence paprsku, jestliže má prostorový úhel tvar kuželu (v případě jiného tvaru paprsku se uvádějí hodnoty dvou rovinných úhlů navzájem na sebe kolmých).

Všeobecně lze určit velikost divergence Θ jako závislost na vlnové délce a výstupního průměru paprsku podle vztahu: [24]

$$\Theta = \frac{4 \cdot \lambda}{\pi \cdot d_m}, \quad (4)$$

kde: λ – vlnová délka záření [mm],

π – Ludolfovo číslo,

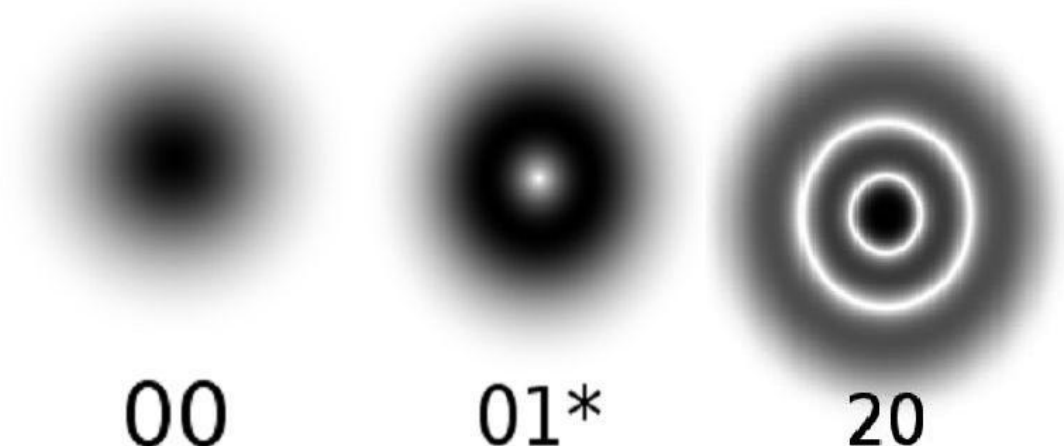
d_m – průměr paprsku na výstupu z rezonátoru [mm].

Vysoká koherence a nízká rozbíhavost laserového svazku umožňují přenášet jej jako téměř paralelní paprsek a jeho fokusaci (soustředění) na velmi malý průměr porovnatelný s vlnovou délkou a tím dosažení vysoké hustoty výkonu laserového záření.

Módová struktura

Stacionární rozložení intenzity elektromagnetického záření na zrcadlech rezonátoru je závislé na geometrickém tvaru aktivního prostředí a zrcadel a je označováno jako TEM – „transversal electromagnetic mode“ (příčný elektromagnetický mód). Při technologických

aplikacích, jako je řezání, svařování a vrtání, je potřeba maximální hustota výkonu. U průmyslových laserů se tedy nejčastěji vyskytuje Gaussovský mód TEM_{00} u vláknových laserů, prstencový mód TEM_{01*} u CO_2 laserů a mód TEM_{20} u výkonových Nd:YAG laserů.



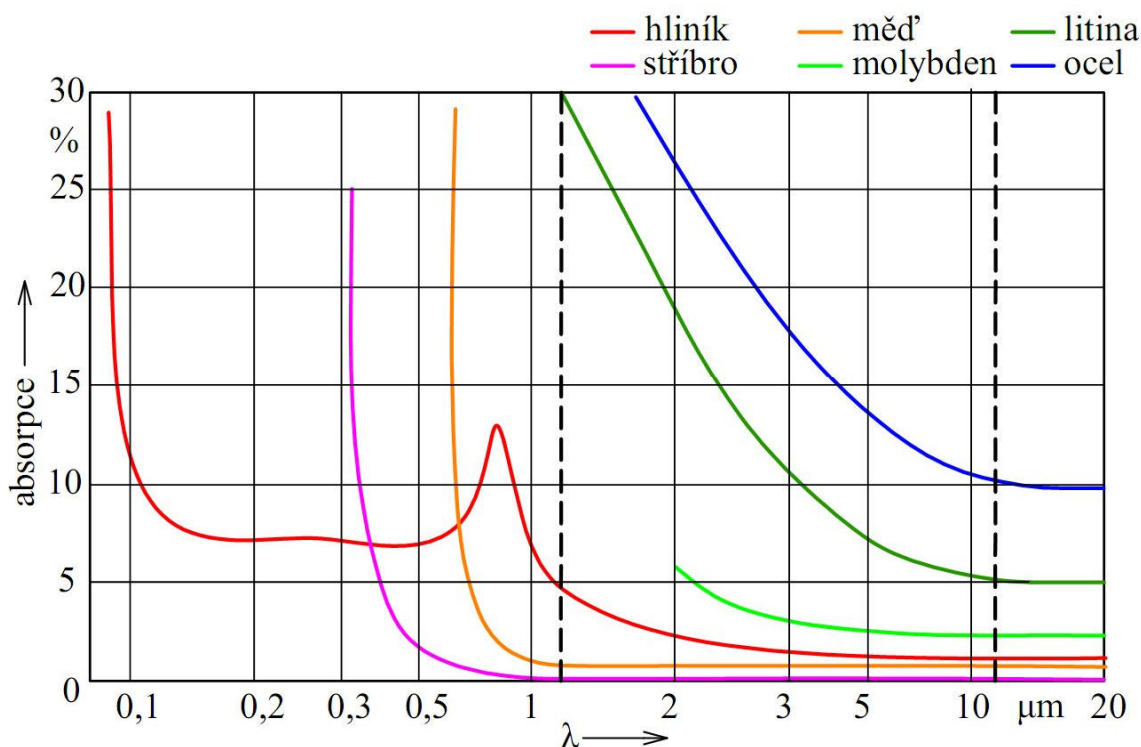
Obr. 14 Příčné elektromagnetická módy TEM_{00} , TEM_{01*} a TEM_{20} [9]

2.4 Absorpce a reflexe [7, 24]

Nejdůležitějším předpokladem pro efektivní využití laserové paprsku pro zpracování materiálů je absorpce záření tímto materiálem a následné přeměna v teplo. Účinné pohlcení a změna světelné energie na tepelnou se v praxi ukazuje jako důležitý ukazatel nejen při zpracování kovů. Pro oblast nízkých intenzit výkonu (do $10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$) koeficient odrazu neboli reflexe závisí zejména na elektrických vlastnostech kovu. V případě vzrůstu teploty se zvýší i absorpce, jelikož elektrická vodivost kovu klesá.

Optické vlastnosti látek jsou materiálovou charakteristikou, ale také výrazně závislé na parametrech laserového paprsku. Obecně platí, že snižováním vlnové délky záření roste koeficient absorpce. Na obrázku 15 je znázorněna závislost absorpce na vlnové délce záření působící kolmo na povrch součásti z různých materiálů. Jasně tedy vyplývá výhoda použití pevnolátkových laserů o vlnové délce $1,06 \mu\text{m}$ oproti často užívaných CO_2 laserům s vlnovou délkou záření $10,6 \mu\text{m}$.

V reálných technologických aplikacích je však reflexe ovlivněná množstvím sekundárních efektů. Kovové povrchy obvykle vykazují nižší reflexi a tím vyšší absorpci vlivem nečistot a makroskopických defektů. Toho se využívá k záměrné snížení reflexe způsobem opracování povrchu (jako zdrsnění nebo drážkou ve tvaru obráceného V), nanesením tenké krycí nekovové vrstvy (např. grafit), posypáním kovovým nebo nekovovým práškem, či mořením.



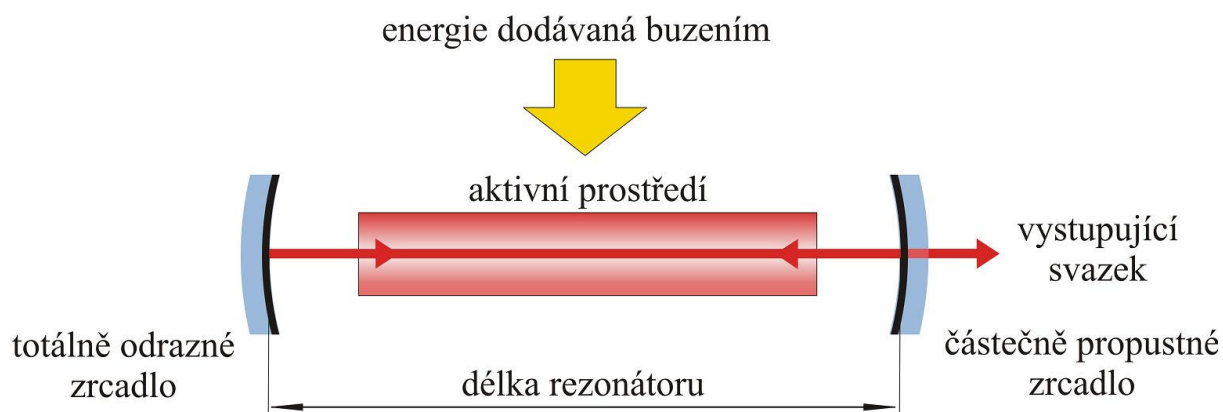
Obr. 15 Pohltivost laserového záření různými materiály v závislosti na vlnové délce záření λ [25]

2.5 Základní prvky laseru [17]

Kromě již zmiňovaného aktivního prostředí, ve kterém dochází ke stimulované emisi jsou nezbytnými základními součástmi laserových systémů čerpací zařízení, optický rezonátor, vedení svazku, chlazení, manipulační zařízení a řídicí počítač.

Čerpací (budicí) systém dodává energii aktivnímu prostředí a zajišťuje přebytek částic ve vyšším energetickém stavu, tedy inverzní populaci nutnou pro zajištění stimulované emise.

Pro dosažení vyššího počtu stimulovaných přechodů oproti spontánním musí být zařazen optický rezonátor (obr. 16). Jde o dvě zrcadla, mezi nimiž je umístěno aktivní prostředí. Záření vystupující z aktivního prostředí se odráží od zrcadla zpět do aktivního prostředí, kde funguje jako podnět k další stimulované emisi. Opakovanými odrazy se laserové záření zesiluje. Po dosažení požadované intenzity opouští svazek rezonátor jedním ze zrcadel, které je částečně propustné.



Obr. 16 Schéma optického rezonátoru [17]

V případě průmyslových laserů je svazek opouštějící rezonátor dále upravován systémem čoček a clon, který zvyšuje kvalitu a upravuje průměr výstupního svazku. Tento systém se nazývá expander a slouží především ke snížení divergence svazku. V expanderu dochází k velkým energetickým ztrátám, což vždy snižuje výslednou účinnost laserového systému. Kvalita svazku je však v řadě aplikací preferována před jeho výkonem.

Filtrovaný svazek je dále soustavou zrcadel a čoček veden do pracovní hlavy laseru (laserové hlavy), případně do optického vlákna a jejich prostřednictvím k místu určení. Materiál, ze kterého jsou optické komponenty vyrobeny, závisí na vlnové délce generovaného záření a nesmí toto záření pohlcovat. Nejvíce se používá dielektrické sklo nebo leštěné kovy.

Vzhledem k velkým energetickým ztrátám při buzení aktivního prostředí, dalším ztrátám v rezonátoru i na optických prvcích, kterými svazek prochází, dochází během činnosti laseru k významnému ohřevu mnoha součástí. Je-li aktivním prostředím krystal, může docházet i ke změnám jeho rozměrů, a tím i vlastností a při určité teplotě přestává laser fungovat. Každý výkonový laserový systém proto musí být vybaven chladícím zařízením. Tradičně se využívá především chlazení založené na proudění kapaliny.

2.6 Rozdělení laserů [17, 18]

Existuje mnoho různých typů laserů, jejichž základní princip je sice stejný, ale liší se výrazně konstrukcí a realizací jednotlivých částí. Lasery je možné dělit podle typu aktivního prostředí, vlnové délky, pracovního režimu, způsobu buzení, výkonu, účelu a dalších parametrů. Přehled tří základních způsobů klasifikace laserů uvádí tabulka 2.

Tabulka 2 Základní klasifikace laserů [17]

Podle typu aktivního prostředí:

<i>plynové</i>	atomární: He-Ne, He-Cd, Cu iontové: Ar, Kr molekulární: CO ₂ , N ₂ , H ₂ excimerové: XeBr, KrO, ArO
<i>pevnolátkové</i>	Nd:YAG, Nd:sklo, Er:YAG, Yb:YAG, Ti:safír, rubínový
<i>diodové</i>	GaAs, GaN, PbSnSe, InAsSb
<i>kapalinové</i>	na bázi organických barviv: coumarin, fluorescein, cyanin

Podle vlnové délky:

<i>infračervené</i> (780 nm – 1 mm)
<i>emitující ve viditelné oblasti</i> (360 – 780 nm)
<i>ultrafialové</i> (10 – 360 nm)

Podle režimu práce:

<i>kontinuální</i>	nepřetržitá generace záření
<i>pulzní</i>	pulzy s vysokou frekvencí
<i>impulzní</i>	vysoce energetické pulzy s nízkou opakovací frekvencí

2.6.1 Plynové lasery [7, 9, 18, 19, 20]

Plynové lasery jsou lasery s aktivním prostředím v plynné fázi. Inverze populace hladin je vytvářena mezi energetickými hladinami některé ze složek plynu. Podle typu energetických přechodů je možno tyto lasery rozdělit na atomové (He-Ne, Ar, Xe), iontové (Ar, Kr, He-Cd, He-Se), molekulové (CO₂, CO, H₂O, N₂O, HCN, HF), s parami kovů (Cu, Au, Pb) a excime-

rové (Ar_2 , Kr_2 , Xe_2). Tato různorodost se pak odráží v rozsáhlém spektru vlnových délek plynových laserů.

Většina plynových laserů pracuje v kontinuálním režimu, ale existují i výkonné pulzní systémy. Pro buzení se používá široká škála fyzikálních a fyzikálně chemických procesů. K nejčastějším patří buzení pomocí elektrického výboje ve zředěném plynu, ale efektivně se používá také příčné buzení elektrickým výbojem za vysokých tlaků (TEA CO_2 laser), buzení elektronovým svazkem, chemickou reakcí či expanzí horkého plynu. Zřídka se využívá i optického buzení.

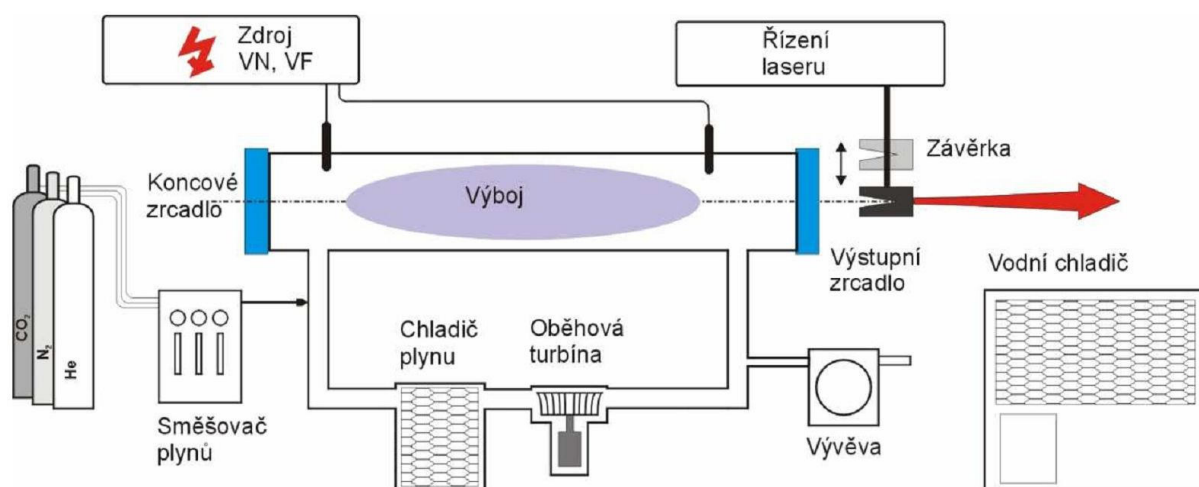
Proces stimulované emise v plynné fázi probíhá mezi neutrálními stavy atomů, iontů, molekul a mezi rotačně vibračními hladinami molekulárního spektra. Protože je koncentrace aktivních částic v plynné části menší než pevných aktivních prostředí, jsou zisky výkonu plynových laserů na jednotku délky trubice s aktivním prostředím menší. Vysokých výkonů se dosahuje prodloužením dráhy záření v aktivním prostředí. Obecně lze říci, že homogenita aktivního prostředí se odráží v celkově dobré homogenitě laserového svazku a v jeho nízké rozbíhavosti, která v případě plynových laserů dosahuje teoretické meze. Hlavní nevýhodou většiny těchto laserů je malý výstupní výkon, který lze získat z jednotky objemu aktivního prostředí.

Donedávna nejrozšířenějším a zároveň prvním plynovým laserem je červeně zářící atomární He-Ne laser. V průmyslu a v medicíně je dnes však nejvíce používaný CO_2 laser.

CO_2 lasery

Aktivním prostředím CO_2 laserů je směs helia, dusíku a oxidu uhličitého v poměru 5:4:1. Záření o vlnové délce $10,6 \mu\text{m}$ je generováno při změně vibračního módu molekul CO_2 , čerpání je realizováno nepružnými srážkami s molekulami N_2 , které jsou excitovány elektrickým výbojem nebo vysokofrekvenčními proudy. Helium má funkci chladiče, urychluje přechod molekul CO_2 z dolní hladiny E_1 do základního stavu E_0 .

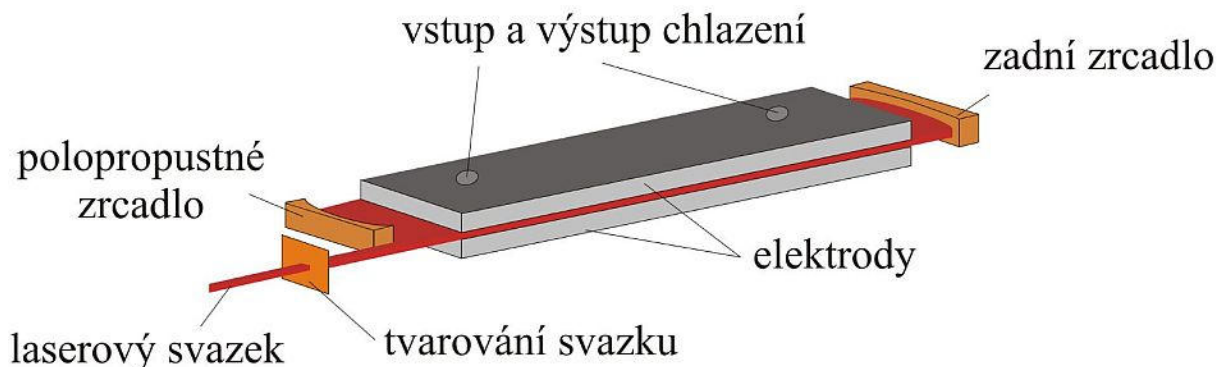
Podle směru proudění plynové směsi se tyto lasery dělí na „fast axial flows“ s podélným prouděním, kde výstupní svazek s vysokou kvalitou je určen pro vrtání a řezání, a „cross flow“ s příčným prouděním, kde výstupní svazek nižší kvality je vhodný pro svařování a povrchové aplikace. Výstupní výkon těchto laserů běžně dosahuje 20 kW při celkové účinnosti přibližně 10 %. Velkou nevýhodou CO_2 laserů je nutnost vést paprsek pouze složitým systémem zrcadel z důvodu nemožnosti vedení dané vlnové délky pomocí optických kabelů



Obr. 17 Schéma CO_2 laseru [34]

Difúzně chlazený deskový (slab) laser

Difúzně chlazený deskový (slab) laser je nejnovějším typem průmyslových CO₂ laserů. K odvodu tepla dochází jeho rozptylem na vodou chlazených vysokofrekvenčních elektrodách na rozdíl od CO₂ laserů, kde je plyn chlazený průchodem přes chladič v nuceném oběhu. Díky malé mezeře mezi měděnými elektrodami je intenzita chlazení velmi dobrá a není nutné nucené proudění plynu, jehož spotřeba je tedy velice nízká. Obsah zásobníku plynné směsi vydrží až na jeden rok nepřetržitého provozu. Výstupní výkony deskových laserů se pohybují mezi 0,5 až 2,5 kW.



Obr. 18 Schéma deskového CO₂ laseru [17]

Excimerové lasery

Excimerové lasery jsou plynové pulzní lasery, jejichž aktivním prostředím je plyná směs excimeru (1 %) a pomocných plynů helia a neonu. Excimer je název pro excitovaný dimer, což je nestabilní dvouatomová molekula vzácného plynu. Hlavním důvodem použití těchto laserů je velmi krátká vlnová délka (kolem 200 nm) umožňující velice přesné obrábění s přesností na mikrometry. Interakce s materiálem je založena na studené ablaci – vytrhávání částic fotony o vysoké energii. Celková účinnost je 1 – 2 %.

2.6.2 Pevnolátkové lasery [9, 17, 18, 20, 22]

Do této skupiny laserů se někdy řadí všechny lasery, jejichž aktivní prostředí se nachází v pevném stavu. Následovat může další dělení podle vodivosti aktivního prostředí na polovodičové lasery a lasery, jejichž aktivní prostředí tvoří dielektrikum. V užším slova smyslu jsou jako pevnolátkové lasery označovány pouze opticky čerpané iontové lasery.

Jeho hlavní výhoda spočívá ve vlastnostech použitého aktivního prostředí – krystalická látka je velmi stabilní, vyniká vysokou hustotou energie a akumulací schopností, umožňující generovat krátké vysoko výkonové pulsy. Konstrukce je v porovnání s plynovými lasery podstatně kompaktnější, příznivá je i kratší vlnová délka v porovnání s CO₂ laserem. Záření pevnolátkových laserů lze díky tomu snadno přenášet optickými vlákny do vzdálenosti až několik desítek metrů.

Aktivní prostředí tvoří opticky propustná matrice (izolant) ze skla nebo umělého krystalu (rubín, yttrium-aluminium-granát, yttrium-vanadát, křemíkové sklo) dopované iontem vzácných zemin (neodym, erbium, yterbium, holmium, thulium). Průmyslově využívané materiály jsou Nd:YAG, Nd:sklo a Yb:YAG s vlnovou délkou v blízké infračervené oblasti spektra 1030 – 1094 nm.

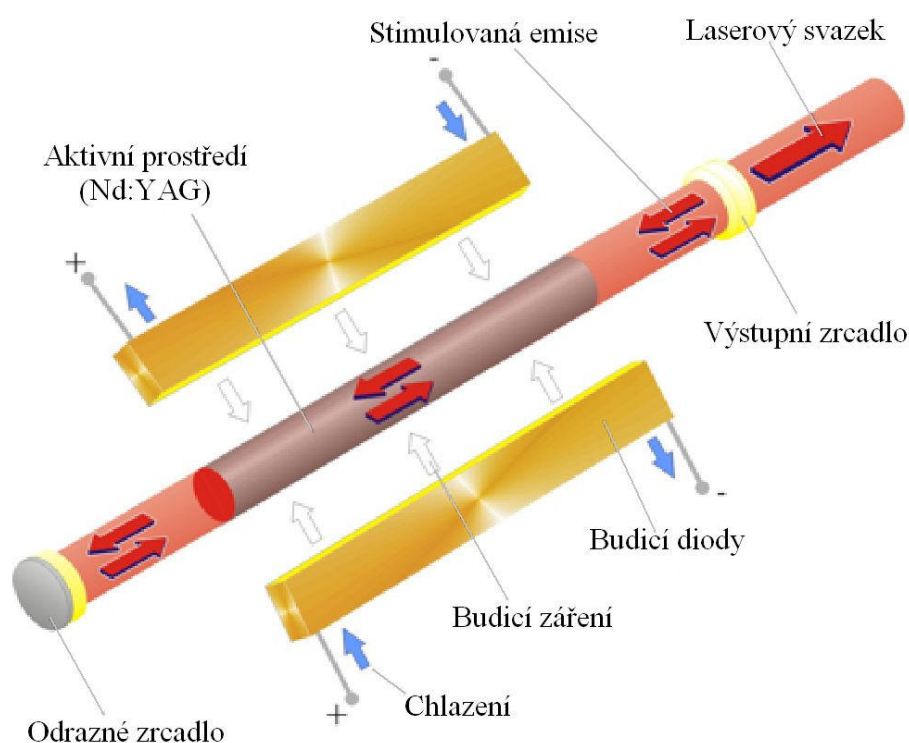
Čerpání aktivních iontů probíhá opticky, ve starších typech laseru kryptonovou nebo xenonovou výbojkou, které mají široké emisní spektrum v rozsahu od 450 do 850 nm a tedy účinnost čerpání je nízká, což vede k celkové účinnosti 3 % a ke značnému potřebnému elektrickému příkonu výkonových systémů (až 200 kW) a s tím spojená nutnost chlazení.

Uvedené nedostatky dnes výrobci odstraňují nahrazením výbojkového čerpání čerpáním polovodičovými diodami, jejichž vlnová délka odpovídá výraznému absorpčnímu maximu iontu (např. 808 nm pro Nd^{3+}). Takové systémy naopak vynikají vysokou účinností (15 až 20 %), řádově nižší spotřebou elektrické energie a chladicí kapaliny.

Další zvýšení účinnosti umožňují nejmodernější tvary aktivního prostředí – malý disk (Yb:YAG) o průměru 10 mm a tloušťce 0,25 mm v případě diskových laserů, nebo křemíkové vlákno o průměru 4 – 6 mm, dopované Yb, Er, Th nebo Nd ionty ve vláknových laserech.

Nd:YAG lasery

Nejrozšířenějším a dnes asi nejlépe technicky zvládnutým pevnolátkovým laserem je laser označovaný Nd:YAG. Jeho aktivním prostředím je neodymem dopovaný ytrium aluminium granát. Tento laser našel bohaté uplatnění jak v průmyslu, tak v medicíně a vědě. Generuje neviditelné infračervené záření o vlnové délce 1064 nm, ale s pomocí nelineární optiky se často využívá při generaci viditelného zeleného světla na vlnové délce 532 nm. Schéma diodou čerpaného vysoko výkonového kontinuálního Nd:YAG laseru je zobrazeno na obrázku 19.



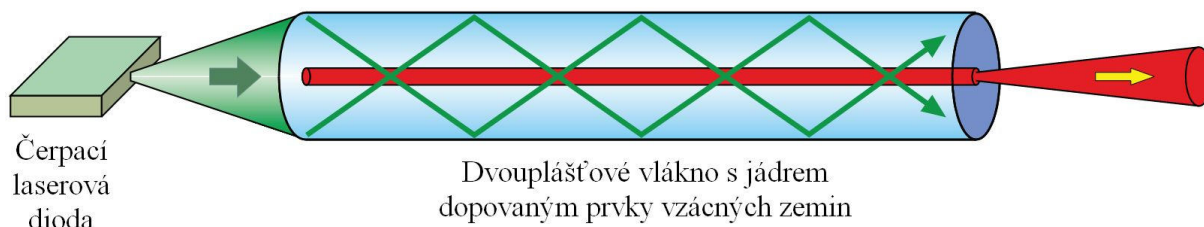
Obr. 19 Schéma diodou čerpaného Nd:YAG laseru [17]

Obvyklý tvar krystalu je tyčinka o délce 150 – 200 mm o průměru několika milimetrů, poskytující maximální výkon 500 W. Pro dosažení výkonů několika kilowatů je do rezonátoru sériově zařazeno více kavit s krystalem.

Vláknové Yb:YAG lasery

Aktivním prostředím vláknových laserů je křemíkové vlákno s průměrem jádra několik mikrometrů a délce až několik metrů dopované ionty Er, Yb nebo Tm, které se ve formě ma-

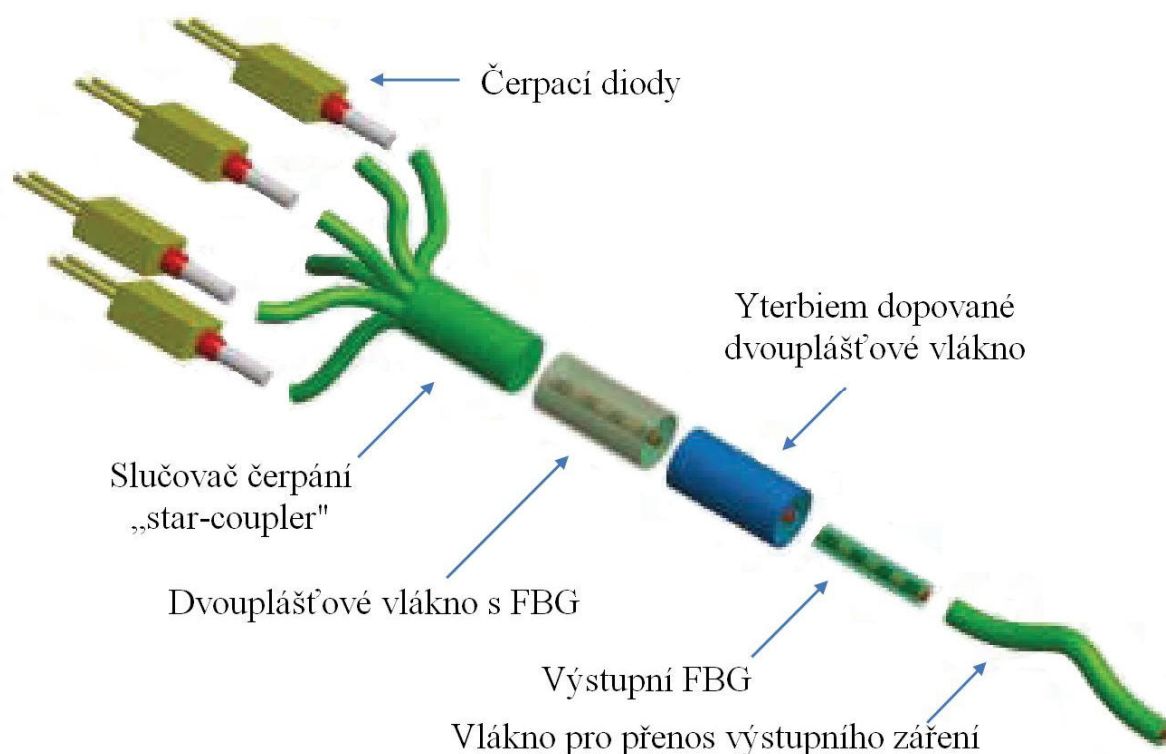
lých částic přimísí do jádra během výroby. Hlavní absorpční čáry těchto dopantů spadají do emisních pásů laserových diod, proto je čerpání diodami vysoce účinné. Rezonátor tvoří Braggovy mřížky na koncích vlákna. Braggova mřížka je tvořena pásy s odlišným indexem lomu. Při dostatečném počtu pásů se mřížka chová jako velmi účinné zrcadlo.



Obr. 20 Princip vláknového laseru [22]

Princip laseru s dvouplášťovým aktivním vláknem je naznačen na obr. 20, uspořádání jeho komponent pak na obr. 21. Jádro vlákna je dopováno ionty prvků vzácných zemin schopných laserového zesílení. Vnitřní plášť má pak nižší index lomu než jádro, takže jádro slouží jako vlnovod pro signál. Jádro je většinou jednomódové. Vnitřní plášť je obklopen ochranným obalem také z materiálu s nižším indexem lomu, než má sám. Vnitřní plášť tedy slouží jako vlnovod pro šíření čerpání. Protože vnitřní plášť má relativně velkou plochu průřezu, je možné do něj účinně navázat z čerpacích diod vysoký optický výkon.

Vysoce rozbíhavý svazek z čerpacích mnohamódových laserových diod je fokusován na odrazovou vrstvu vnitřního pláště a při každém průchodu jádrem je částečně absorbován na iontech vzácných zemin, čímž je zajištěno buzení aktivního prostředí. Excitované ionty pak mohou formou stimulované emise předat svou energii zesilovanému signálu.



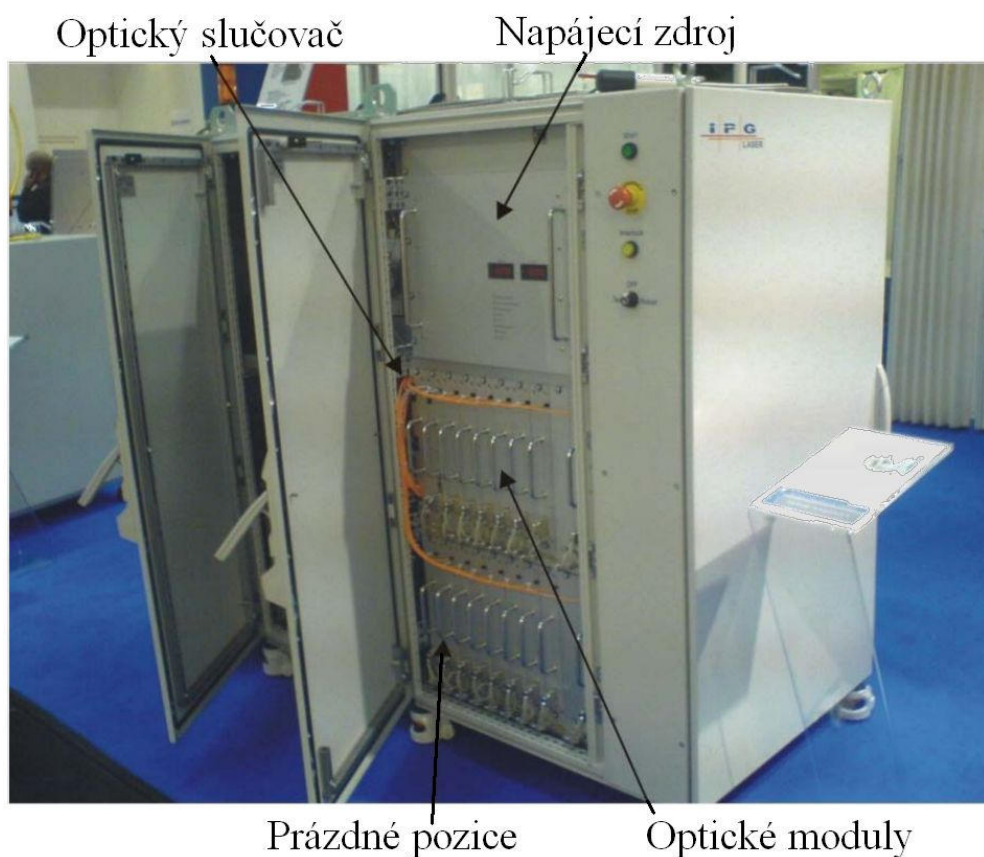
Obr. 21 Princip vláknového laseru [22]

Hlavní výhodou vláknového laseru je vedení svazku z rezonátoru dalším vláknem bez nutnosti použití citlivých optických prvků. Svazek má vysokou kvalitu a může být fokusován

na velmi malý průměr. Vzhledem k velké délce aktivního prostředí mají lepší odvod tepelných ztrát a odpadá komplikované chlazení. V současné době jsou nejvýkonnější lasery ytterbiové, erbiové a thuliové lasery dosahují obvykle řádově desetkrát nižších výkonů.

Budicí LED jsou na vlákno navázány pomocí optických odbočnic známých z telekomunikačních optických kabelů. Mezi výhody takové konfigurace patří velmi jednoduchá a kompaktní konstrukce, dlouhá životnost vzhledem k tomu, že se k buzení používají LED zdroje záření, pouze malé chlazení a z toho všeho vyplývající nízké provozní náklady (ze všech v průmyslu používaných laserů nejnižší) - viz tabulka 3. Nevýhody souvisí s vlastní technologií výroby vlákna a s některými fyzikálními jevy, které doposud znemožňují dosažení ještě vyšších výkonů na každý metr délky vlákna. [23] Fyzikální limit výstupního výkonu z jediného vláknového laserového je odhadnut na cca 10 – 20 kW. Hlavními omezujícími faktory výstupního výkonu vláknových laserů jsou ztrátové teplo a nežádoucí nelineární jevy. Pro dosažení vyšších výkonů se proto používá kombinování výstupů z několika vláknových laserů složením jednotlivých výstupních svazků do společné výstupní čočky.

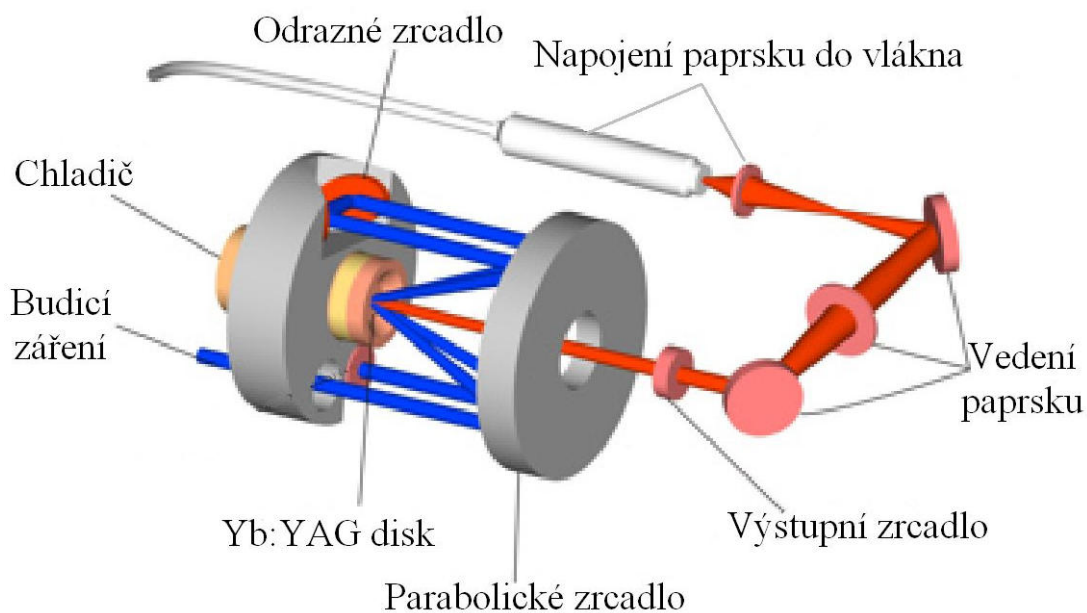
V současné době výrobci nabízejí vláknové laserové systémy jednomódové a vícemódové až do 30 kW ve formě stavebnice dle požadavků. Co se týče konstrukce, jednotlivé moduly jsou v podstatě kazety o výkonu v řádu stovek wattů, kdy na jedné straně je navinuto již popsané speciální optické vlákno a na druhé straně kazety je umístěn soubor budicích LED. Optický slučovač – integrátor je umístěn ve druhé části skříně spolu se vzduchovým chlazením vlákna, případně s výměníkem tepla vzduch/voda. Výsledkem je velice jednoduchá, kompaktní a robustní konstrukce, u jiných typů laserů nedosažitelná.



Obr. 22 Popis konstrukce stavebnicového vláknového laseru [34]

Diskové lasery

Aktivní prostředí diskových Yb:YAG laserů je formováno do tvaru válce o výšce několik desetin milimetru a průměru obvykle do 10 mm. Svazek má gaussovo rozdělení intenzity s vysokou zaručenou kvalitou. Stěna diskového krystalu aktivního prostředí je současně zadním zrcadlem optického rezonátoru. Krystal je uchycen na chladiči, který udržuje stálou teplotu. Tato geometrie krystalu má řadu výhod oproti běžnému tvaru Nd:YAG laseru. Dosahuje se lepší kvality svazku, vyšší účinnosti čerpání (20 %), možnosti vyšších výkonů až 17 kilowatů, úzkého výstupu do vlákna (0,2 mm) a kompaktnějších rozměrů.



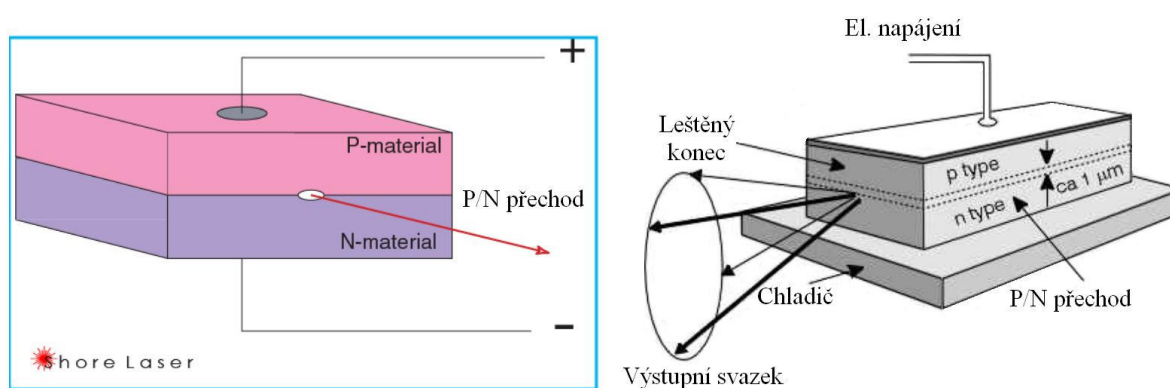
Obr. 23 Schéma diskového laseru [17]

2.6.3 Polovodičové lasery [18, 19]

Polovodičové lasery jsou dnes vůbec nejrozšířenější lasery. Často se pro ně používá označení laserová dioda. Od ostatních typů laserů se liší tím, že nepracují s přechodem elektronů mezi diskrétními hladinami, nýbrž se u nich vyskytují elektronové přechody mezi vodivostním a valenčním pásem polovodiče. Aktivním prostředím je již zmíněný polovodičový materiál, ve kterém jsou aktivními částicemi nerovnovážné elektrony a díry, tj. volné nosiče náboje, které mohou být injektovány. V polovodičovém aktivním prostředí je možno dosáhnout velkého optického zesílení. Vzhledem k tomu jsou rozměry aktivního elementu mnohem menší než u ostatních laserů. Délka rezonátoru bývá přibližně 50 μm až 1 mm. Inverze populace se dosahuje nejčastěji injekcí nosičů náboje přechodem PN.

Hlavní předností polovodičových laserů je jejich kompaktnost, vysoká účinnost (běžně až 50 %), možnost spektrálního přeladění v širokém spektrálním pásmu a pomocí výběru aktivního prostředí generace záření vlnových délek od 300 nm do 30 μm . Mohou pracovat jak v kontinuálním tak v pulzním režimu. Nevýhodou je rozbíhavost generovaného záření a velká závislost parametrů záření na teplotě aktivního polovodičového materiálu. Velká rozbíhavost a vějířovitý svazek je charakteristický pro všechny polovodičové lasery a je spolu s velkou teplotní závislostí hlavní nevýhodou těchto laserů.

Uplatnění našly tyto lasery především v telekomunikacích a ve výpočetní technice. Dnes se jich stále častěji používá pro čerpání pevnolátkových laserů.



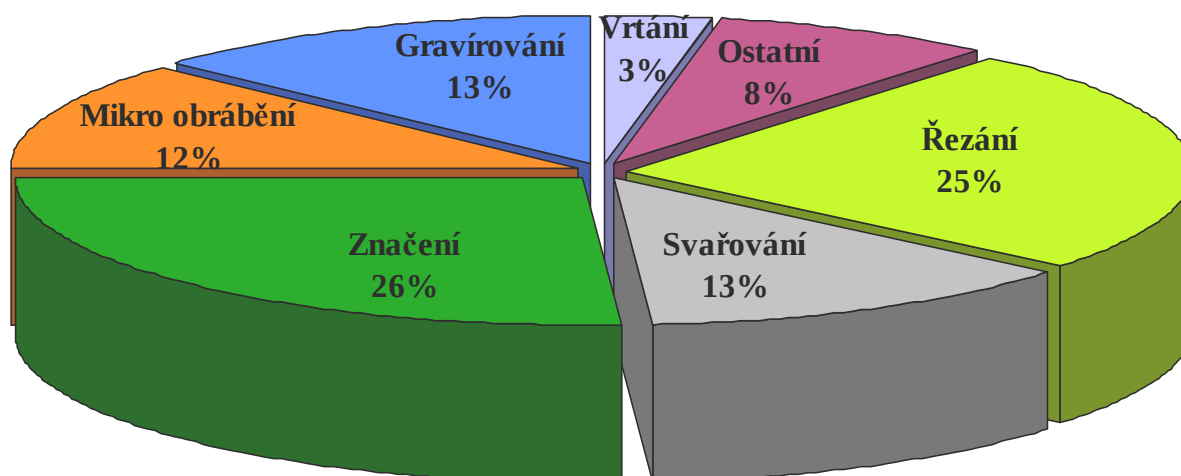
Obr. 24 Schéma laserové diody [17]

2.7 Využití laseru v průmyslu [7, 17, 20]

Laser vytváří široké možnosti využití v technologických aplikacích. Laserové zpracování je označováno jako fyzikální způsob zpracování vysoce čistým zdrojem a s vysokou hustotou energie. Umožňuje soustředění energie na velmi malou plochu, kde přívod energie je tak velký, že potlačuje vliv odvodu tepla do materiálu. Technologické procesy se tak zrychlují a ovlivňují mnohem menší objem materiálu. Pokud jde o materiálové technologie, jako svařování a řezání, ukazuje se, že výhodou laserových zdrojů není jen vysoká hustota energie, ale i rafinace kovu v důsledku přednostního vypařování lehce tavitelných nečistot. Přetavený materiál je tedy čistší než základní materiál.

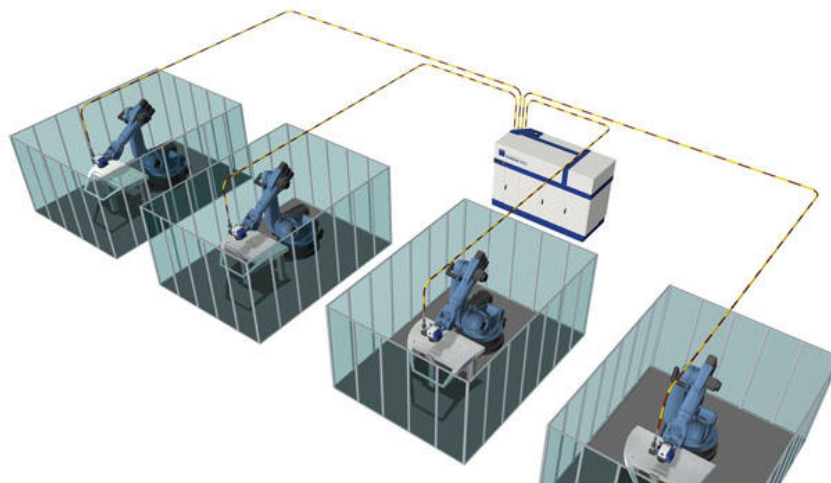
Laser se od doby svého vzniku uplatnil v celé řadě oborů. Jako přístroj se dnes používá kromě ve strojírenství také v medicíně, astronomii, chemii, biologii, metrologii, geodézii, spektroskopii, energetice, vojenské technice, automatizaci a v mnoha dalších odvětvích.

Jedinečné vlastnosti laseru umožňují jeho široké technologické využití, které zahrnuje laserové řezání, vrtání, svařování, kalení, popis, gravitování materiálů aj. Výhoda spočívá v univerzálnosti technologického zařízení. Jediným zdrojem záření je možno změnou geometrie ozařování, volbou časových prodlev a použitím nutných periferních přípravků provádět tepelné úpravy, tj. kalení, popuštění, cementování, nitridování, svařování i řezání. Tržní podíl jednotlivých aplikací laseru pro zpracování materiálu znázorňuje graf na obrázku 25.



Obr. 25 Podíl aplikací laseru pro zpracování materiálu [35]

Aplikace laserových technologií může vyvolat i produkční problémy. Produktivita těchto technologií je velmi vysoká, takže je sotva možné využití na jednom pracovišti. Na druhé straně cena laserových zdrojů je stále vysoká, takže jeden laserový zdroj může obsluhovat více pracovišť s různými aplikacemi. Při použití pevnolátkových laserů je možno optickými kabely paprsek přenášet do vzdálenosti až 100 m a tam jej využít na různé technologické účely. Jednotlivá pracoviště napájená jediným zdrojem laserového záření však nemohou pracovat současně. Ke každému je přiváděn paprsek pouze určitý časový interval.



Obr. 26 Schéma sdílení jednoho laserového zdroje [36]

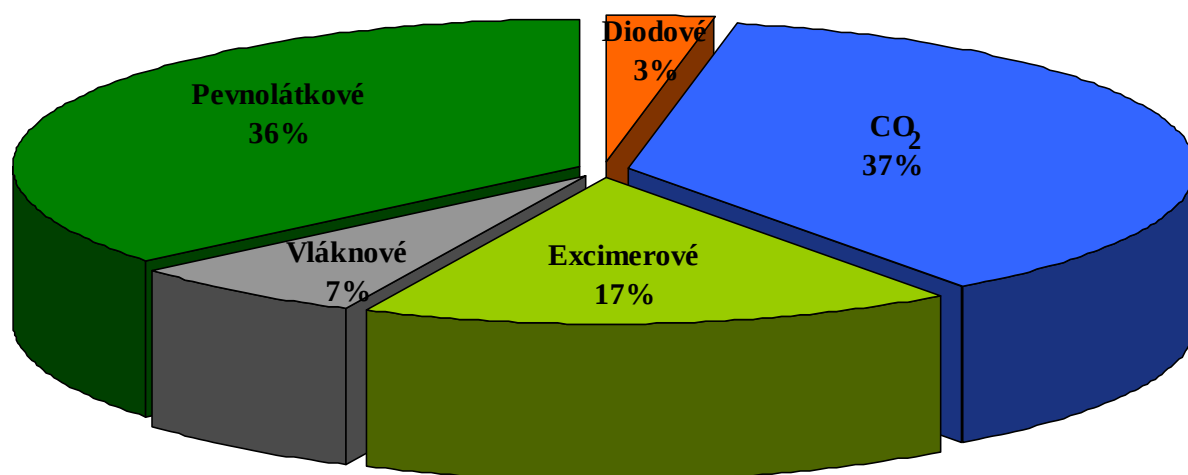
2.8 Současné vývojové trendy [16]

Přestože první laserový paprsek byl generován pevnolátkovým laserem, v průběhu následujících desetiletí získaly v oblasti zpracování kovů převahu lasery plynové. Souběžně s vývojem CO₂ laserů probíhá v poslední době intenzivní rozvoj technologií založených na pevnolátkových laserech. Lasery na tomto principu se vyznačují vysokou účinností. V porovnání s CO₂ lasery až 3 krát vyšší (30 % proti 10 %). Další nespornou výhodou tohoto principu je jednoduchost a z toho vyplývající vysoká spolehlivost. Díky krátké vlnové délce laserového paprsku z pevnolátkových laserů lze energii přivádět do místa interakce se zpracovávaným materiálem optickým vláknem. Tento způsob je vhodný zejména pro nasazení na roboty. Další charakteristickou vlastností opticky čerpaných laserů je jejich až 10× menší vlnová délka vyzařování. Tato vlastnost se příznivě projevuje při zpracování oceli nebo hliníku vzhledem k příznivější absorpci v oblasti vlnových délek okolo 1 μm. Vláknové lasery lze považovat za nejperspektivnější zdroje laserového paprsku.

Tabulka 3 Porovnání provozních vlastností průmyslových laserů [9]

Parametr	Nd:YAG	CO ₂	Diskový	Vláknový laser
Celková účinnost [%]	5	10	15	30
Výstupní výkon do [kW]	6	20	4	50
Životnost diod [hod]	10 000	-	10 000	100 000
Chlazení	voda	voda	voda	vzduch/voda
Provozní náklady [Kč·hod ⁻¹] (2005)	825	520	760	460
Údržba	častá	nutná	častá	žádná

Na obrázku 27 je graf popisující podíl jednotlivých technologií pro průmyslové zpracování materiálu. Rozšíření pevnolátkových laserů doposud brzdily poměrně vysoké pořizovací náklady a také nepříliš vysoká kvalita laserového paprsku. Též veliké množství nashromážděných technických dat z procesů využívajících CO₂ lasery v porovnání s relativně krátkodobě používanou technologií vláknových laserů v současnosti částečně favorizuje použití osvědčené univerzální technologie CO₂ laseru, zejména v oblasti dělení materiálů větších tloušťek.



Obr. 27 Tržní podíl jednotlivých typů laserů pro průmyslové využití (rok 2008) [35]

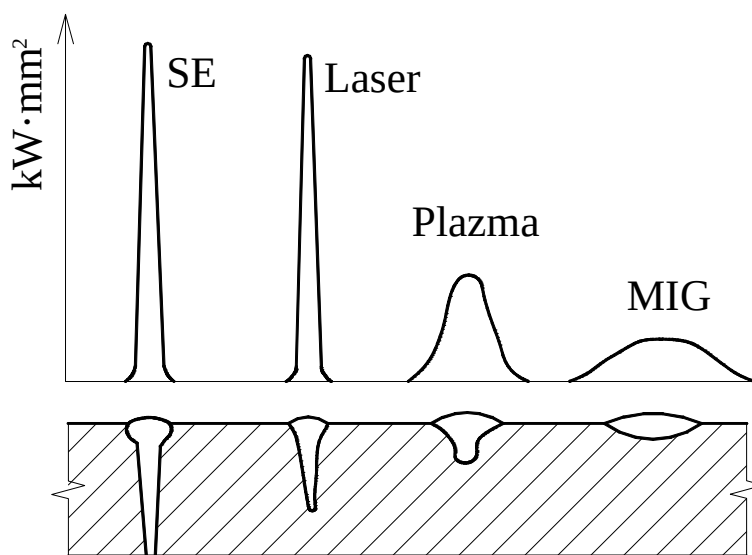
Laserové technologie lze bez nadsázky považovat za trvale se rozvíjející oblast technické praxe využívající nejmodernějších poznatků vědy a vývoje. Trh s těmito technologiemi je již od doby uvedení laseru do technické praxe, přibližně před 50 lety, téměř nepřetržitě rostoucím segmentem v celkovém úhrnu prodeje nejmodernějších technologií. [16]

Trh s laserovými technologiemi je velmi koncentrovaný. Přibližně 87 % příjmů z laserových technologií náleží společnostem hlášených pouze ve třech státech (USA, Německo, Japonsko). Navíc pouze pět největších společností vlastní přes 50 % všech příjmů z prodeje laserových technologií.

3 SVAŘOVÁNÍ LASEREM [6, 9]

Svařování ovlivňuje materiál v okolí spoje a většinou degraduje jeho původní vlastnosti. U vysokopevných jemnozrnných nebo vícefázových ocelí lze očekávat problémy ještě výraznější. Dosavadní výsledky ukazují, že řada obtíží vznikajících při konvenčním svařování nejběžnějšími obloukovými metodami může být potlačena užitím vysoce intenzivního laserového paprsku. Hlavními výhodami laserového svařování je menší vnesené teplo a odlišná geometrie spoje. Méně tepla ve svaru, díky vysoké energii a rychlosti svazku, znamená menší ovlivnění okolí svaru, jemnější strukturu, menší deformace a zbytková pnutí. Odlišná geometrie spoje, zejména poměr mezi šířkou a hloubkou svaru, přináší další profit v podobě menších deformací.

Svařování laserem je procesem, při kterém ke spojení materiálu dochází vlivem tepla, které se vyvine při aplikaci koncentrovaného koherentního světelného paprsku na povrchy svařovaných materiálů. Fokuseovaný laserový paprsek má spolu se svazkem elektronů nejvyšší koncentraci energie ze známých zdrojů energie.



Obr. 28 Porovnání koncentrace energie vybraných metod [37]

Tabulka 4 Srovnání parametrů svařování s ostatními metodami [9]

Metoda	Hustota energie [W·cm ²]	Hloubka průvaru [mm]	Šířka svaru mm]	Svařovací rychlost [m·min ⁻¹]
El. paprsek	10 ⁸	200	0,03	0,5 – 5
Laser	10 ⁷ – 10 ⁹	25	0,1 – 0,5	až 10
Plazma	10 ⁶	12	1	0,5 – 5
El. oblouk	10 ⁴	4	2	0,5 – 3
Plamen	10 ³	3	3	0,01

3.1 Mechanismus svařování [7, 8]

Při interakci laserového paprsku s povrchem základního materiálu dochází k několika průvodním dějům. Zpočátku může dojít ke značnému odrazu záření. Malé množství, které je absorbováno, ohřeje povrch. S rostoucí teplotou povrchu se zároveň zvyšuje absorpce a tím se

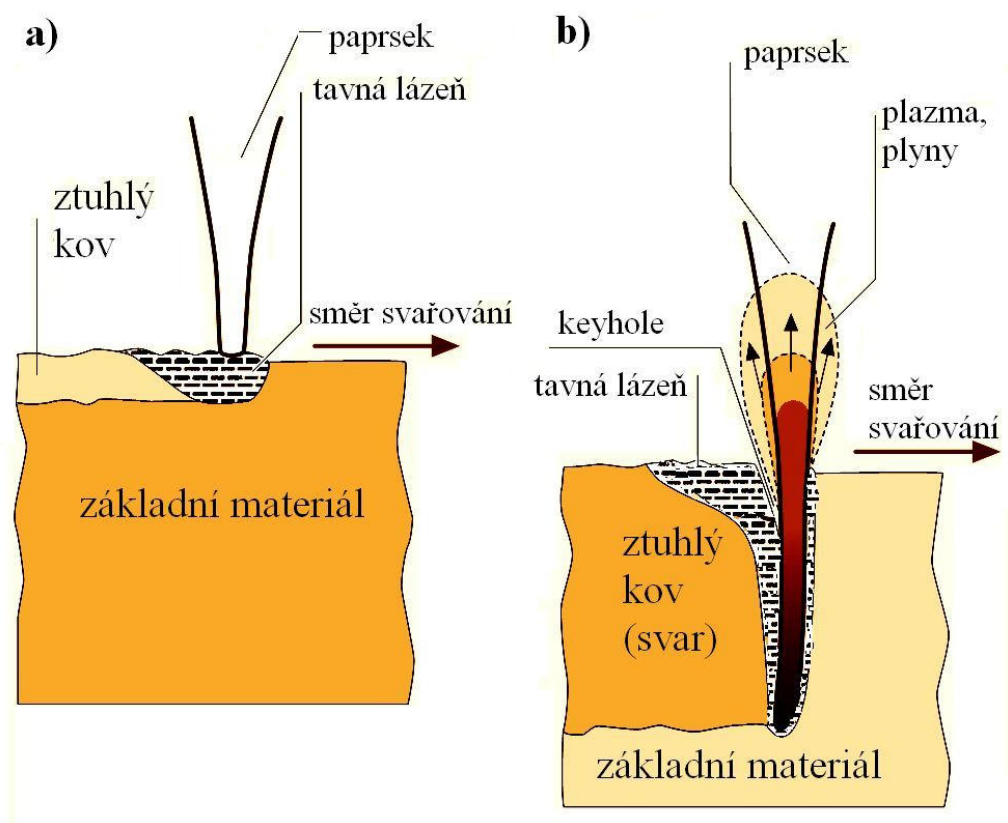
základní materiál ohřívá stále více. Vlivem vysoké hustoty energie a pomalého odvodu tepla v krátkém času postupně dojde k lokálnímu natavení a následně až k odpařování materiálu. Povrchové natavení a vypařování vede ke vzniku tlakové vlny v roztaveném materiálu a tato ovlivňuje tvar natavené oblasti.

Maximální tlak je možno určit ze vztahu:

$$p_{\max} = \Gamma \cdot I \cdot c_z^{-1} \cdot 0,01, \quad (5)$$

kde: $p_{\max}$ – maximální tlak [MPa],
 Γ – koeficient Grunajzera (pro kovy přibližně 1),
 I – hustota výkonu [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$],
 c_z – rychlost zvuku [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$].

Během svařování kovů laserovým zářením mohou nastat v závislosti od uvedených skutečností dva základní režimy svařování. Při hustotách výkonu ještě nezpůsobujících intenzivní vypařování (do $10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) se jedná o kondukční režim. Při vyšších hustotách energie (nad $10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) se vlivem intenzivního odpařování materiálu vytvoří paroplynový kanál, který je často označován jako „keyhole“.



Obr. 29 Mechanismy svařování: a) kondukční režim, b) metoda penetrační [11]

Kondukčního režimu se užívá při svařování fólií a tenkých plechů s tloušťkou pod 1 mm, zatímco metoda keyhole je vhodná pro svařování silnějších materiálů.

3.1.1 Kondukční svařování [7]

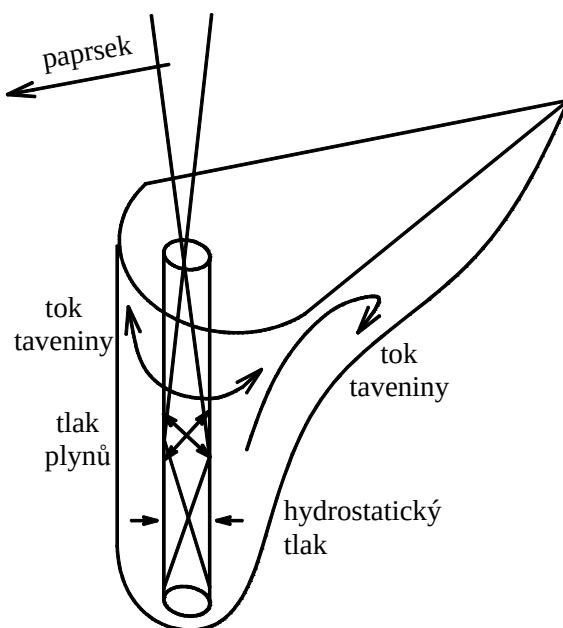
Laserovým zářením se nejprve ohřeje povrch a poté se teplo vlivem tepelných charakteristik materiálu odvede do hloubky. Hloubka natavené oblasti zpravidla nepřesahuje šířku. Tento stav charakteristický pro zpracování kovů laserovým paprskem o výkonu pod 1 kW. Povrch svarových spojů vyhotovených kondukčním režimem je rovný, převýšení svaru je mi-

nimální. Toto je způsobeno absencí tlakové vlny na povrchu roztaveného kovu během svařování.

Mechanismus vzniku svarového spoje při kondukčním režimu svařování je možné popsat následovně. Laserový paprsek dopadá na povrch svařovaných materiálů, kde se část jeho energie odrazí a část absorbuje. Pohlčená energie vytváří kondukčním mechanismem na povrchu taveninu, která postupem času zvětšuje svůj objem. Čelo taveniny penetruje do hloubky, dokud množství tepla, přivedeného z taveniny za jednotku času k čelu taveniny, není rovno množství tepla, odvedeného za jednotku času tuhou fází základního materiálu. Geometrie svarového spoje v příčném průřezu odpovídá konečným hranicím čelu taveniny. Formování svarového spoje je uvedeno na obrázku 29a.

3.1.2 Svařování penetrační metodou [7, 9]

Absorbovaná energie laserového záření způsobuje díky vysoké hustotě rychlé tavení a vypařování svařovaného materiálu. Při tomto režimu vzniká impuls tlaku par. Na povrchu materiálu se vytvoří dutina (keyhole), jejíž tvar umožňuje efektivnější zachytávání energie paprsku výrazně zlepšenou absorpcí díky mnohonásobnému odrazu paprsku na stěnách uvnitř. Vzniká paroplynový kanál o průměru 1,5 až 2 násobek průměru ohniska laserového svazku s hlubokou penetrací. Proto tento režim svařování bývá označován jako penetrační režim.



Obr. 30 Keyhole [10]

Vytvořený paroplynový kanál je obklopen tenkou vrstvou roztaveného kovu. Kanál je udržován rovnováhou mezi rozevírajícími silami vyplývajícími z vypařování materiálu a formování plazmy, a silami způsobujícími zalití dutiny vlivem povrchového napětí a hydrostatického tlaku roztaveného kovu. Materiál na přední stěně kanálu je ohříván z teploty tavení na teplotu vypařování, při které reaktivní tlak výparů způsobuje přetečení taveniny okolo paroplynového kanálu do zadní části tavné lázně. Roztavený kov v zadní části tavné lázně chladne, zalévá dutinu po paroplynovém kanálu a po ztuhnutí tvoří svarový spoj.

Svary uskutečněné touto metodou se vyznačují velmi úzkým a hlubokým průvarem, jelikož energie je přenášena do základního materiálu pomocí popsaného paroplynového kanálu.

Současně se začátkem tvorby paroplynového kanálu se nad povrchem materiálu tvoří svítící oblak skládající se z produktů vypařování a výstřiku. Přednostně se z povrchu kovu

vypařují kontaminanty, uhlovodíky a vlhkost, a ze samotného kovu nečistoty jako oxidy a sulfidy.

Dopadající laserový paprsek způsobuje ionizaci oblaku. Po ionizaci oblaku v krátkém čase vzniká plazma. V závislosti na hustotě energie může v následujícím okamžiku část plazmy stoupat nad povrch. Proces stoupání probíhá, dokud nenastane rovnováha mezi energií, která je plazmou pohlcena a energií, která vychází z plazmy vlivem tepelné vodivosti a záření. Plazma se objevuje periodicky. Vždy po vytvoření plazmy nemůže paprsek intenzivně zářit na čelo paroplynového kanálu, to tudíž chladne a vypařování není dostatečně intenzivní pro vytvoření plazmy. Po zániku plazmy se čelo kanálu opět ohřeje, vznikne plazma a celý proces se opakuje.

Během svařování dochází k interakci laserového paprsku s plazmovým oblakem. Při použití CO₂ laserů je absorpce záření povrchem kovu pouze 10 %, po vzniku plazmy to může být až 100 %. Záření může být pohlceno plazmou uvnitř keyhole ale také nad svařencem. Pokud k tomu dojde uvnitř paroplynového kanálu, zvýší se tím účinnost procesu. Naopak absorpce nad povrchem materiálu může často úplně zabránit průchodu paprsku ke svařenci. Spektroskopickou analýzou oblaku bylo zjištěno, že tento problém nenastává při použití pevnolátkových laserů, protože zkrácením vlnové délky záření již nedochází ke vzniku plazmového oblaku. Oblak vznikající při svařování pevnolátkovými lasery již není vhodné nazývat „plazmovým oblakem“, protože je z velké části tvořen parami kovů a neexcitovaným, ale zahřátým plynem a pouze z velmi malé části nízkoteplotním plazmatem par kovů.

Aby se plazmový oblak nevytvářel, používá se plynule odfukovaný inertní plyn, který cirkuluje ve fokusační hlavě. Pro lasery výkonu pod 5 kW se používá na potlačení plazmy helium, argon, nebo směs obou plynů. Pro větší výkony je však preferováno helium, jelikož je menší pravděpodobnost jeho rozpadu vlivem intenzivního laserového záření. Rychlost podávání plynu musí být taková, aby potlačil plazmu, ale neovlivňovali nepříznivě roztavený kov. Další možností eliminace nepříznivého vlivu plazmy je použití vakua a periodického pulzního režimu svařování.

3.2 Ochranné plyny [7, 8, 9]

Kromě vlastního účinku na ochranu tavné lázně před oxidací a vznikem defektů (póry, bubliny) plní ještě ochranné plyny další podstatnou funkci, a to tím, že tlumí nebo naopak posiluje plazmu vzniklou nad svarem. Plazma jako ionizovaný plyn rozptyluje energii laserového paprsku. Při vzniku velkého plazmového oblaku dochází k poklesu provařené hloubky (za konstantního výkonu laseru). Plyny mající vyšší ionizační potenciál a tepelnou vodivost zabezpečují největší hodnoty protavení. Nejlepších výsledků se obvykle dosahuje při ochraně svarového kovu heliem. Argon se však používá častěji při svařování o nižších až středních výkonech díky jeho příznivé ceně. Navíc jeho vysoká molekulová hustota poskytuje lepší ochranu lázně, hladší povrch svaru a nižší potřebný průtok. Dostatečné efektivnosti lze dosáhnout také použitím směsi CO₂ a O₂ s Ar.

Pro dosažení požadované kvality spoje je třeba určit velikost průtoku plynu. Při nedostatečném množství není zabezpečena kvalitní ochrana a při nadbytečném přívodu dochází ke zbytečným ekonomickým ztrátám. Optimální hodnota průtoku hélia je cca $55 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a argonu kolem $15 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Tabulka 5 Fyzikální vlastnosti vybraných plynů [8]

Plyn	He	Ar	N	CO ₂	O ₂
Ionizační energie [eV]	24,6	15,8	15,5	14,4	12,5
Molární hmotnost [g·mol⁻¹]	4	40	28	44	24,8

3.3 Parametry svařování [24]

Parametry svařování značně ovlivňují kvalitu svaru. Tyto parametry podmiňují efektivnost využití laserového záření na dané technologické procesy. Podle režimu generace záření se lasery dělí na kontinuální a pulzní.

3.3.1 Kontinuální režim [9, 24]

Mezi základní parametry kontinuálního režimu patří:

- výkon laseru P [W];
- rychlost svařování v [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$];
- parametry fokusačního systému.

Výkon laseru

Výkon laseru je teplotní parametr, který vyjadřuje vliv paprsku na materiál. Velikost výkonu ovlivňuje schopnost protavení do požadované hloubky. Zvyšování výkonu laseru přímo úměrně zvyšuje jak šířku tak hloubku svaru. Přejedem od jednoho modelu laseru k druhému se však může optimální hodnota potřebného výkonu změnit.

Rychlost svařování

Rychlost svařování označuje dráhu, kterou urazí zdroj ohřevu v kontaktu se základním materiálem za jednotku času. Při konstantní hodnotě výkonu rychlost svařování charakterizuje množství energie dodané materiálu.

Zvyšování rychlosti pochopitelně snižuje hloubku provaření díky snížení přivedené energie. To samé platí pro šířku svaru. Při pomalém svařování dochází v okolí paroplynového kanálu k ohřevu a tavení okolního materiálu a zvětšování šířky svaru i tepelně ovlivněné oblasti. Pozitivem je, že teplo je odváděno pomaleji a klesá tvrdost svarů. Proto tvrdost souvisí i s tloušťkou stěny – silnější materiály odvedou teplo rychleji a svary jsou ve srovnání např. s tenkým plechem tvrdší.

Vysoká rychlost svařování se projevuje řadou pozitivních důsledků. Kromě menšího vnesení tepla s rostoucí rychlostí klesá šířka spoje, hrubnutí struktury je minimalizováno stejně jako zbytková pnutí a deformace svařence. Při rychlostech nad $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ klesá náchylnost k tvorbě trhlin za horka. Také vrubová houževnatost je ve srovnání s obloukovými metodami vysoká. Svary korozně odolných materiálů vykazují vyšší odolnost koroznímu prostředí.

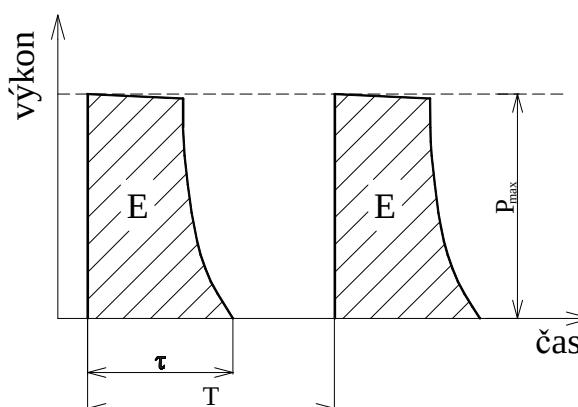
Parametry fokusačního systému

Při konstantním výkonu laseru je pochopitelný nárůst energie při použití menšího průměru svazku. Podle zkušeností ale průměry svazku pod $0,4 \text{ mm}$ znamenají citlivost na vznik vad díky vysoké intenzitě svařování a dynamickým účinkům plazmy. Naopak větší průměry svazku (nad 1 mm) vyžadují přidání výkonu laseru pro dosažení hlubších průvarů, což zvyšuje cenu zařízení. Maximální hloubky provaření se dosahuje při fokusaci svazku přibližně 1 mm pod horní povrch základního materiálu, což souvisí se vznikem a stabilitou plazmy.

3.3.2 Pulzní režim [9]

V pulzním režimu generují zdroje záření v krátkých oddělených dávkách – impulzech. Základní parametry pulzního režimu jsou:

- energie pulzu E [J];
- maximální výkon pulzu P_{max} [W];
- délka pulzu τ [s];
- frekvence pulzu f [Hz];
- perioda pulzu T [s];
- rychlost svařování v [mm·s⁻¹].



Obr. 31 Průběh výkonu při pulzním režimu [24]

Při použití periodického pulzního režimu svařování je možno dosáhnout 1,5 až 2 násobné hloubky penetrace v porovnání s kontinuálním režimem. Toto je způsobeno vlivem redukce plazmy. Délka pulzu má být přibližně rovna času, potřebnému na ohřev čela paroplynového kanálu z teploty tavení na teplotu vypařování. Použití pulzů větší délky způsobuje ztráty energie, ke kterým dochází při vypařování materiálu a při průchodu laserového paprsku plazmovým oblakem. Optimální využití pulzního režimu svařování umožňuje redukovat ztráty energie, zabránit přehřívání tavné lázně a podstatně zlepšuje penetrační schopnost a výslednou kvalitu spoje.

3.4 Navrhování svarů [7, 8, 12]

Laserové svařování patří mezi tavné metody svařování a lze jím vytvářet prakticky všechny druhy svarů jako ostatními tavnými metodami. Vzhledem k vlastnostem svarů zhotovených laserem mají tyto charakter tupých, přeplátovaných a průvarových spojů.

Efektivnost využití laserového svařování ve velké míře závisí od správnosti konstrukčního řešení součásti a volby vhodného typu svarového spoje pro daný proces. Přitom je potřebné dodržovat následující základní podmínky:

- upřednostňovat typy svařovaných součástí, při kterých se laserovým svařováním dosáhne zvýšení efektivnosti výroby a provozních vlastností;
- typ navrhnutého spoje musí zohledňovat zvláštnosti laserového svařování;
- konstrukční řešení spoje musí zabezpečit vhodné podmínky na ustavení součástí před svařováním.

Svařování se většinou realizuje bez použití přídavných materiálů. Tyto se volí jen v ojedinělých případech, když je třeba ovlivnit krystalizaci anebo chemické složení svarového kovu. Při některých konstrukčních řešeních přichází v úvahu i doplnění svarového kovu z přídavného materiálu. V těchto případech se často využívá laserové svařování v kombinaci s jinými metodami tavného svařování.

Na čistotu svarových ploch nejsou mimořádné požadavky. Lehce znečištěné nebo zoxidované povrchy je možno svařit bez problémů, neboť veškeré nečistoty jsou odpařeny. Dokonce při svařování izolovaných drátů není třeba odstraňovat izolaci, která se při svařování odpaří aniž by znečistila svar. Vysoce znečištěné a zamaštěné povrchy je však vhodné očistit. Vlivem vysoké svařovací rychlosti a malému objemu natavení takové povrchy vykazují po svaření zvýšenou pravděpodobnost výskytu pórů a povrchových vad.

Tupé spoje se používají pro široký rozsah tlouštěk a typů součástí. Vyhotovené svary jsou úzké, s hlubokým průvarem, deformace jsou minimální. Při návrhu místa svaru je třeba

počítat s plynovou ochranou povrchu a kořene svaru a zabezpečit dostatečný přístupový prostor.

Aby došlo ke slití tavených kovů v místě svaru, musí svařované součásti k sobě těsně přiléhat čistými (bez kontaminace řeznou kapalinou, brusivem apod.) a hladkými plochami. Velikost mezery svarů hraje velkou roli. Oproti konvenčním tavným metodám svařování vyžaduje příprava svarových ploch pro laserové svařování mnohem vyšší nároky. Mezera by neměla být vyšší než 5 až 7 % tloušťky tenčího materiálu. Jinak je pravděpodobné, že část nebo celý paprsek projde skrz mezeru, což vede k nedostatečnému nebo dokonce žádnému provaření základního materiálu.

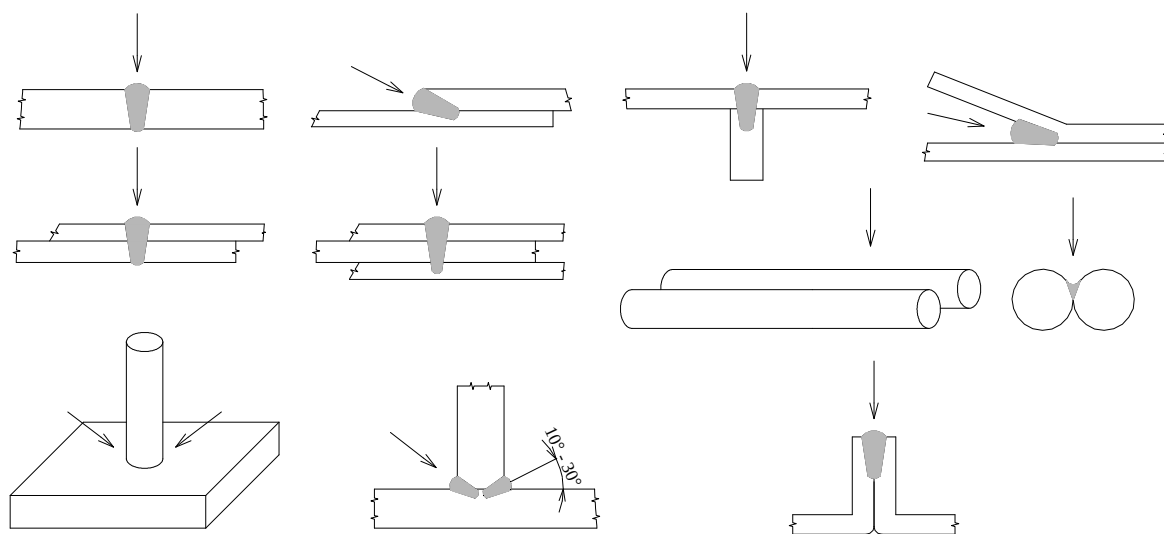
Důležitým faktorem ovlivňujícím jakost svaru je také zvolená technologie přípravy svarových ploch. Doporučuje se obrábění, ale řezání laserem nebo vodním paprskem je také vhodné. Vždy je však nutné odstranit případné ořepy.

Specifické pouze pro svařování laserem (a svazkem elektronů) je průvarové svařování přeplátovaných plechů. Realizuje se díky možnosti hlubokého protavení materiálu při použití svaku vyššího výkonu, kdy laser je schopen provařit dva i více materiálů. Přitom typ a tloušťky materiálů mohou být rozdílné. Paprsek je vedený na vrchní materiál, který se protaví v celé tloušťce. Kořenová část svaru proniká do druhého materiálu, který je situován pod vrchním materiálem, čímž se vytváří svarový spoj obou materiálů. Navíc lze regulací svařovacích parametrů dosáhnout toho, že průvar nepronikne spodním materiálem zcela ale například jen do poloviny, takže spodní strana je povrchově nedotčena.

Požadavky na přípravu přeplátovaných spojů nejsou tak přísné jako pro tupé spoje. Maximální dovolená velikost mezery mezi povrchy svařovaných materiálů závisí na stupni penetrace svaru do spodního materiálu. Při plném průvaru spodního materiálu je možno zvolit mezeru větší. Obecně by však neměla překročit 0,2 mm. Při návrhu spoje je vhodné zvolit jako vrchní polotovar tenčí plech. Svařované materiály musí být během svařování pevně upnuty.

Svařování T spojů se většinou realizuje oboustranně, při nasměrování paprsku na linii styku svařovaných materiálů. Nasměrování paprsku pod určitým malým úhlem má za následek protavení celé styčné plochy obou materiálů. Toto umožňuje vyhotovit pevný svarový spoj, bez ohledu na menší plochu průřezu svaru, jako při obloukovém svařování.

Některé vhodné typy svarových spojů pro laserové svařování plechů a tyčových polotovarů jsou zobrazeny na obrázku 32.



Obr. 32 Vybrané typy svarů [7]

3.5 Deformace [9]

Deformace a pnutí jsou dány vneseným teplem a teplotní roztažností svařovaného materiálu. To platí pro všechny tavné metody svařování. Je třeba si uvědomit ale další rozdíly, které přináší laser vzhledem ke geometrii svaru. Především poměr šířky a hloubky naznačuje možnost výrazného snížení deformací. Vztahy pro příčné a úhlové deformace obsahují štíhlostní faktor a/t , kde a je šířka svaru a t je tloušťka základního materiálu. Ten je zhruba 1 pro obloukové metody, pro laserový a elektronový paprsek může být až 1/50. Další snížení deformací lze očekávat díky zmenšení rozevření svaru. Čím větší je rozevření úkosu svaru, tím větší je deformace. U laseru je ale obvyklý tupý svar s nulovým rozevřením, což zajišťuje rovnoměrné rozložení pnutí po svařované hloubce, a tím minimální deformace. Důsledkem je pak i omezení maximální koncentrace napětí na povrchu a v patě svaru v přechodu do tepelně ovlivněné oblasti, navíc je tato oblast velmi úzká. Proto poměrně často nedochází k lomu ve svaru a jeho těsném okolí jako u obloukových metod, ale v základním materiálu při zachování původních mechanických vlastností.

3.6 Svařitelnost materiálů laserem [7, 19]

Svařitelnost materiálů laserem závisí především na chemickém složení svařovaných materiálů, jejich stavu a rozměrech. Pevnost spojů je dána hlavně geometrickými rozměry protavené oblasti a strukturními změnami ve svarovém kovu a tepelně ovlivněné oblasti.

Vysoká koncentrace tepelné energie při laserovém svařování umožňuje používat rychlost svařování mnohem vyšší než při klasických metodách svařování. Toto sice zmenšuje velikost tepelného vlivu na okolní oblast ale zároveň také zvyšuje rychlost ochlazování kovu. V souvislosti s tímto nastávají značné změny struktury v oblasti zpracování laserem.

Důležitý je vliv parametrů na náchylnost kovu k tvorbě trhlin za horka a za studena. Za kritérium náchylnosti k trhlínám za horka se obvykle používá kritická rychlost deformování krystalizujícího kovu, při které trhlina ještě nevzniká. Při zvyšování rychlosti svařování kritická rychlost deformace stoupá. Při svařování rychlostí nad $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ je odolnost vůči trhlínám za horka větší než při klasickém svařování.

Trhliny za studena bývají způsobené tahovým napětím v kovu po ovlivnění zdrojem tepla. Použitím vysoko koncentrovaného zdroje tepla klesá náchylnost k tvorbě těchto trhlin. Vzniká výhodná struktura svaru i tepelně ovlivněné zóny. Použití rychlosti svařování nad $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ umožňuje zvýšit technologickou pevnost materiálu. Vrubová houževnatost materiálů svařených takovou rychlostí je často vyšší než houževnatost základního materiálu.

Laserem lze svařovat všechny typy svařitelných ocelí včetně vysokolegovaných, vysokotavitelné kovy a jejich slitiny (W, Mo, Ta, Zr, Ti, Ta), kovy s vysokou tepelnou vodivostí (Cu, Ag, Al), i kombinace různých materiálů.

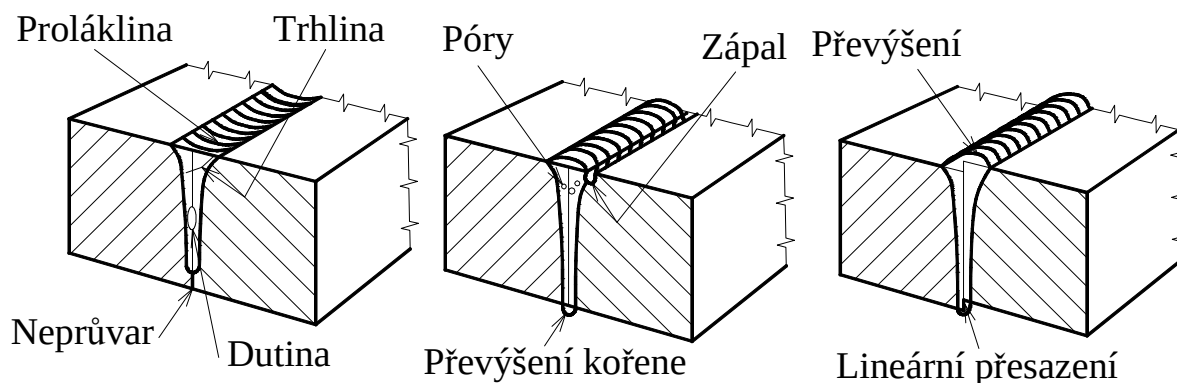
4 ZKOUŠENÍ SVAROVÝCH SPOJŮ [26]

Vady ve svarech je nutno považovat za nebezpečné koncentrátoři napětí, které zvláště nepříznivě ovlivňují velikost meze únavy, ale mohou se též za určitých podmínek stát iniciátory křehkého lomu a tím následného vyřazení součásti z provozu. Vadou výrobku se obecně rozumí každá odchylka od vlastností předepsaných technickými normami, technickými podmínkami případně smluvním vzorkem. K použití v provozu lze připustit pouze svary bez vad, nebo s přípustnými vadami. Přípustnost vad ve je stanovena druhem, velikostí a četností vyskytujících se vad v závislosti na typu svařované konstrukce a způsobu jejího namáhání. [26]

4.1 Typy vad svarových spojů [38]

Vady ve svarech se dělí jednak podle tvaru na bodové, plošné (trhliny, studené spoje, aj.) a prostorové (plynové dutiny, vměstky, staženiny), a jednak podle polohy výskytu ve svaru na povrchové (trhliny, zápal, neprovařený kořen) a vnitřní (plynové dutiny, vměstky).

Klasifikaci geometrických vad kovových materiálů vzniklých tavným svařováním popisuje norma ČSN EN ISO 6520-1. Vyhodnocení vad svarů provedených laserem a stupně jejich přípustnosti či nepřípustnosti se provádí podle ČSN EN ISO 13919-1. Charakteristické vady svarů provedených laserem jsou znázorněny na obrázku 33.



Obr. 33 – Vady svarů provedených laserem [39]

Časté příčiny vad a jejich prevence uvádí norma ČSN EN 1011-6. Neprůvar bývá způsoben nedostatečným výkonem svazku, vysokou svařovací rychlostí, či nevhodným nastavením ohniska. Dutina se vytváří kvůli znečištění svarového spoje, odpařením kovu, neúplným odplyněním některých prvků způsobeným rychlým zchlazením nebo nestabilitou uvnitř key-hole. Trhliny se většinou vyskytují po rychlém ochlazení. Póry se mohou vytvořit znečištěním svarového spoje. Působení gravitace způsobuje proláklinu lícni strany svaru, a nebo nadměrné převýšení kořene. K převýšení kořene i svaru napomáhá také příčné smrštění svarku.

4.2 Nedestruktivní zkoušení [26, 27]

Nedestruktivní metody zkoušení představují rozsáhlou oblast zkoušení materiálů a výrobků bez jejich porušení. Jsou nejrozšířenější skupinou zkoušek svarových spojů. Vycházejí z jednoduchého (ale velmi zjednodušeného) názoru, že pokud se ve svarovém spoji nevyskytují vady nebo se vyskytují pouze přípustné vady, bude svarový spoj dobře sloužit v provozu. Umožňují zjišťování vad, které porušují celistvost materiálu (svaru).

Obecným předpisem pro NDT kontrolu svarů je norma ČSN EN 12062. Základní nedestruktivní metody se dělí podle polohy výskytu hledané vady. Ke zjišťování povrchových vad

a vad těsně pod povrchem se používají metody vizuální, kapilární a magnetická prášková. Vnitřní vady se zjišťují např. zkouškou prozářením nebo ultrazvukem.

4.2.1 Vizuální zkouška [27]

Jedná se o nejjednodušší a zároveň nejdostupnější a nejlevnější defektoskopickou kontrolu svarů, kdy jsou pouhou prohlídkou prostým zrakem nebo pomocí zraku a optických přístrojů s několikanásobným zvětšením (lupa, endoskop), zjišťovány povrchové defekty.

Vizuální kontrola svarů je obecně popsána v normě ČSN EN ISO 17637. Vyhodnocení vad se provádí podle již zmíněné normy ČSN EN ISO 13919-1. Provádí se vždy jako první před ostatními zkouškami a zpravidla 100 %.

Základem této zkoušky je několik předpokladů: dobře očištěný povrch svaru od strusky, rozstříku apod. a zkouška by měla být provedena před dalšími technologickými operacemi (např. nátěry), dobře přístupný povrch svaru pro vizuální prohlídku, dobré osvětlení prohlíženého místa přirozeným nebo umělým světlem a ostrý zrak zkoušejícího, který je schopen rozoznat požadované drobné detaily i blízké drobné detaily od sebe odlišit.

Tato kontrola bývá zpravidla doplněna kontrolou vnějších rozměrů svaru, například měřením převýšení svaru (líce i kořene), měření hloubky a délky povrchových vad, měření úchylek celého svarového spoje (přesazení) apod.

4.2.2 Kapilární zkouška [27]

Tato zkouška umožňuje s poměrně velkou citlivostí zjišťovat povrchové vady, které však musí souviset s povrchem, tzn. že musí být na povrchu otevřené, aby do nich mohla vniknout detekční tekutina. Využívá se kapilárních jevů, především smáčivosti a vztlakovosti.

Kapilární zkouška svarů je obecně popsána v normě ČSN EN 571-1. Stupně přípustností nalezených indikací uvádí ČSN EN ISO 23277.

4.3 Destruktivní zkoušení [14]

Jedním z důležitých činitelů pro zajištění technické bezpečnosti konstrukcí a zařízení je destruktivní zkoušení základních materiálů, svarových kovů a svarových spojů. Destruktivními zkouškami se ověřuje a deklaruje komplex tzv. užitných vlastností použitých materiálů a jejich svarových spojů, které garantují odolnost vůči vnějším vlivům, jako jsou zatížení a jeho charakter, okolní prostředí a teplota. Podobně se jimi zjišťuje i jejich vlastní strukturní stav, jako je struktura a její stabilita, výskyt defektů apod.

Destruktivní zkoušky jsou obdobou zkoušek na zjišťování mechanických vlastností materiálů. Během rozvoje průmyslové výroby došlo ke standardizaci řady zkoušek, aby se zajistila reprodukovatelnost jejich výsledků za daných podmínek. Požadavky na zkoušení jsou tedy obsaženy v příslušných směrnících a normách.

4.3.1 Příčná zkouška tahem [14]

Příčná zkouška tahem představuje základní zkoušku používanou k ověřování pevnostních a plastických charakteristik. Její princip spočívá v použití normalizované tyče, která je obvykle opatřena hlavou pro uchycení. Ve zkušebním trhačím stroji dochází za definovaných podmínek (teplota, rychlost deformace) k deformaci zkušební tyče jednoosým tahovým zatížením mezi dvěma příčníky od nulového zatížení až do okamžiku přerušení tyče. Výstupem zkoušky je tahový diagram závislosti zatížení na prodloužení. Z průběhu závislosti lze vyčíst mez kluzu, mez pevnosti, tažnost a kontrakci.

4.3.2 Zkouška ohybem [5]

Zkouška ohybem dle ČSN EN ISO 5173 (dříve zkouška lámavosti dle ČSN EN 910) se používá zejména pro zkoušení deformačních schopností tupých svarových spojů za studena. Jejím principem je ohnutí ploché zkušební tyče okolo trnu do předepsaného úhlu ohybu. Průměr trnu je předepsán podle tloušťky a pevnosti zkoušeného materiálu. Kritériem odolnosti při zkoušce ohybem je dosažení předepsaného úhlu ohybu bez vzniku trhlin, nebo vznik první trhliny na tažené straně vzorku s registrací dosaženého úhlu. Za plně vyhovující je považováno dosažení úhlu ramen 180°.

4.3.3 Zkouška rázem v ohybu [5]

Zkouška rázem v ohybu dle ČSN EN ISO 9016 (dříve ČSN EN 875) představuje vyznané doplnění vlastností získaných tahovou zkouškou. Jedná se o zkoušku simulující schopnost testovaného materiálu odolávat křehkému porušení. Zkouška se provádí na normovaném tělísku, které má v příčném směru zhotoven vrub, představující trhlinu v materiálu.

Vlastní zkouška se provádí na tzv. Charpyho kladivu, kdy proti ustavenému vzorku do opačné strany než je vyroben vrub, udeří břit kladiva o definované hmotnosti. Rázová energie zachycená vzorkem vede k jeho destrukci. Její velikost a typ lomu iniciovaného v kořeni vrubu je kritériem schopnosti materiálu odolávat křehkému porušení.

Vzhledem k obtížím při přípravě platných rázových zkoušek u úzkých laserových svarů se tato zkouška používá jen zřídka.

4.3.4 Metalografické zkoušení [5, 14]

Metalografická šetření jsou obvyklým doplňkem mechanických zkoušek, při nichž se ověřuje zejména čistota materiálu, makrostruktura spoje a mikrostruktura základního materiálu, tepelně ovlivněné oblasti a svarového kovu prohlídkou příčného řezu. Zhruba je možno metalografické zkoušky rozdělit podle použitého zvětšení na ověření makrostruktury a mikroskopická pozorování.

Před vlastním pozorováním je vždy nutno provést dokonalou přípravu zkušební vzorku, která se skládá z vhodného odběru, postupného broušení povrchu a jeho leštění. Odběr vzorku a jeho zkoušení se provádí dle ČSN EN 1321.

Makrostrukturní rozbor se provádějí vizuálním pozorováním pouhým okem nebo při relativně malém zvětšení. Používá se pro znázornění studených spojů, hodnocení tvaru svaru, způsobu kladení svarových vrstev, tvaru, šířky a charakteru tepelně ovlivněné zóny.

4.3.5 Zkouška tvrdosti [14]

Společně se zkouškou tahem a zkouškou rázem v ohybu jsou zkoušky tvrdosti základními destruktivními zkouškami kovových materiálů. Jejich podstatou je měření odporu materiálu proti statickému nebo dynamickému vnikání cizího tělesa.

U statických nejvíce používaných metod může být tímto tělesem diamantové vnikací těleso ve tvaru jehlanu při zkoušce tvrdosti podle Vickerse (HV), vnikací ocelová kalená kulička při zkoušce tvrdosti podle Brinella (HB) a Rockwella (HRB) a pro materiály vysoké tvrdosti diamantový kužel (HRC).

Podstata zkoušky tvrdosti podle Vickerse spočívá v tom, že diamantové vnikací těleso ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu se čtvercovou základnou a s daným vrcholovým úhlem α je vtlačováno silou F do povrchu zkoušeného tělesa po dobu 10 s až 15 s. Následně jsou změřeny úhlopříčky vtisku. Výsledná hodnota tvrdosti je vyjádřena poměrem zatěžované síly k ploše vtisku. Metoda je popsána v ČSN EN ISO 6507-1.

5 PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem experimentu je provést svaření jemnozrnných ocelových plechů Domex pomocí vláknového laseru a poté ověřit správnost nastavených parametrů svařování. Materiál pro jednotlivé zkušební kusy byl zvolen Domex 420 MC o tloušťkách 2 mm a 4 mm a Domex 700 MC o tloušťkách 2 mm, 3 mm a 4 mm.

5.1 Charakteristika svařovaného materiálu Domex MC

Jedná se o ocelové plechy válcované za tepla s řízeným ochlazováním. Jsou určeny pro tváření za studena, především ohýbání. Výrobcem je švédská firma SSAB, plechy jsou dostupné s mezí kluzu až do 700 MPa.

Tabulka 6 Mechanické vlastnosti [28]

Jakost	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost [%]		Poloměr ohybu [mm]	
	Minimum	Minimum	$A_{80} t < 3$	$A_5 t \geq 3$	$t \leq 3$	$3 < t \leq 6$
Domex 420 MC	420	480 – 620	16	20	$0,4 \times t$	$0,5 \times t$
Domex 700 MC	700	750 – 950	10	12	$0,8 \times t$	$1,2 \times t$

Tabulka 7 Chemické složení (maximální hodnoty) [28]

Jakost	C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Al (%)	Nb (%)	V (%)	Ti (%)	CE _{IW}
Domex 420MC	0,1	0,03	1,5	0,025	0,01	0,015	0,09	0,2	0,15	0,30
Domex 700MC	0,12	0,1	2,1	0,025	0,01	0,015	0,09	0,2	0,15	0,39

5.2 Metodika zkoušení

Došlo ke svaření celkem 5 různých zkušebních kusů. Pro jeden svar byla vypracována vzorová předběžná specifikace svařování pWPS dle ČSN EN ISO 15609-4 (Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Stanovení postupu svařování - Část 4: Laserové svařování). Při ověřování vlastností svarů bude postupováno dle ČSN EN ISO 15614-11 (Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 11: Elektronové a laserové svařování). Z organizačních důvodů však nebylo možné provést všechny požadované zkoušky a proto daná norma bude sloužit pouze jako pomůcka.

Z každého zkušebního kusu byly vyřezány pomocí laseru 3 zkušební vzorky pro zkoušku tahem, 3 zkušební vzorky pro zkoušku ohybem a 1 vzorek pro metalografické zkoušení.

5.3 Použitá zařízení

Svaření bylo provedeno pomocí vláknového laseru YLS 2000 od společnosti IPG, který je umístěn na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky. K manipulaci s laserovou svařovací hlavou je zde použit manipulační robot IRB 2400-10.

Příčná zkouška tahem a příčná zkouška ohybem byla provedena pomocí hydraulického zkušebního stroje ZD40 na Ústavu strojírenské technologie VUT v Brně.

Laser YLS 2000 [28]

Laser YLS 2000 je vláknový laser od firmy IPG Photonics. Jedná se o univerzální a přizpůsobitelný laser různým technologickým účelům. Na pracovišti ústavu přístrojové techniky je možné tento laser osadit řezací nebo svařovací hlavou. Zdroj je umístěn v kompaktní vzduchem chlazené skříni, která je přizpůsobena pro využití v průmyslových podmínkách.

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: cca 5 mm;
- max. hloubka průvaru: cca 5 mm.



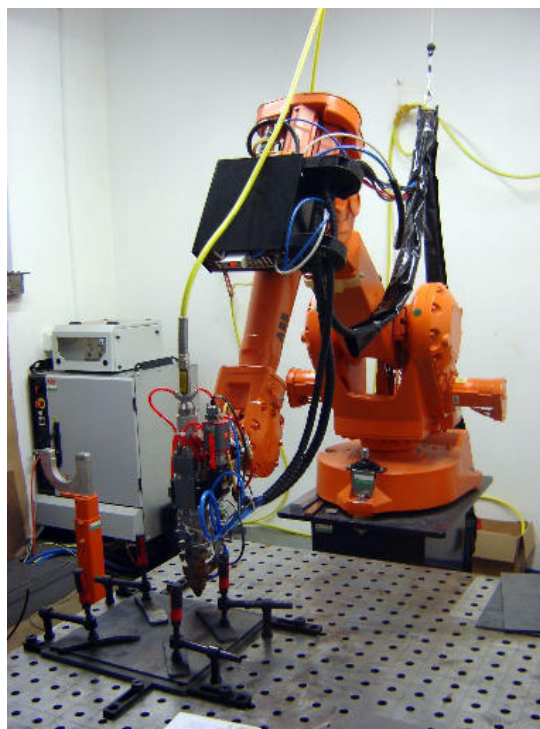
Obr. 34 Laser YLS 2000

Průmyslový robot IRB 2400-10 [28]

Robot IRB 2400-10 je nejpoužívanější polohovací robot v dané třídě. Používá se pro svařování, řezání, lepení, broušení, montáž, manipulaci s materiálem a mnoho dalších průmyslových aplikací. Robot také nabízí možnost zavěšení na strop či na stěnu.

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. 35 Robot IRB 2400-10

Zkušební stroj ZD 40

Hydraulický zkušební stroj pro tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do maximálního zatížení 400 kN. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60. Zpracování dat probíhá na počítači, který je vybaven programem M-TEST v.1.7. Tento program slouží k vyhodnocování a ke grafickému zpracování naměřených hodnot z tahové, tlakové a ohybové zkoušky.

Technické parametry:

- výrobce: HBM (SRN);
- měřicí rozsah: 8 až 400 kN;
- měřicí rozsah dráhy: 0 až 280 mm;
- inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy;
- sériové rozhraní RS 232.



Obr. 36 Zkušební stroj ZD 40

5.4 Postup svařování

Jednotlivé zkušební kusy se postupně ustavili na stůl a zajistili upínkami. Aby se zamezilo případnému rozevření během svařování vlivem stažení svarového kovu při tuhnutí, byly provedeny na koncích stehové svary. Po sestavení a sestehování svařovaných kusů došlo k samotnému svaření. Svařovací parametry pro jednotlivé kusy jsou uvedeny v tabulce 8. Jako ochranný plyn byl použit argon. Poloha ohniska je definována vůči povrchu materiálu, kladné hodnoty jsou pod povrchem.

Tabulka 8 Parametry svařování

Svar č.	Materiál	Tloušťka [mm]	Výkon laseru [W]	Svařovací rychlost [mm·s ⁻¹]	Poloha ohniska [mm]	Průtok plynu [l·min ⁻¹]	Tepelný příkon [kJ·m ⁻¹]
1	Domex 700 MC	3	1600	30	0	12	53,3
2	Domex 700 MC	2	1600	40	0	12	40
3	Domex 420 MC	2	1600	40	0	12	40
4	Domex 700 MC	4	1900	17	1	12	111,8
5	Domex 420 MC	4	1900	17	1	12	111,8

5.5 Vizuální kontrola

Dle ISO 15614-11 musí být všechny zkušební kusy podrobeny vizuální kontrole. Z časových a organizačních důvodů však byla kontrola provedena až po nařezání zkušebních vzorků.

Postupovalo se podle ČSN EN ISO 17637. Při osvětlení 400 luxů bylo zkontrolovány všechny vzorky za pomoci lupy a víceúčelové měrky (tzv. Cambridge měrka).

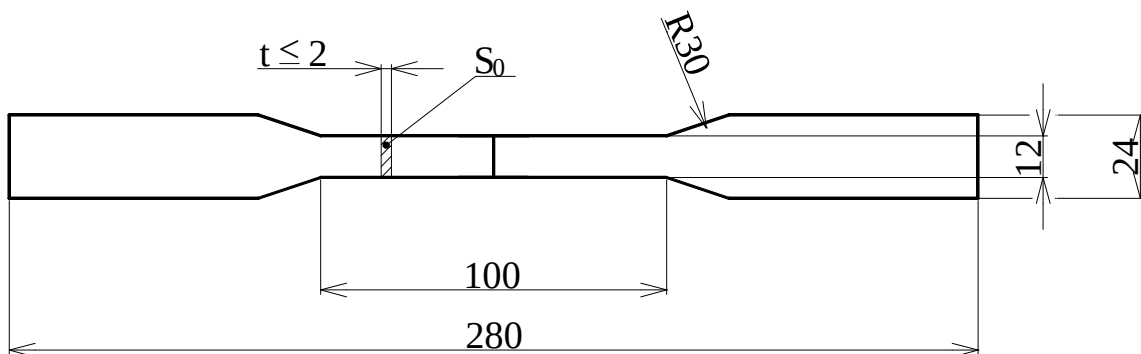
Nebyly nalezeny žádné nepřijatelné vady dle ČSN EN ISO 13919-1, pouze na vzorcích o tloušťce 4 mm bylo naměřeno převýšení kořene (vada 504) přibližně 0,5 mm. Tato vada je pro danou tloušťku přístupná i v nejvyšším stupni jakosti B.

5.6 Kapilární zkouška

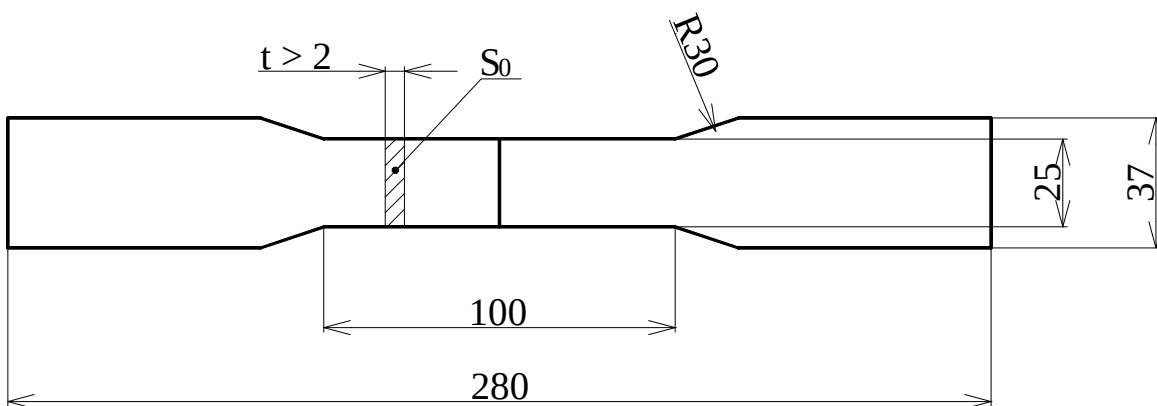
Postupovalo se podle ČSN EN 571-1. Na vzorcích pro tah materiálu Domex 700 o tloušťce 3 mm byly nalezeny lineární indikace v celé délce svaru. Zda se jedná u neprůvar způsobený nedostatečným výkonem nebo studený spoj způsobený vychýlením svazku nebo trhlinu se určí na metalografickém výbrusu. Na ostatních vzorcích nebyly nalezeny žádné nepřijatelné indikace.

5.7 Příčná zkouška tahem

Tvar a rozměry jednotlivých vzorků byly zvoleny dle normy ČSN EN 895 v závislosti na tloušťce plechu.



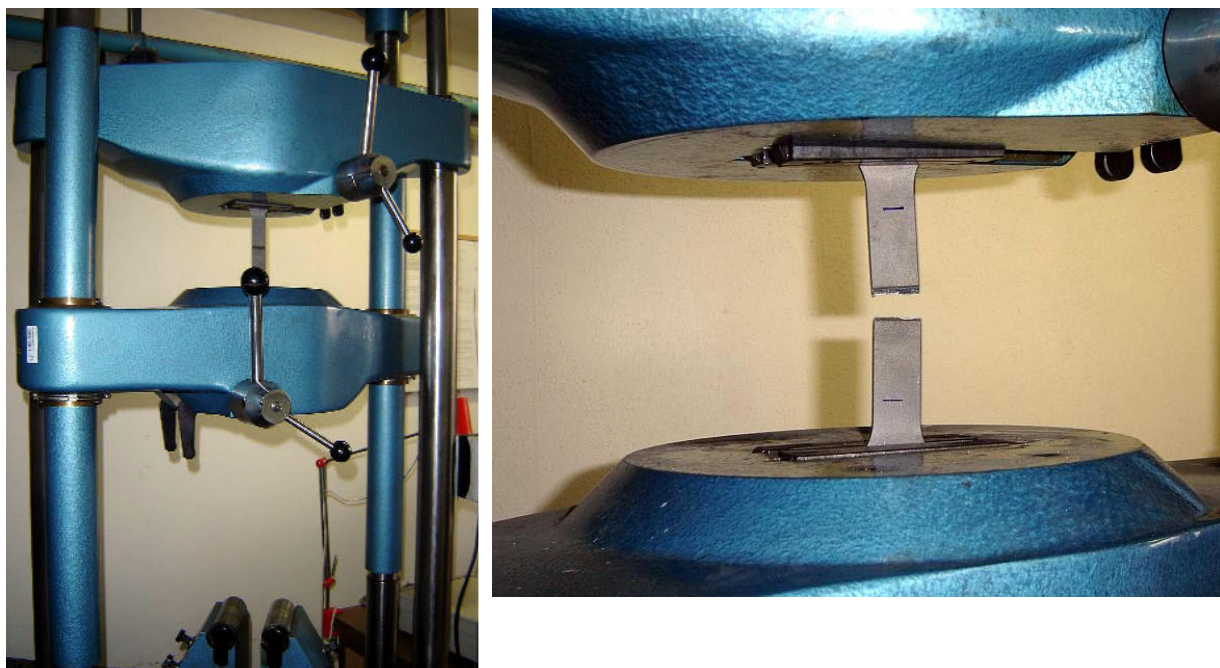
Obr. 37 Rozměry vzorku pro zkoušku tahem pro tloušťku $t \leq 2$



Obr. 38 Rozměry vzorku pro zkoušku tahem pro tloušťku $t > 2$

Rychlost zatěžování byla nastavena pro vzorky o tloušťce $t = 2$ mm na $500 \text{ MPa} \cdot \text{min}^{-1}$, pro ostatní vzorky na $800 \text{ MPa} \cdot \text{min}^{-1}$.

Fotodokumentace vzorků po zkoušení je umístěna v příloze 2.



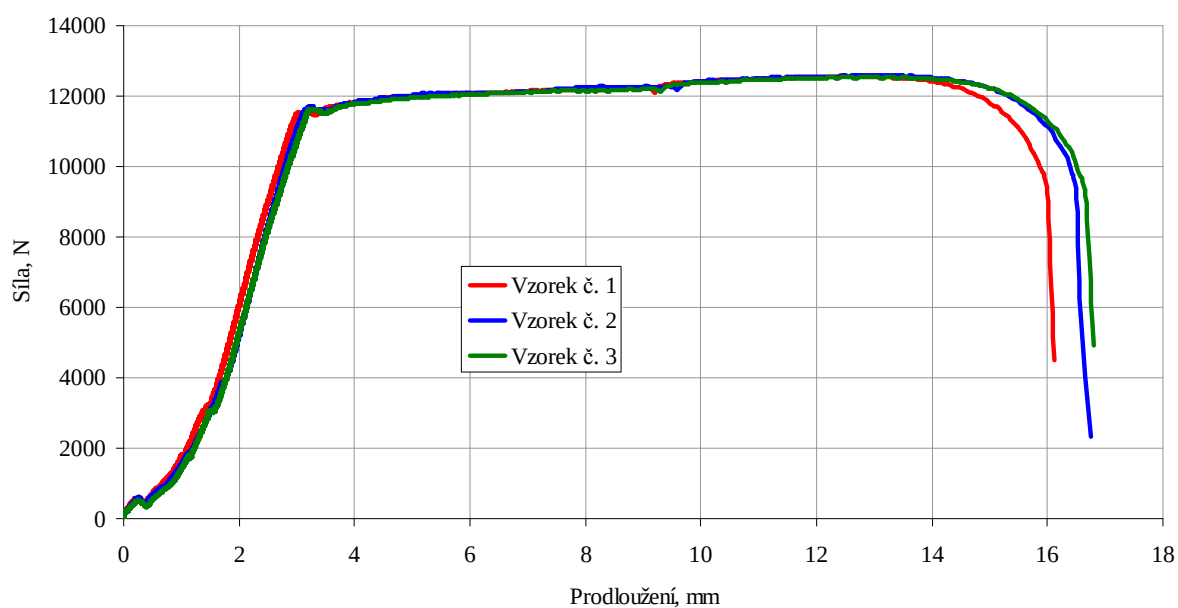
Obr. 39 – Upnutí vzorku ve zkušebním trhačím stroji

Domex 420, $t = 2 \text{ mm}$

U všech vzorků došlo k porušení mimo svar i tepelně ovlivněnou oblast. Naměřené hodnoty odpovídají hodnotám uváděným výrobcem.

Tabulka 9 Hodnoty z tahové zkoušky - Domex 420, $t = 2 \text{ mm}$

Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	$S_0 [\text{mm}^2]$	$F_m [\text{N}]$	$R_{p0,2} [\text{MPa}]$	$R_m [\text{MPa}]$	A [%]
1	2	12,05	24,1	12564,4	476,46	521,34	16,25
2	2	12,05	24,1	12583,2	482,32	522,12	17,5
3	2	12,05	24,1	12545,6	477,24	520,56	17,5



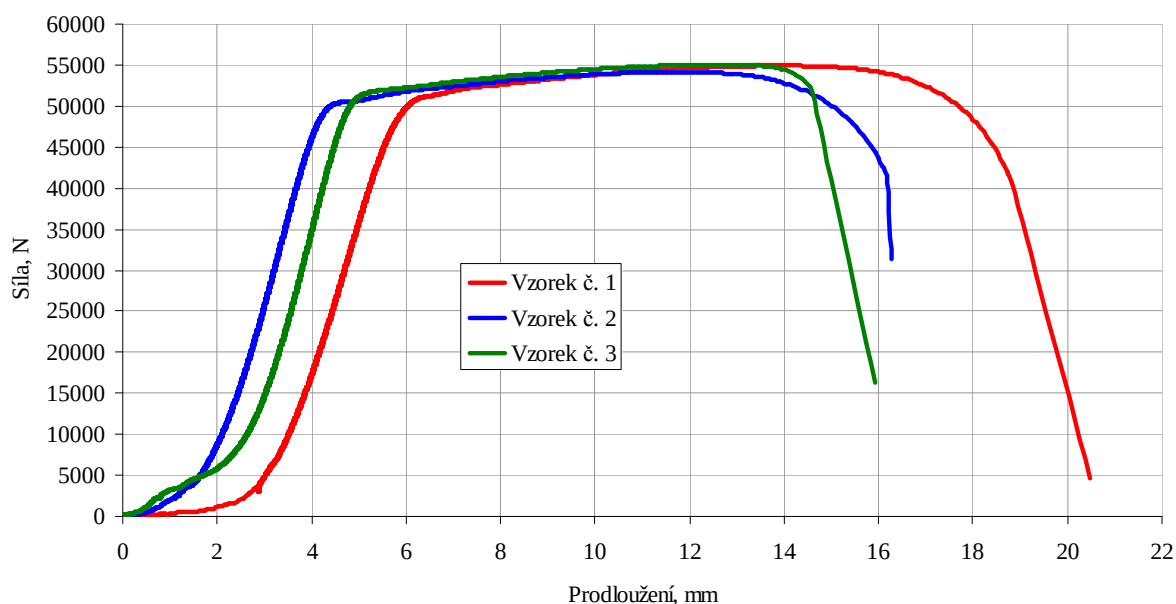
Obr. 40 Tahové diagramy pro Domex 420, $t = 2 \text{ mm}$

Domex 420, t = 4 mm

U vzorku č. 3 došlo k porušení v tepelně ovlivněné oblasti, naměřená mez kluzu je však nejvyšší. Všechny naměřené pevnosti odpovídají hodnotám uváděným výrobcem, tažnost vzorku č. 3 je nedostatečná.

Tabulka 10 Hodnoty z tahové zkoušky - Domex 420, t = 4 mm

Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	S ₀ [mm ²]	F _m [N]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
1	4	25,05	100,2	54974,1	506,06	548,64	20
2	4	25	100	54221,9	504,31	542,22	17,5
3	4	25,05	100,2	55126,9	515,50	550,17	12,5



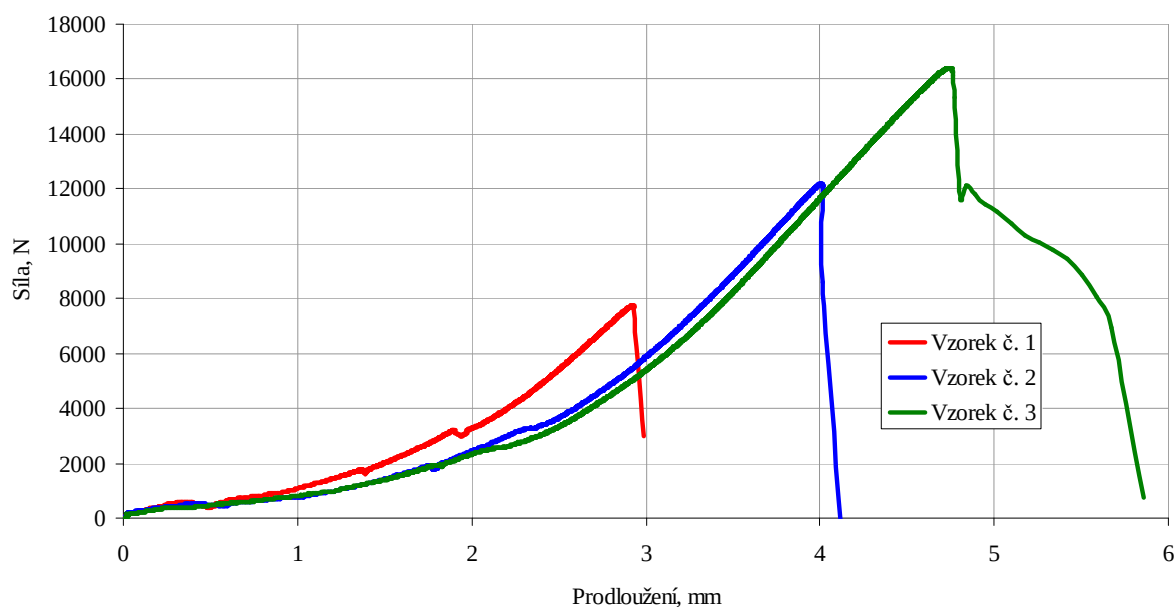
Obr. 41 Tahové diagramy pro Domex 420, t = 4 mm

Domex 700, t = 2 mm

U všech vzorků došlo k porušení přímo na rozhraní svarový kov – základní materiál. Svarové plochy základního materiálu byly nataveny pouze několik desetin milimetru z lící a kořenové strany. U vzorku č. 3 lom zasahuje přibližně ze 30 % do základního materiálu, proto zde byla naměřena nejvyšší hodnota.

Tabulka 11 Hodnoty z tahové zkoušky - Domex 700, t = 2 mm

Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	S ₀ [mm ²]	F _m [N]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
1	2	12,05	24,1	7730,4	124,88	320,76	1,25
2	2	12,05	24,1	12197,6	357,44	506,12	1,25
3	2	12,05	24,1	16420	483,10	681,33	2,5



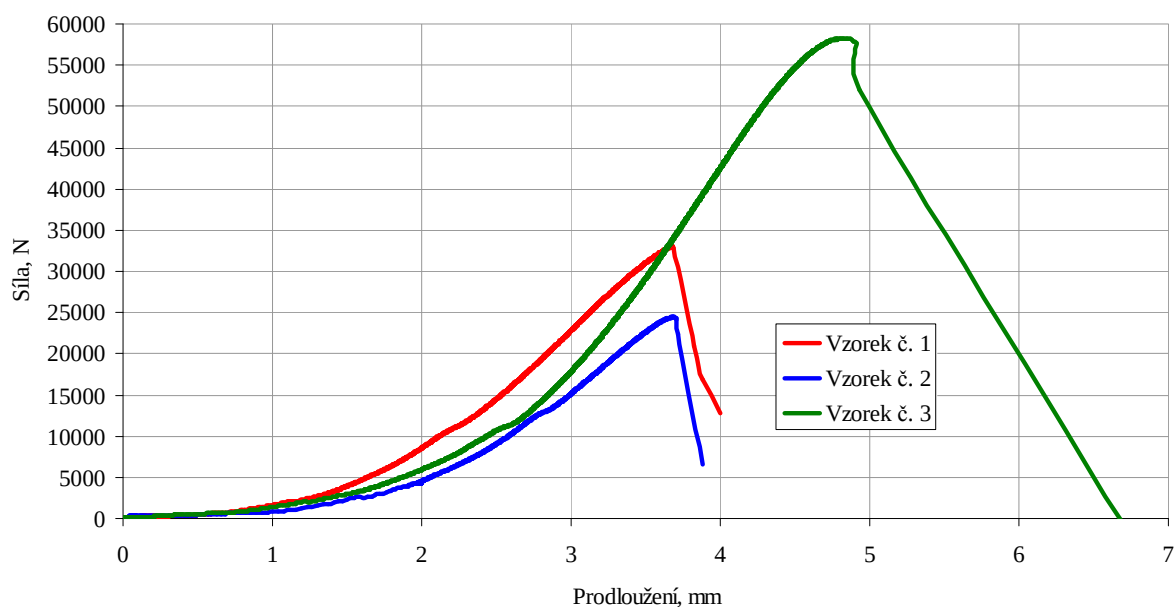
Obr. 42 Tahové diagramy pro Domex 700, $t = 2 \text{ mm}$

Domex 700, $t = 3 \text{ mm}$

U vzorků č. 1 a 2 došlo k porušení přímo na rozhraní svarový kov – základní materiál. Svarové plochy základního materiálu byly nataveny pouze částečně. Vzorek č. 3 vykazuje nejvyšší pevnost, jelikož lom zasahuje z velké části do základního materiálu.

Tabulka 12 Hodnoty z tahové zkoušky - Domex 700, $t = 3 \text{ mm}$

Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	$S_0 \text{ [mm}^2\text{]}$	$F_m \text{ [N]}$	$R_{p0,2} \text{ [MPa]}$	$R_m \text{ [MPa]}$	A [%]
1	3	25,1	75,3	33018,8	278,14	438,50	1,25
2	3	25,1	75,3	24451,2	87,30	324,72	1,25
3	3	25,1	75,3	58212,8	691,28	773,08	1,25



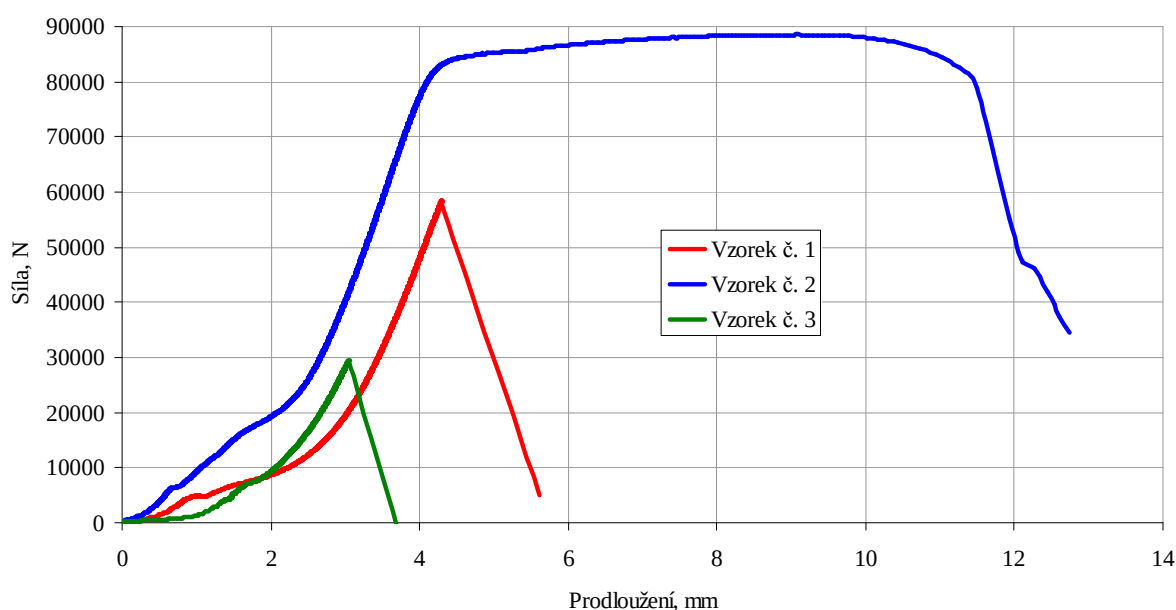
Obr. 43 Tahové diagramy pro Domex 700, $t = 3 \text{ mm}$

Domex 700, t = 4 mm

U vzorků č. 1 a 3 došlo k porušení přímo na rozhraní svarový kov – základní materiál. Svarové plochy základního materiálu byly nataveny pouze několik desetin milimetru z lící a kořenové strany. Vzorek č. 2 se porušil v tepelně ovlivněné oblasti, lom zasahuje přibližně ze 70 % do základního materiálu.

Tabulka 13 Hodnoty z tahové zkoušky - Domex 700, t = 4 mm

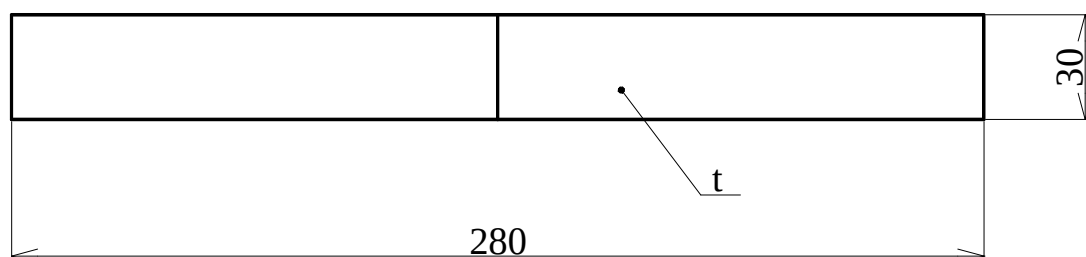
Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	S ₀ [mm ²]	F _m [N]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
1	4	25	100	58354	51,07	583,54	1,25
2	4	25	100	88542	846,48	885,42	8,75
3	4	25,05	100,2	29360,4	-20,55	293,02	0,63



Obr. 44 Tahové diagramy pro Domex 700, t = 4 mm

5.8 Zkouška ohybem

Tvar a rozměry vzorků byly zvoleny dle pokynů v normě ČSN EN 895. Rozměry jsou pro všechny tloušťky plechu stejné.



Obr. 45 Rozměry vzorku pro zkoušku ohybem

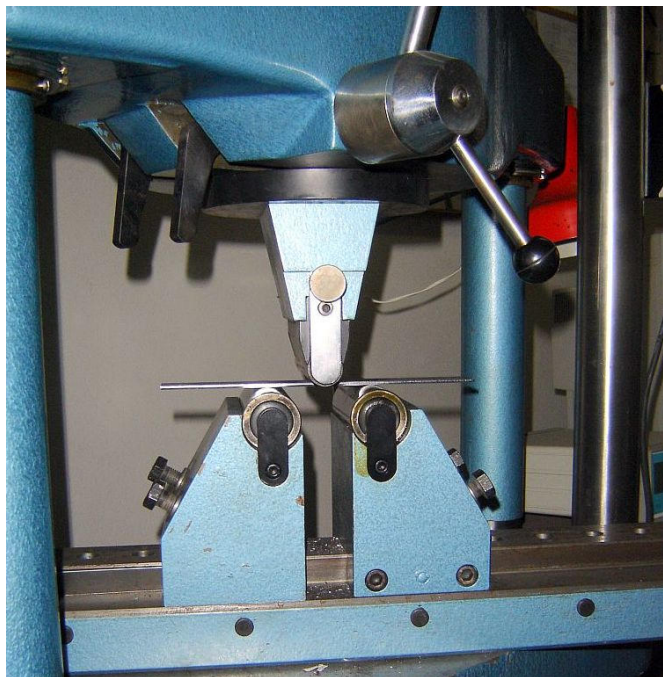
Byla provedena příčná zkouška ohybem ze strany kořene svaru, z technických důvodů nebylo možné dodržet rozměry zkušebního ústrojí požadované normou ČSN EN ISO 5173

ani kritérium ohnutí vzorku o úhel 180° dané normou ISO 15614-11. Dá se však předpokládat, že ohnuté vzorky bez jakýchkoliv necelistvostí je možné dohnout až na úhel 180° a tedy tyto vzorky označit jako vyhovující.

V tabulce 14 je pro jednotlivé vzorky uveden dosažený úhel ohybu a síla F , pokud došlo k porušení zkušebního vzorku před dokončením zkoušky.

Tabulka 14 Naměřené hodnoty při příčné zkoušce ohybem

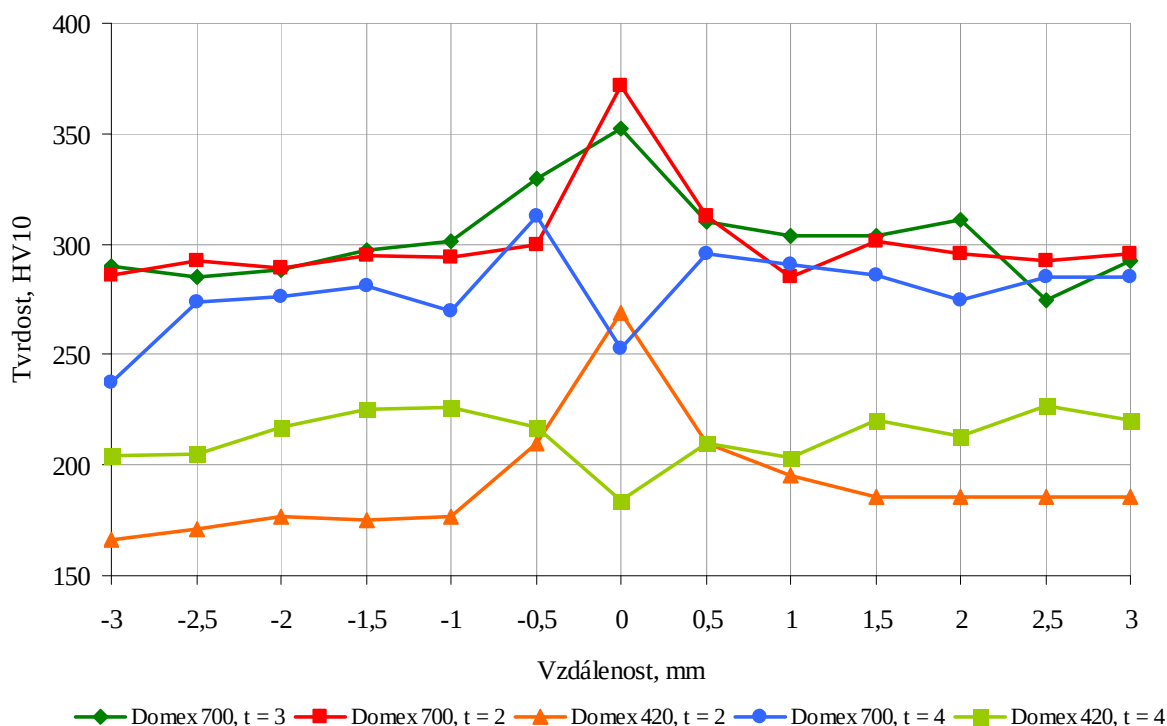
	Č. vzorku	Úhel ohybu	Porušení	F [N]
	1	127°	Ne	×
Domex 420, t = 2 mm	2	127°	Ne	×
	3	127°	Ne	×
	1	137°	Ne	×
Domex 420, t = 4 mm	2	137°	Ne	×
	3	137°	Ne	×
	1	122°	Ne	×
Domex 700, t = 2 mm	2	18°	Ano	1354
	3	20°	Ano	1477
	1	127°	Ne	×
Domex 700, t = 3 mm	2	127°	Ne	×
	3	127°	Ne	×
	1	35°	Ano	5690
Domex 700, t = 4 mm	2	13°	Ano	3292
	3	13°	Ano	3800



Obr. 46 Ustavení vzorku ve zkušebním stroji

5.9 Zkouška tvrdosti

Měření tvrdosti proběhlo dle normy ČSN EN ISO 6507-1 na tvrdoměru Zwick 3212 pod zatížením 10 kg a vyhodnocení naměřených hodnot pomocí softwaru testXpert. Na každém vzorku bylo provedeno 13 vtisků v jedné řadě přibližně 1 mm pod povrchem líce svaru. Vzdálenost mezi jednotlivými vtisky byla 0,5 mm. Na obrázku 47 je znázorněn průběh naměřených hodnot na všech vzorcích. Tvrdost byla změřena v celém průřezu svaru od středu svaru na obě strany přes tepelně ovlivněnou oblast až do základního materiálu.

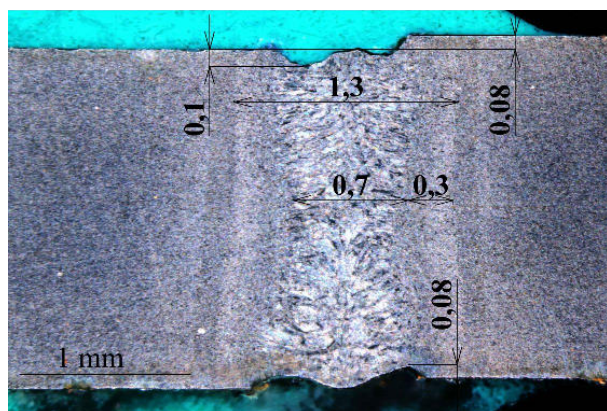


Obr. 47 Průběhy naměřených tvrdostí

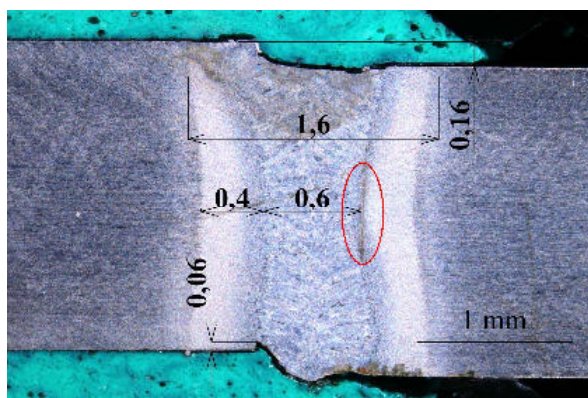
U tenkých plechů o tloušťkách 2 mm a 3 mm došlo k poměrně výraznému nárůstu tvrdosti v oblasti svarového kovu. Naopak u vzorků s tloušťkou 4 mm se tvrdost ve svarovém kovu mírně snížila navzdory tomu, že rychlost ochlazování závisí především na objemu základního materiálu, tedy na tloušťce plechu. To je zřejmě způsobeno vneseným teplem do svaru, které závisí na tepelném příkonu. Ten je u vzorků s tloušťkou 4 mm více než dvakrát vyšší.

5.10 Makroskopické zkoušení

Po připravení metalografických vzorků byly vyhotoveny snímky pro makroskopické pozorování. Tyto snímky byly využity pro vyhodnocení velikostí jednotlivých částí svarového spoje a také pro klasifikaci a vyhodnocení případných vad dle ČSN EN ISO 13919-1.



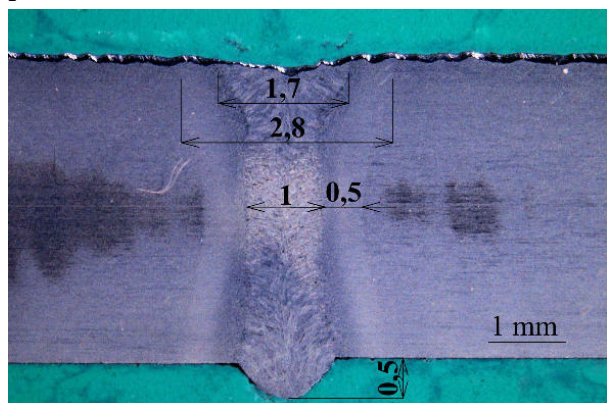
Obr. 48 Makrostruktura Domex 420, $t = 2$ mm



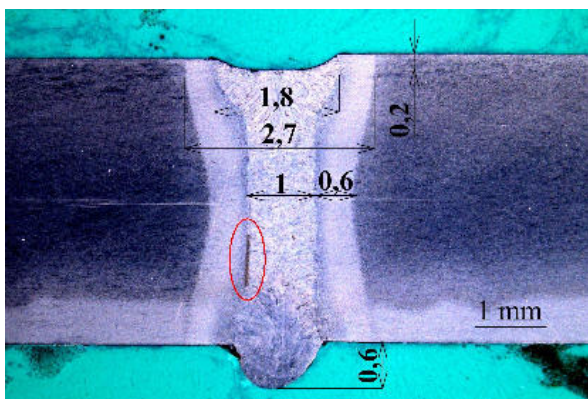
Obr. 49 Makrostruktura Domex 700, $t = 2$ mm

Na obrázku 48 je makrostruktura svaru materiálu Domex 420 o tloušťce 2 mm. Lze pozorovat výrazné zhrubnutí zrna v oblasti svarového kovu a také propadlý přechod v kořeni, prohloubený povrch svaru a lineární přesazení. Všechny tyto vady jsou přípustné.

Ve svaru na obrázku 49 (Domex 700, $t = 2$ mm) se vyskytuje mírně propadlý přechod v kořeni, lineární přesazení a především studený spoj. Studený spoj takové velikosti je nepřijatelná vada.



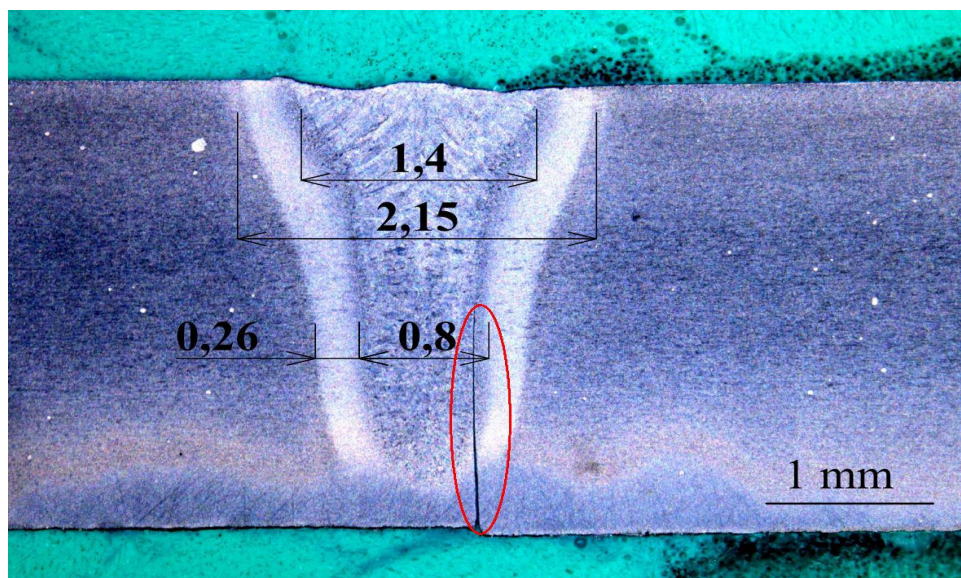
Obr. 50 Makrostruktura Domex 420, $t = 4$ mm



Obr. 51 Makrostruktura Domex 700, $t = 4$ mm

Při svařování materiálu Domex 420 o tloušťce 4 mm (viz obr. 50) došlo k nadměrně propadlému kořeni. Vada této velikosti je však pro danou tloušťku přípustná.

Na obrázku 51 (Domex 700, $t = 4$ mm) se nachází prohloubený povrch svaru, nadměrně propadlý kořen a studený spoj. Studený spoj dané velikosti je nepřijatelný.



Obr. 52 Makrostruktura Domex 700, $t = 3$ mm

Na makrovýbrusu je patrné, že před svařováním materiálu Domex 700 o tloušťce 3 mm došlo zřejmě ke špatnému zaměření paprsku na mezeru mezi základními materiály. Kořen tedy není provařený, studený spoj zasahuje do celé poloviny tloušťky. Tato vada byla zjištěna již při kapilární zkoušce a je nepřijatelná.

6 Závěry

Práce se věnuje technologii laserového svařování jemnozrnných ocelí Domex MC. K vypracování této bylo použito odborné literatury podrobně zaměřené na problematiku laserových technologií, především laserového svařování.

Svary provedené laserem se značně odlišují od svarů provedenými klasickými (obloukovými) metodami. Svary jsou velice úzké, povrch hladký a rovnoměrný. Jak bylo zjištěno během vizuální kontroly, často dochází vlivem gravitace k převýšení kořene a prohloubení povrchu svaru. Velikost těchto vad však bývá přípustná. Počet povrchových vad zjistitelných vizuální kontrolou bývá obecně velice nízký.

Kromě geometrie se svary odlišují také vneseným teplem a výslednou strukturou. Vysoké rychlosti svařování a tedy malé vnesené teplo mohou mít za následek příliš rychlé ochlazení a vznik martenzitické či bainitické struktury s vysokou tvrdostí.

Technologie a parametry svařování výrazně ovlivňují vlastnosti svařovaných konstrukcí. Zvláště u jemnozrnných termomechanicky zpracovaných materiálů je třeba věnovat technologii vysokou pozornost a důsledně dodržovat navržený a kvalifikovaný postup svařování.

Při návrhu postupu svařování jemnozrnných ocelí je třeba nalézt kompromis mezi malým vneseným teplem a zároveň dostatečnou rychlostí ochlazování. Rychlost ochlazování závisí především na zmíněném vneseném teple ale také na tloušťce základního materiálu. Na naměřených hodnotách tvrdosti je však patrné, že k poměrně značnému nárůstu tvrdosti ve svarovém kovu došlo u vzorků o tloušťkách 2 mm a 3 mm. U těchto vzorků bylo vypočítán tepelný příkon $40 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-1}$ pro $t = 2 \text{ mm}$ a $53,4 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-1}$ pro $t = 3 \text{ mm}$. U vzorků o tloušťkách 4 mm činil tepelný příkon bezmála $112 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-1}$ a ve svarovém kovu došlo k mírnému poklesu tvrdosti.

Příčná zkouška tahem a zkouška ohybem prokázaly vysokou kvalitu svarů provedených na materiálu Domex 420 MC. U materiálu Domex 700 MC tomu tak však není. Během zkoušky tahem došlo k porušení všech vzorků na rozhraní svarový kov – základní materiál. To bylo způsobeno výskytem studených spojů ve svarech, jak prokázaly snímky z metalografické rozboru. Studené spoje zřejmě vznikly vlivem teplotní roztažnosti při svařování i přes to, že svařované základní materiály byly k sobě důsledně sestaveny a upnuty.

Parametry laserového svařování nezahrnují pouze výkon svazku, svařovací rychlost, polohu ohniska apod. ale také velikost mezery mezi základními materiály a vystředění paprsku s osou mezery. Tyto dva parametry jsou obzvlášť důležité při svařování tupých spojů. Nároky na přípravu svarových ploch a ustavení svařovaných součástí laserem jsou mnohem vyšší než je tomu u klasických obloukových metod.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] MACEK, Karel, J. JANOVEC, P. JURČÍ a P. ZUNA. *Kovové materiály*. Vyd. 1. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006, 164 s. ISBN 80-010-3513-1.
- [2] ZRNÍK, Josef. *Evropská strategie výrobních procesů: Příprava ultrajemnozrných a nanokrystalických kovových materiálů extrémní plastickou deformací a jejich vlastnosti*. Vyd. 1. Ostrava: Repronis, 2007, 75 s. ISBN 978-80-7329-153-2 (BROŽ.). Dostupné z: www.nanotechnologie.cz/storage/strategie4.pdf
- [3] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 392 s. ISBN 80-7204-248-3(2.OPR.A ROZŠ. VYD.).
- [4] ASHBY, M, Hugh SHERCLIFF a David CEBON. *Materials: engineering, science, processing and design*. 1st ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2007, 514 s. ISBN 978-0-7506-8391-3.
- [5] FOLDYNA, V., K. HENNHOFFER, I. HLAVATÝ, J. KOUKAL, F. KRISTOFORY, V. OCHODEK, V. PILOUS, J. PURMENSÝ, D. SCHWARZ a J. VESELKO. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 1999, 296 s. Svařování. ISBN 80-857-7163-2.
- [6] HRIVŇÁK, Ivan. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2009, 486 s. ISBN 978-80-227-3167-6.
- [7] TURŇA, M. a P. KOVAČÓCY. *Zváranie laserovým lúčom*. 1. vydanie. Bratislava: Vydavateľstvo STU v Bratislavě, 2003, 90 s. ISBN 80-227-1921-8.
- [8] KANNATEY-ASIBU, E. *Principles of laser materials processing*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2009, 819 s. Wiley series on processing of engineering materials. ISBN 04-701-7798-5.
- [9] *Využití laseru v průmyslu: MATEX PM : [Plzeň 29.-30.3.2011]*. V Tribunu EU vyd. 1. Editor Stanislav Němeček. Brno: Tribun EU, 2011, 107 s. Knihovnicka.cz. ISBN 978-80-7399-379-5.
- [10] ION, John C. *Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application*. Amsterdam: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2005, 556 s. ISBN 07-506-6079-1.
- [11] GROTE, K. H. a E. ANTONSSON. *Springer handbook of mechanical engineering*. 1st ed. New York: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-49131-6.
- [12] TRUMPF WERKZEUGMASCHINEN GMBH. *Technical information: Laser processing: CO2 laser* [online]. Technical documentation of TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH, 2007 [cit. 2012-04-08]. Dostupné z: <http://www.trumpf-machines.com/en/about-trumpf/media-center/library/laser-and-laser-processing.html>
- [13] KUBÍČEK, Jaroslav a Libor MRŇA. *Technické aspekty svařování laserem*. [online]. [cit. 2012-04-09]. Dostupné z: <http://www.svarak.cz/images/stories/pdf/Svarování%20laserem.pdf>
- [14] PODHORA, Jiří. *Destruktivní zkoušení základních materiálů a svarových spojů*. Brno: TDS Brno – SMS, s. r. o., 2005. ISBN 80-903386-4-X.
- [15] *Vláknové lasery pro průmyslové aplikace, už nikoli coby fyzikální rarita. Technický týdeník*. Praha: SpringerMedia, 2009, č. 10, s. 8. ISSN 0040-1064. Dostupné z: <http://www.techtydenik.cz/detail.php?action=show&id=5513&mark=>
- [16] *Svět svaru: časopis o moderních trendech a technologiích ve svařování a řezání kovů*. Ostrava: Hadyna - International, spol. s r. o., 2011, roč. XV., č. 3. ISSN 1214-4983. Dostupné z: <http://www.hadyna.cz/svetsvaru/issue/SS113.pdf>

- [17] LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi* [online]. Olomouc, 2010 [cit. 2012-04-15]. Dostupné z: fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf
- [18] ŠULC, Jan. *Lasery a jejich aplikace* [online]. 2002 [cit. 2012-04-15]. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>
- [19] 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.
- [20] ŠULC, Jan. *Průmyslové aplikace laserových systémů*. [online]. 2004 [cit. 2012-04-27]. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/prumysl.pdf>
- [21] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II - Svařování: Speciální metody tavného svařování, tlakové svařování* [online]. Brno, 2006 [cit. 2012-04-27]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/opory_soubory/technologie_2__svarovani/technologie_2__specialni_metody_svarovani.doc
- [22] PETERKA, Pavel. Vlákenné lasery – jasné světlo ze skleněných nitek. *Československý časopis pro fyziku*. Česká republika: Akademie věd České republiky, 2010, roč. 60, č. 4, s. 302-307. ISSN 0009-0700. Dostupné z: http://www.ufe.cz/docs/articles/10_Peterka_CesCasFyz_50_let_laseru-vlaknove_lasery.pdf
- [23] MRŇA, Libor. Vlákenné lasery pro průmyslové aplikace, už nikoli coby fyzikální rarita. *Technický týdeník*. Praha: SpringerMedia, 2009, roč. 57, č. 10. ISSN 0040-1064.
- [24] BENKO, B., P FODREK, M. KOSEČEK a R. BIELAK. *Laserové technologie*. 1. vyd. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2000. ISBN 80-227-1425-9.
- [25] Co rozhoduje při volbě typu laseru. *MM Průmyslové spektrum*. Praha: SEND Předplatné s.r.o., 2011, č. 9, s. 91-93. ISSN 1212-2572. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/110916>
- [26] MÍŠEK, Bohumil. *Nedestruktivní metody zkoušení svarových spojů*. Brno: TDS Brno – SMS, s. r. o., 2005.
- [27] ČVUT. *Hodnocení kvality svarového spoje: Teoretický úvod k cvičení z předmětu Technologie I* [online]. 2005 [cit. 2012-05-05]. Dostupné z: u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/def_kontrola_sv.pdf
- [28] High power fiber lasers for industrial applications. In: *IPG Photonics High Power Fiber Lasers* [online]. 2009 [cit. 2012-05-08]. Dostupné z: http://www.ipgphotonics.com/Collateral/Documents/English-US/HP_Brochure.pdf
- [28] ABB IRB 2400 - Roboty. ABB. *The ABB Group: Automation and Power Technologies* [online]. 2012 [cit. 2012-05-13]. Dostupné z: <http://www.abb.com/product/seitp327/657d58e39c804f64c1256efc002860a7.aspx>
- [28] Welding of Domex and Docol advanced high strength steels. In: SSAB [online]. 2009 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www.ssab.com/Global/DOMEXDOCOL/Brochures/en/312_Welding%20of%20Domex%20and%20Docol%20Advanced%20High%20Strength%20Steels.pdf
- [29] VLACH, Bohumil. *Tranzitní lomové chování ocelí* [online]. 2000 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/files/vyuka/GS0/04 - Tranzitni lomove chovani.doc>
- [30] MACEK, Karel et al. *Nauka o materiálu*. Vyd. 1. Praha: ČVUT, 1999. ISBN 80-010-1507-6.
- [31] The Steel Book. In: SSAB [online]. 2009 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www.ssab.com/Global/SSAB/Brochures/en/001_The%20Steel%20Book.pdf
- [32] Automotive Steel Definitions. *WorldAutoSteel* [online]. [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.worldautosteel.org/steel-basics/automotive-steel-definitions/>

- [33] Lighter Stronger Smarter. In: SSAB [online]. 2009 [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: http://www.ssab.com/Global/Domex/Brochures/en/205_tipper%20-%20Lighter%20Stronger%20smarter.pdf
- [34] MRŇA, Libor. *Základy laserové techniky* [.pdf]. Brno, 2011.
- [35] Optech Consulting -- Laser and Photonics Market Analysis, Forecast, Consulting [online]. [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.optech-consulting.com/>
- [36] TRUMPF LaserNetwork [online]. [cit. 2012-05-20]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/produkty/laserova-technika/vyrobky/pevnolatkove-lasery/vedeni-paprsku/trumpf-lasernetwork.html>
- [37] DVOŘÁK, Milan. *Technologie II*. 3. dopl. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 238 s. ISBN 80-214-2683-7.
- [38] ČSN EN 1011-6. *Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů: Část 6: Laserové svařování*. Český normalizační institut, 2006.
- [39] ASM handbook: Volume 6 - Welding, Brazing and Soldering. 6th print. Materials Park: ASM International, 2003, xvi, ISBN 08-717-0382-3.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Tažnost	%
b	Šířka vzorku	mm
CE _{IIV}	Uhlíkového ekvivalentu	%
c _z	Rychlost zvuku	m·s ⁻¹
d _m	Průměr paprsku na výstupu z rezonátoru	mm
d _z	Střední velikost zrna	mm
E	Energie pulzu	J
E ₁	Energie na základní hladině	J
E ₂	Energie na excitační hladině	J
f	Frekvence pulzu	Hz
F _m	Maximální síla	N·mm ^{-3/2}
h	Planckova konstanta	J·s ⁻¹
I	Hustota výkonu	W·cm ⁻²
K _z	Faktor vlivu hranic zrn	N·mm ^{-3/2}
P	Výkon	W·cm ⁻²
p _{max}	Maximální tlak	MPa
P _{max}	Maximální výkon pulzu	W
Re	Mez kluzu	MPa
R _m	Mez pevnosti	MPa
R _{p0,2}	Mez kluzu	MPa
S ₀	Průřez vzorku	mm ²
T	Perioda pulzu	s
t	Tloušťka	mm
v	Rychlost svařování	mm·s ⁻¹
Γ	Koeficient Grunajzera	-
Θ	Velikost divergence	-
λ	Vlnová délka záření	mm
ν	Frekvence uvolněného vlnění	s ⁻¹
σ ₀	Třecí napětí mřížky	MPa
τ	Délka pulzu	s ⁻¹

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 Vzorový formulář pWPS

Příloha 2 Fotodokumentace vzorků po zkoušce tahem

Předběžná specifikace postupu svařování „pWPS“ dle ČSN EN ISO 15609-4 (laserové svařování)

Identifikace dokladu (pWPS): D420/2

Číslo WPQR: ×

Výrobce: Tomáš Němeček

Metoda (dle ČSN EN ISO 4063): 521

Identifikace zařízení: laserový zdroj: YLS 2000 (IPG)

jakost svazku: $K = 0,91$

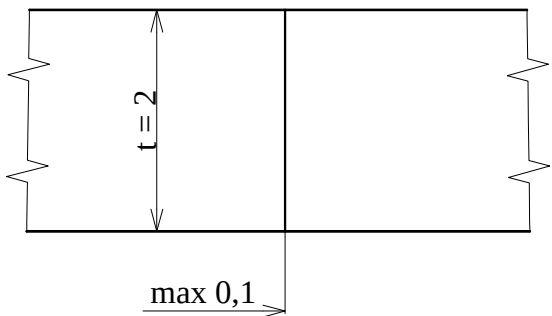
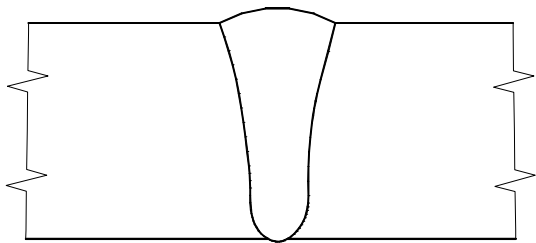
polarizace svazku: náhodná

systém vychylování svazku: robot IRB 2400-10 (ABB)

systém fokusace svazku: svařovací hlava YW 30

systém podávání ochranného materiálu: ×

Specifikace základních materiálů: – materiál 1: Domex 420 MC – materiál 2: Domex 420 MC	Tloušťka základních materiálů: – materiál 1: 2 mm – materiál 2: 2 mm
Typ spoje: plech	Poloha svařování: PA

Tvar spoje	Postup svařování
	

Upínací přípravky: mechanicky upnuto: upínky, svařovací stůl

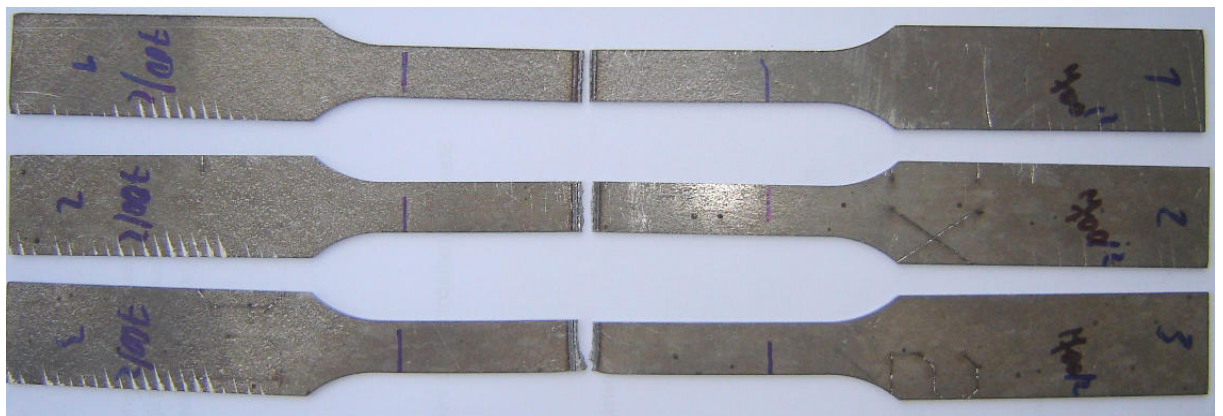
	Stehovací vrstva	Svařovací vrstva	Kosmetická vrstva
Výkon svazku – kontinuální:		1600 W	
Poloha ohniska*:		0	
Změny výkonu – náběh:		0,2 mm (300 W)	
Úhel vychylování svazku – podélný: – příčný:		90° 90°	
Rychlost pohybu ($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)		2,4	
Přídavný materiál:		×	
Plyn k odstranění plazmy:		×	
Ochranný plyn – klasifikace dle EN 439 a typ: – průtok ($\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$):		I1 (Ar 4,6) 12	
Pracovní vzdálenost (mm):		21	
Tryska ochranného plynu – poloha (mm): – průměr (mm):		21 7,5	
Přehřev:		×	
Tepelné zpracování po svařování:		×	
Operace po svařování:		svar okartáčován	

)* Poloha ohniska je definována vůči povrchu materiálu, kladné hodnoty jsou pod povrchem.

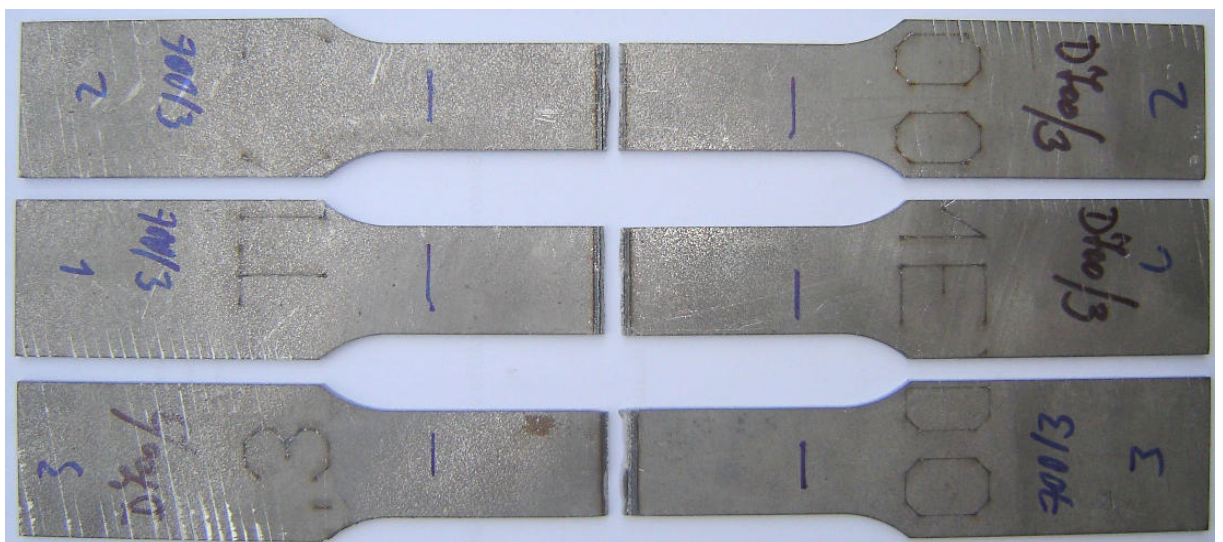
Příloha 2 Fotodokumentace vzorků po zkoušce tahem



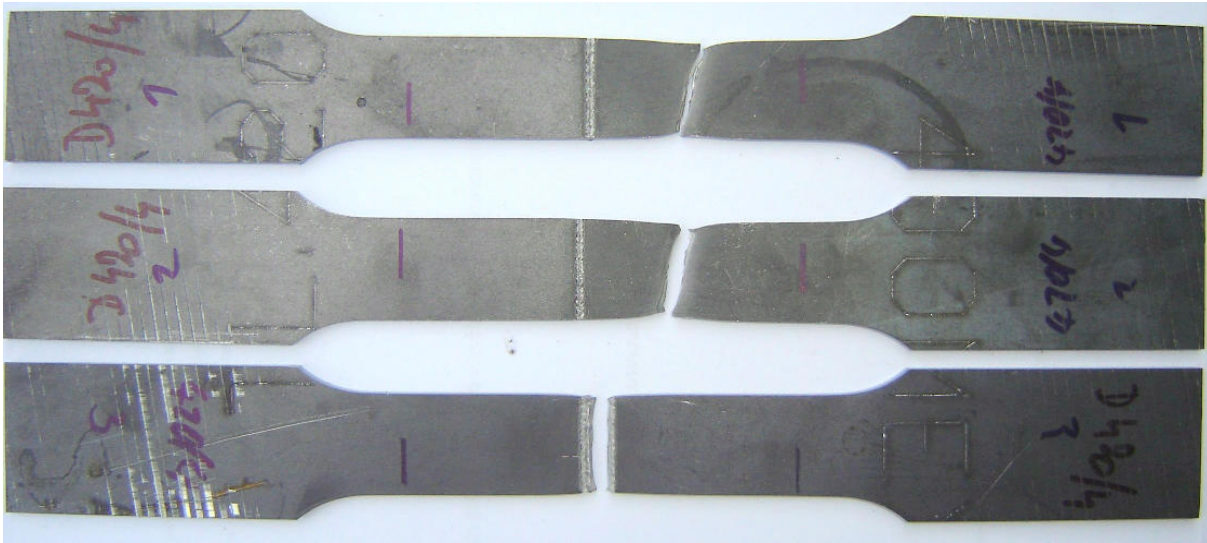
Domex 420, t = 2 mm



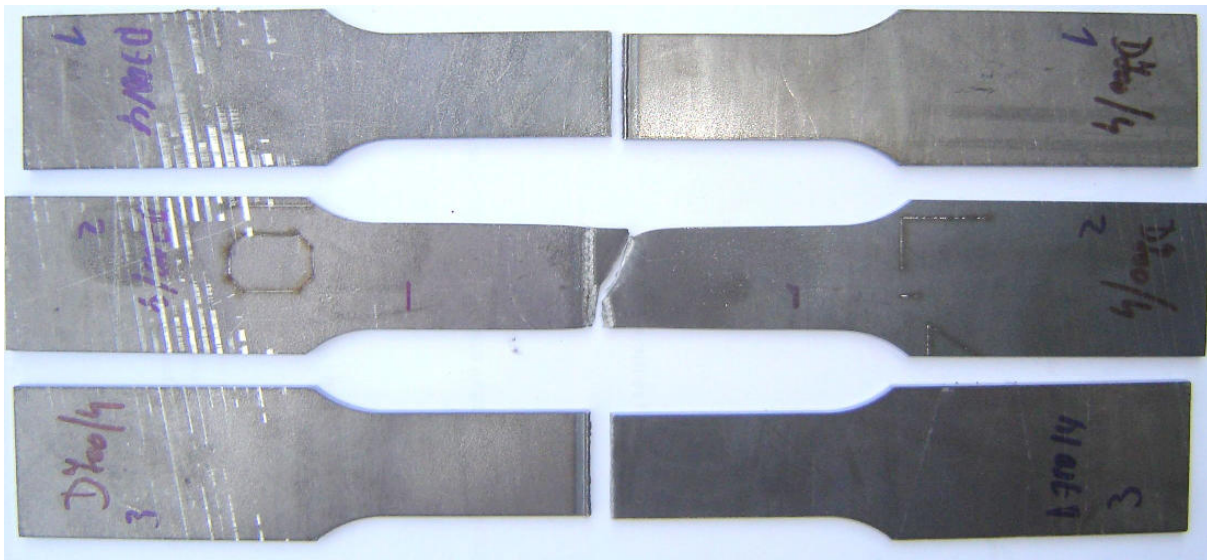
Domex 700, t = 2 mm



Domex 700, t = 3 mm



Domex 420, $t = 4 \text{ mm}$



Domex 700, $t = 4 \text{ mm}$