



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



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

SVAŘOVÁNÍ OCELÍ S ROZDÍLNÝMI VLASTNOSTMI POMOCÍ YB-YAG LASERU

WELDING OF THE DIFFERENT TYPE OF STEEL BY THE YB-YAG LASER

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. LUBOŠ CHLÁD

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

RNDr. LIBOR MRŇA, Ph.D.

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Luboš Chlád

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 ocelí s rozdílnými vlastnostmi pomocí Yb-YAG laseru

v anglickém jazyce:

Welding of the different type of steel by the Yb-YAG laser

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Stále větší množství dílů pro automobilový průmysl vzniká z tzv. "tailored blanks" plechů, kdy se příslušný přístřih svaří laserem z více částí z ocelových plechů různých mechanických vlastností. Teprve poté se z tohoto přístřihu lisuje výsledný dílec. Cílem práce je vytvoření těchto svarů pomocí Yb-YAG laseru a studium jejich mechanických a strukturních vlastností. Jako výchozí materiály budou použity hlubokotažná ocel společně s jemnozrnnými vysokopevnostními ocelmi.

Cíle diplomové práce:

Osvojit si technologii svařování laserem. Provést mechanické zkoušky a vyhodnotit strukturu svarů. Komplexně posoudit vliv svařovacích parametrů na výsledný svar.

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 2012/2013.

V Brně, dne 2.11.2012

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

CHLÁD Luboš: Svařování ocelí s rozdílnými vlastnostmi pomocí Yb-YAG laseru.

Diplomová práce předkládá experiment svařování vysokopevnostní oceli Docol 1200 M a oceli DC01 pomocí vláknového Yb-YAG laseru. Experiment je založen na zkoušení těchto svarů. V teoretické části jsou popsány lasery, laserové technologie svařování, oceli vyšších pevností, technologie tailored blanks a zkoušky svarových spojů. V experimentální části byly provedeny a vyhodnoceny zkoušky svarů, a to příčná zkouška tahem, zkouška tvrdosti podle Vickerse, zkouška hloubením podle Erichsena a zkouška makrostruktury a mikrostruktury. V závěru diplomové práce jsou uvedeny a vyhodnoceny jednotlivé výsledky experimentu.

Klíčová slova

laser, laserové svařování, ocel, tailored blanks, zkouška

ABSTRACT

CHLÁD Luboš: Welding of the different type of steel by the Yb-YAG laser.

The master's theses presents an experiment of welding of high strength steel Docol 1200 M and of steel DC01 by the fiber Yb-YAG laser. The experiment is based on testing welds which were made during the experiments. The lasers, laser technologies of welding, steels of higher strength, tailored blanks technology and testing of welds are described in the theoretical part. The practical part contains description and evaluation of tests of welds – transverse tension test, Vickers hardness test, Erichsen cupping test and macrostructure and microstructure test. The final evaluation results of the experiment are presented in the conclusion of the master's theses.

Key words

laser, laser welding, steel, tailored blanks, test

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CHLÁD, Luboš. *Svařování ocelí s rozdílnými vlastnostmi pomocí Yb-YAG laseru*. Brno 2013. 55 s., CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. 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 24. 5. 2013

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D. a panu Vojtěchu Řiháčkovi za uskutečnění destruktivních zkoušek. Tato práce vznikla za podpory Evropské komise a Ministerstva školství mládeže a tělovýchovy České republiky (projekt. č. CZ.1.05/2.1.00/01.0017).

Velké poděkování patří také mojí rodině za podporu během celého studia.

OBSAH

Zadání
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování
Obsah

ÚVOD	11
1 LASEROVÉ TECHNOLOGIE	12
1.1 Fyzikální podstata laseru	12
1.2 Vlastnosti laserového záření	14
1.3 Základní součásti laseru	16
1.4 Interakce laserového paprsku s materiálem	16
1.5 Rozdělení laserů	17
1.5.1 Plynové lasery	17
1.5.2 Pevnolátkové lasery	18
1.5.3 Polovodičové lasery	19
1.6 Využití laseru v průmyslu	20
2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ LASEREM	21
2.1 Mechanismus svařování laserem	21
2.1.1 Kondukční svařování	21
2.1.2 Penetrační svařování	22
2.2 Parametry svařování	22
2.2.1 Kontinuální režim	23
2.2.2 Pulzní režim	24
2.3 Příprava svarových ploch	24
2.4 Ochranné plyny při svařování laserem	25
2.5 Typy svarů	25
2.6 Výhody a nevýhody svařování laserem	26
3 OCELI VYŠŠÍ PEVNOSTI	27
4 TAILORED BLANKS	28
5 ZKOUŠENÍ SVAROVÝCH SPOJŮ	30
5.1 Vady svarových spojů	30
5.2 Hodnocení vad	31
5.3 Nedestruktivní zkoušení svarů	31
5.3.1 Vizuální kontrola	32
5.3.2 Kapilární (penetrační) zkouška	32

5.3.3	Magnetická prášková zkouška	32
5.3.4	Ultrazvuková zkouška	33
5.3.5	Prozařovací zkouška (RTG)	34
5.4	Destruktivní zkoušení svarů	34
5.4.1	Příčná zkouška tahem	34
5.4.2	Zkouška ohybem	35
5.4.3	Zkouška rázem v ohybu	35
5.4.4	Zkouška tvrdosti podle Vickerse	35
5.4.5	Zkouška hloubením podle Erichsena	36
5.4.6	Zkouška makroskopická a mikroskopická	36
6	PRAKTICKÁ ČÁST	37
6.1	Charakteristika svařovaných materiálů	37
6.2	Výpočet uhlíkového ekvivalentu	38
6.3	Příprava a realizace svařovacího procesu	38
6.4	Zvolený počet vzorků	40
6.5	Příčná zkouška tahem	40
6.6	Zkouška tvrdosti podle Vickerse	45
6.7	Zkouška hloubením podle Erichsena.....	48
6.8	Zkouška mikrostruktury a makrostruktury	49
7	TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ	54
	ZÁVĚR.....	55

Seznam použitých zdrojů

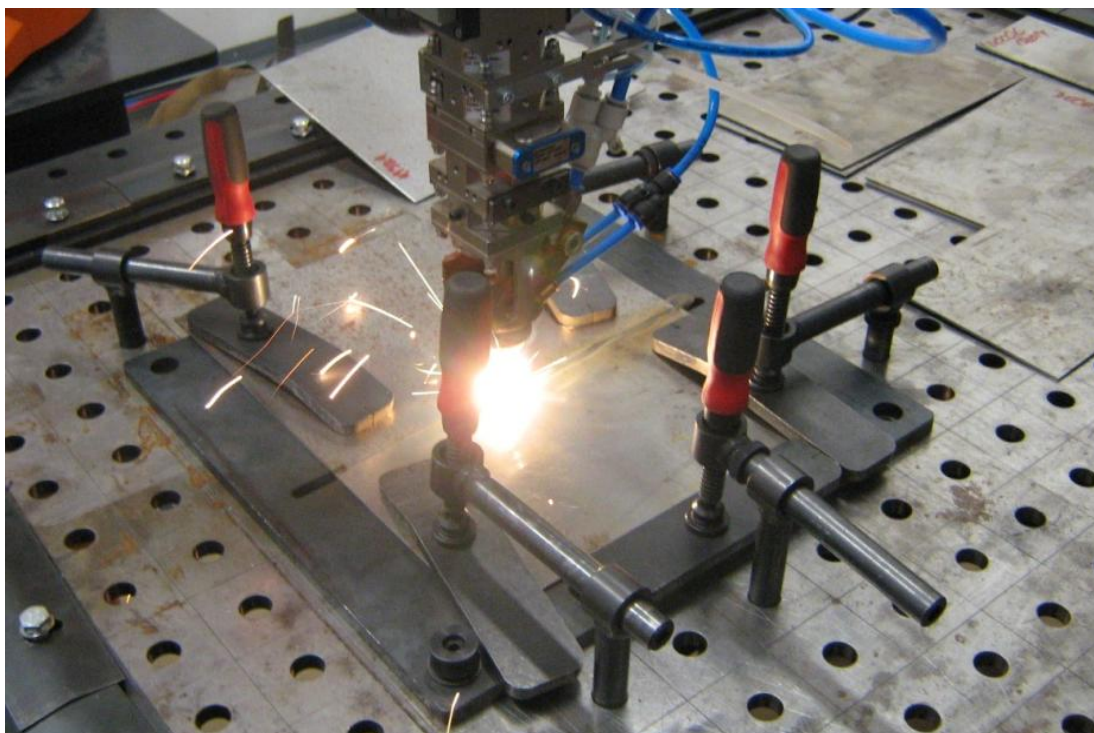
Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam příloh

ÚVOD

Laserové technologie se ve stále větší míře používají v průmyslové výrobě. Především se uplatňují při dělení a svařování materiálů. Hlavní výhody laserového svařování oproti klasickým metodám svařování jsou vysoká kvalita svaru, vysoká rychlost svařování, úzký a hluboký průvar, podstatně menší tepelně ovlivněná oblast, vysoká produktivita, dobrá možnost automatizace a povrchový vzhled.

Diplomová práce se zabývá experimentem svařování vysokopevnostní oceli Docol 1200 M a oceli DC01. Cílem je provést svary plechů technologií laserového svařování v ochranné atmosféře argonu při zvolených různých výkonech svařování. V teoretické části jsou popsány laserové technologie, rozdělení laserů, vady svarových spojů a zkoušky svarových spojů. V experimentální části budou provedeny svarové spoje pomocí vláknového Yb-YAG laseru na Ústavu přístrojové techniky Akademii věd České republiky. Následně budou plechy rozřezány a na vzorcích budou provedeny destruktivní zkoušky v laboratořích Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně. Na vzorcích bude provedena příčná zkouška tahem, zkouška tvrdosti podle Vickerse, zkouška hloubením podle Erichsena a zkouška makrostruktury a mikrostruktury. V závěru diplomové práce budou vyhodnoceny výsledky jednotlivých zkoušek a bude provedeno hodnocení vhodnosti laserového svařování pro zvolené výkony laseru.



1 LASEROVÉ TECHNOLOGIE [32]

Pojem LASER vznikl z počátečních písmen anglického popisu „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 záření unikátních vlastností.

1.1 Fyzikální podstata laseru [2], [14], [32], [40]

Laserový paprsek je vlnění optického druhu, který patří do skupiny elektromagnetického záření. Každý druh záření má jinou vlnovou délku, kterou jsou od sebe odlišné. Běžné světelné záření je vlnění, které obsahuje vlny nejrozličnějších frekvencí a délek (vycházející různými směry). U laseru se poprvé podařilo vytvořit podmínky, při kterých se ve vhodném aktivním prostředí pod vlivem určitého stimulujícího elektromagnetického záření spontánní emise potlačí na úkor emise vynucené stimulujícím zářením. Toto laserové záření je koherentní (vnitřně uspořádané a sfázované), může se prolínat (interferovat), je extrémně monochromatické (všechny fotony tohoto záření mají stejnou barvu, respektive vlnovou délku a frekvenci) a divergence záření je velmi malá při vysoké spektrální hustotě záření. Záření pomocí optického systému lze soustředit na velmi malou plochu zaručenou koherentností paprsku.

Podstatou laseru je, že elektromagnetická vlna určité frekvence vynucuje přechod elektronů z vyšší hladiny na nižší (tím se posiluje původní vlna).

Lasery jsou v podstatě transformátory energie relativně nižší kvality na energii s vyšší kvalitou – energie laserového záření. Laser je zařízení, které spotřebuje určité množství energie.

Podle kvantové fyziky může molekula nebo atom přijmout (nebo vyzářit) energii jen v určitých nejmenších dávkách tzv. kvantech. To je dáno rozdílem mezi energetickými hladinami, které může elektron (molekula, atom) zaujmout a vyjadřuje to Bohrov vztah:

$$E = h \cdot \nu \quad (1.1)$$

kde:

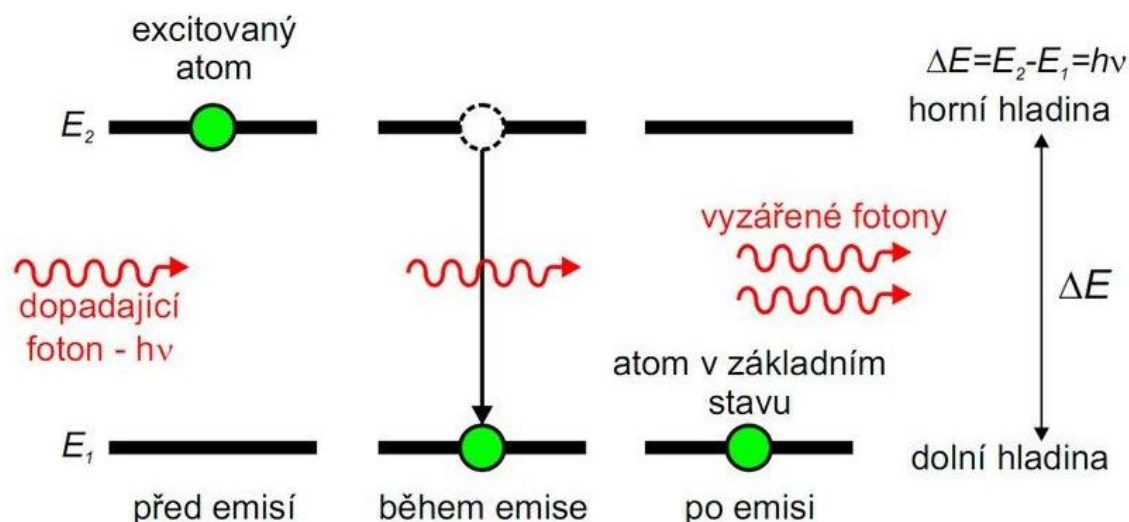
E – energetický rozdíl mezi hladinami [J],

h – Planckova konstanta [J·s],

ν – frekvence vyzářeného fotonu [s⁻¹].

Ke zvětšení počtu atomů na některé z vyšších hladin je zapotřebí vnějšího působení, které je nazýváno čerpání (buzení). Na čerpání můžeme použít různé druhy energie (optickou, tepelnou, chemickou, elektrickou). Po načerpání zůstávají elektrony na energetické hladině určitou dobu, přičemž může dojít k některým jevům:

- spontánní emise – jedná se o zářivý kvantový přechod z vyšší energetické hladiny na nižší; tento přechod nezávisí na působení vnějšího elektromagnetického záření,
- relaxační přechody – jsou to přechody vyvolané různými mechanismy (srážky částic),
- stimulovaná emise – je zářivý kvantový přechod z vyšší energetické hladiny na nižší, který je podmíněn existencí budícího elektromagnetického záření (obr. 1.1). Tento proces je podstatou zesilování světla v laserech.



Obr. 1.1 Princip stimulované emise [40]

Stimulovaná emise – je charakterizována, že nabuzený atom nacházející se na vyšší energetické úrovni je pod vlivem dopadajícího záření a vyzařuje energii a přechází na nižší energetickou úroveň.

Další podmínkou pro vznik stimulované emise je zpětná vazba mezi vyzařovanými fotony, čímž dochází k zesílení vycházejícího záření. Tuto funkci zaručuje rezonátor. Aktivní (pracovní) prostředí je umístěno mezi dvěma zrcadly. Jedno zrcadlo je částečně propustné (polopropustné) a druhé zrcadlo je nepropustné (odrazné). Polopropustné zrcadlo propustí část vzniklé světelné vlny ven z aktivního prostředí a druhá část vlny se vrací zpět, kde dochází k dalšímu zesílení světla. Základní princip laseru je na obr. 1.2. Nejjednodušším a nejrozšířenějším rezonátorem je rovinný rezonátor s paralelními zrcadly. Dalšími používanými typy jsou polokoncentrické nebo prstencové (kruhové) rezonátory. Správná funkčnost rezonátoru závisí na vzniku stojatého vlnění v rezonátoru. Vzdálenost zrcadel je velice důležitá a závisí na vznikajícím záření podle vztahu:

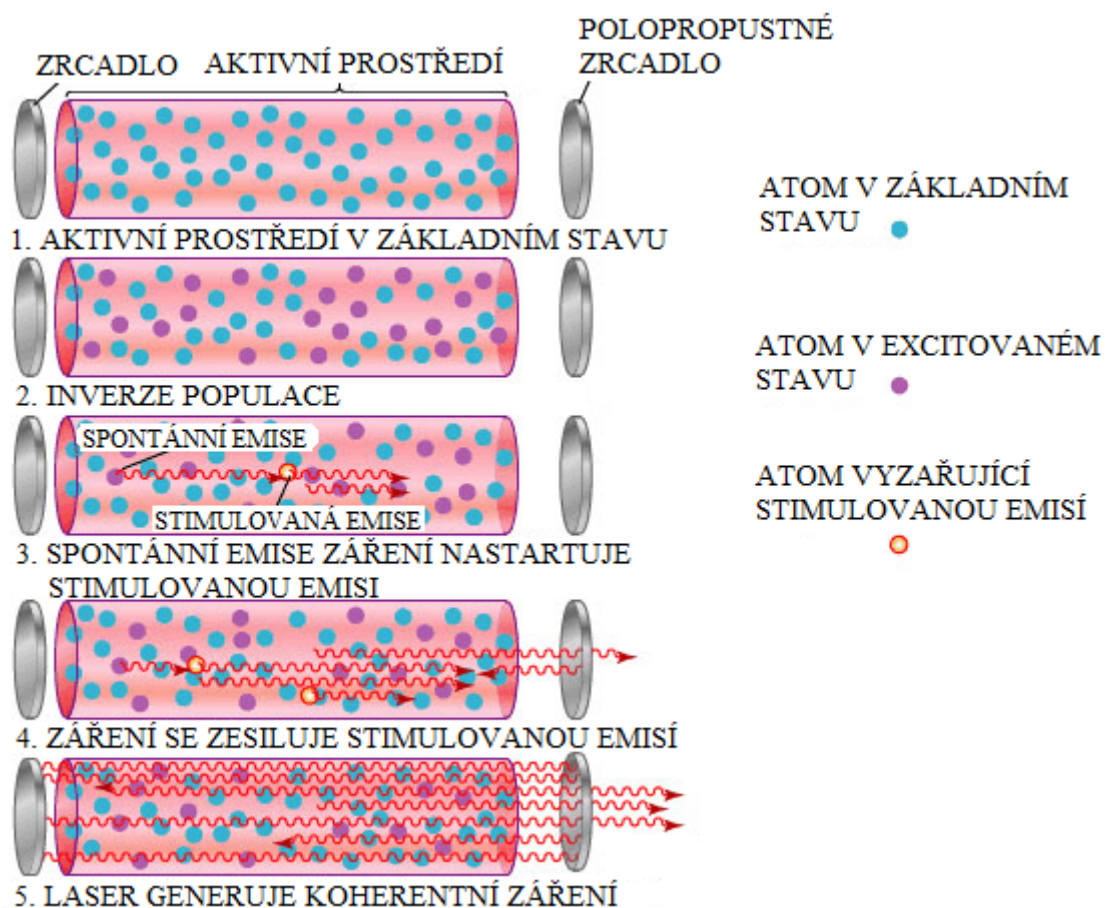
$$L = n \cdot \lambda \quad (1.2)$$

kde:

L – vzdálenost zrcadel [mm],

n – přirozené číslo [-],

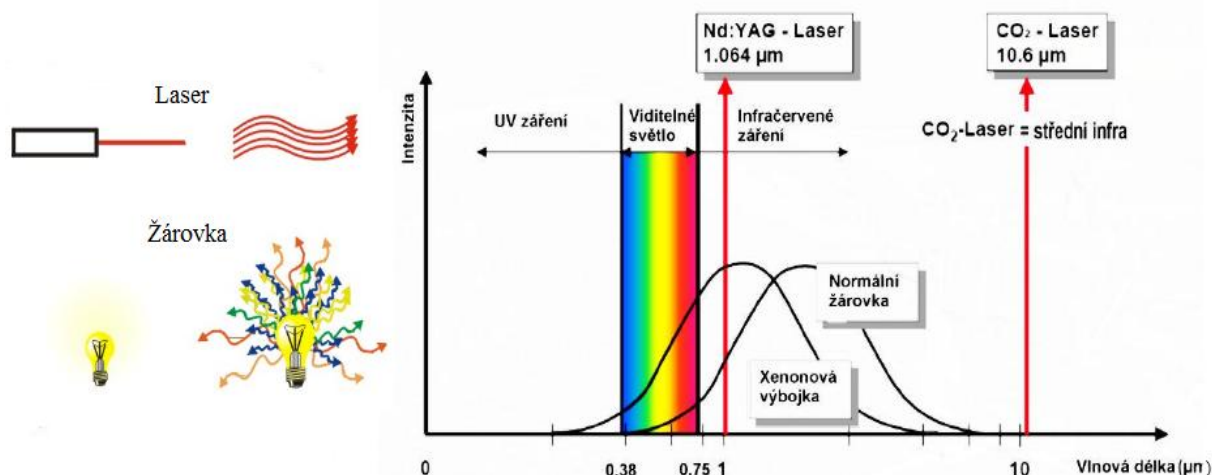
λ – vlnová délka záření [mm].



Obr. 1.2 Základní princip laseru [40]

1.2 Vlastnosti laserového záření [2], [3], [14], [19], [21], [32]

Laserové záření oproti elektromagnetickému záření, které vzniklo jiným způsobem, spočívá v řadě jeho vlastností. Mezi nejdůležitější vlastnosti patří monochromaticnost, koherentnost, směrovost a módová struktura. Porovnání emisí záření běžného světelného zdroje (výbojky a žárovky, které mají neuspořádané záření) a laseru (uspořádané záření) je na obr. 1.3.



Obr. 1.3 Porovnání emisí a elektromagnetického záření [19], [21]

Monochromaticita

Monochromaticita vyplývá z podstaty jevu stimulované emise. Paprsek je v ideálním případě tvořený výhradně fotony stejné vlnové délky. Reálné generátory splňují tuto podmínku s velmi malými odchylkami.

Koherentnost

Fotony laserového záření emitované z různých míst aktivního prostředí jsou sfázované (uspořádané) a mají stejný směr.

Směrovost

Jedinečností laserového paprsku je jeho velká směrovost, neboli nízká rozbíhavost (divergence). Směrovost je charakterizována prostorovým úhlem. V praxi se však jako parametr neuvádí prostorový úhel, ale rovinný úhel divergence paprsku, jestliže má prostorový úhel tvar kužele (v případě jiného tvaru paprsku se uvádějí hodnoty dvou rovinných úhlů navzájem kolmých na sebe).

Obecně lze určit velikost divergence Θ jako závislost na vlnové délce a výstupního průměru paprsku podle vztahu:

$$\Theta = \frac{4 \cdot \lambda}{\pi \cdot d_m} \quad (1.3)$$

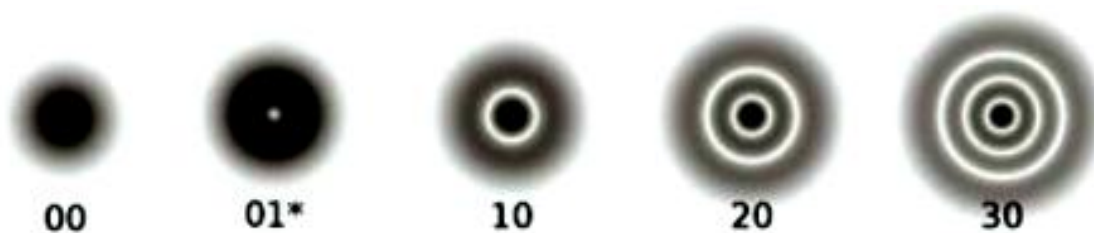
kde:

π – Ludolfovo číslo [-],

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

Módová struktura

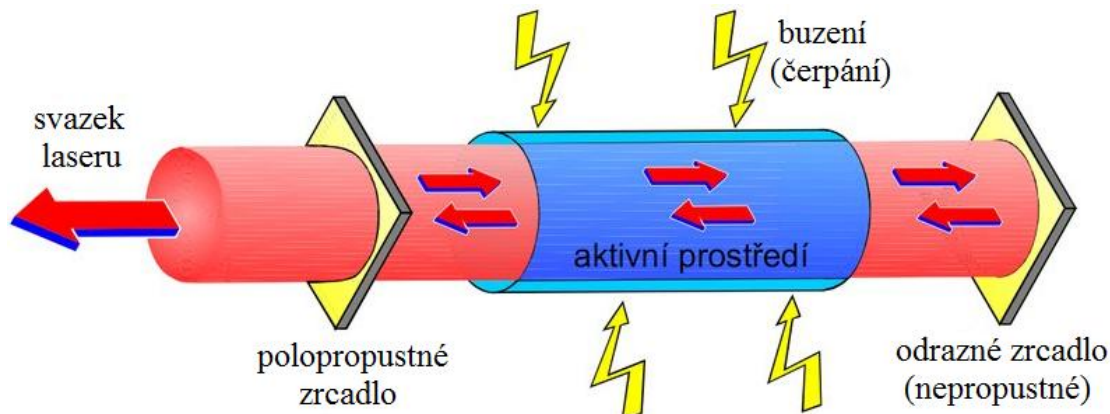
V optickém rezonátoru existuje elektromagnetické pole, které rozděluje amplitudu a fázi vlnění vznikajícího v rezonátoru. Toto částečné rozdělení pole ovlivňuje příčný elektromagnetický mód (TEM) pasivního rezonátoru. Čím vyšší je hodnota indexů, tím vyšší je řád módu. Některé typy módů jsou na obr. 1.4. Mód má velký vliv na velikost stopy zaostřeného paprsku.



Obr. 1.4 Elektromagnetické módy TEM_{00} , TEM_{01*} , TEM_{10} , TEM_{20} , TEM_{30} [3]

1.3 Základní součásti laseru [14], [40]

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 (často zabudován do opláštění systému). Optický rezonátor je délka mezi dvěma zrcadly (obr. 1.5).



Obr. 1.5 Schéma optického rezonátoru [40]

1.4 Interakce laserového paprsku s materiálem [2], [35]

Nejdůležitějším předpokladem pro efektivní využití laserového paprsku pro zpracování materiálů je absorpce záření tímto materiálem a následná přeměna na teplo. Účinné pohlcení a změna světelné energie na tepelnou se v praxi ukazuje jako důležitý ukazatel zejména při zpracování kovů. Pro oblasti nízkých intenzit (do $10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$) závisí koeficient odrazu (reflexe) zejména na elektrických vlastnostech kovu. Optické vlastnosti látek jsou materiálovou charakteristikou a jsou závislé na parametrech laserového paprsku.

Vliv na interakci laserového paprsku má laserový paprsek i obráběný materiál (především jeho stav povrchu). U hladkých a lesklých povrchů je nízká absorpce energie paprsku (důsledkem odrazivosti paprsku od povrchu materiálu). Paprsek při dopadu na materiál je částečně absorbován, částečně prochází a částečně je odražen (obr. 1.6). Důsledkem vzrůstu teploty vzroste i absorpce, protože elektrická vodivost kovů klesá. Obecně platí, že se zvyšováním vlnové délky koeficient záření absorpce klesá.



Obr. 1.6 Interakce laserového paprsku s materiálem [35]

1.5 Rozdělení laserů [14]

Lasery lze rozdělit na základě různých hledisek. Nejčastější rozdělení jsou podle aktivního prostředí, vlnové délky, pracovního režimu, způsobu buzení, výkonu, účelu a dalších parametrů.

Rozdělení tří základních způsobů laserů:

a) podle typu aktivního prostředí:

- plynové – atomární (He-Ne, He-Cd, Cu, I),
 - iontové (Ar, Kr),
 - molekulární (CO₂, N₂, H₂),
 - excimerové (XeBr, KrO, ArO),
- pevnolátkové (Nd:YAG, Nd:sklo, Er:YAG, Yb:YAG, Ti:safir, rubínový),
- polovodičové/diodové (GaAs, GaN, PbSnSe, InAsSb),
- kapalinové (coumarin, fluorescein, cyanin, rhodamin, oxazine),

b) podle vlnové délky:

- infračervené (780 nm – 1 mm),
- emitující ve viditelné oblasti (360 – 780) nm,
- ultrafialové (10 – 360) nm,

c) podle režimu:

- kontinuální (nepřetržitá generace záření),
- pulzní (pulzy s vysokou opakovací frekvencí),
- impulzní (vysoce energetické pulzy s nízkou opakovací frekvencí).

1.5.1 Plynové lasery [5], [14], [17], [31], [32]

Aktivní prostředí plynových laserů tvoří atomy, ionty, molekuly či jejich směsi v plynné fázi, přičemž inverze obsazení nastává mezi energetickými hladinami některé složky. Plynové lasery pracují převážně v kontinuálním režimu, ale existují i výkonné pulzní systémy. Pro buzení se používá široká škála fyzikálních a fyzikálně chemických procesů. K nejvíce používaným patří buzení pomocí elektrického výboje ve zředěném plynu, ale efektivně se používá také příčné buzení elektrickým výbojem za vysokých tlaků (TEA CO₂ – laser). Dále se používá buzení elektronovým svazkem, chemickou reakcí nebo expanzí horkého plynu. Optické buzení se používá velmi málo. Velkou výhodou plynových laserů je vysoká účinnost. Hlavní nevýhodou většiny plynových laserů je malý výkon, který lze získat z jednotky objemu aktivního prostředí (výkonné lasery jsou značně rozměrné). Donedávna nejrozšířenější a zároveň prvním vyrobeným plynovým laserem je červeně zářící atomární He-Ne laser. V průmyslu a v medicíně je nejvíce používaný CO₂ laser.

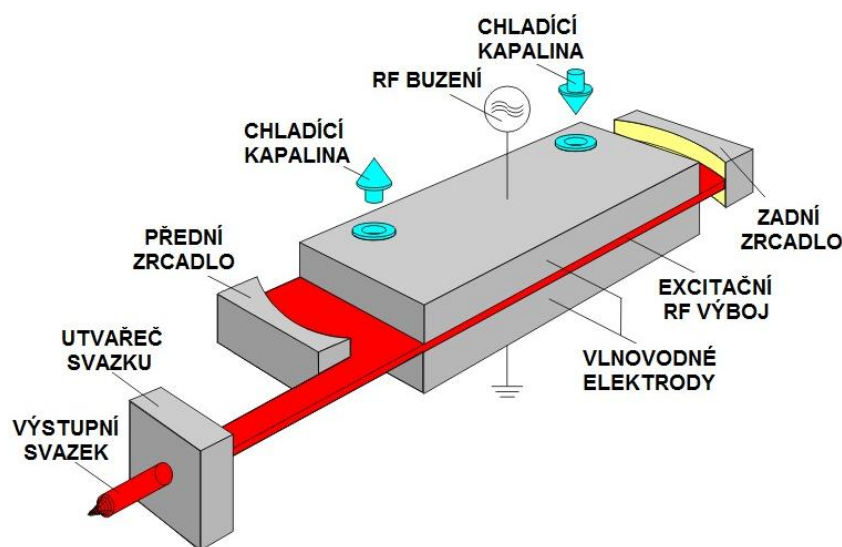
CO₂ lasery

Aktivním prostředím CO₂ laserů jsou molekuly oxidu uhličitého, které jsou buzené doutnavým elektrickým výbojem. Tyto lasery generují vlnovou délku 10,6 μm a jsou schopny dosáhnout výstupního výkonu až 20 kW, proto patří k nejvýkonnějším typům laserů vůbec. Účinnost CO₂ laserů se pohybuje okolo 10 %. Nevýhodou těchto laserů je, že oproti pevnolátkovým a diodovým laserům, nemohou vést výstupní paprsek od jeho zdroje k místu

užití optickým vláknem, ale je nutno paprsek do místa určení dopravit systémem zrcadel. Pro provoz laserů je nutná dodávka chladicí kapaliny a pracovních plynů (helia, dusíku a oxidu uhličitého). Zařízení CO₂ laserů je velmi složité a provozně náročné, a proto vyžaduje nepřetržitou kontrolu a údržbu.

Difuzně chlazený deskový (slab) laser

Nejnovějším typem CO₂ laseru je difuzně chlazený deskový (slab) laser (obr. 1.7). Tento laser nepotřebuje souvisle vnější zdroj plynové směsi, protože obsahuje zásobník, jehož objem 10 l je dostatečný pro přibližně rok nepřetržitého provozu. Díky tomu se značně redukuje náklady na údržbu i servis. K odvodu tepla dochází jeho rozptylem na vodou chlazených vysokofrekvenčních elektrodách.



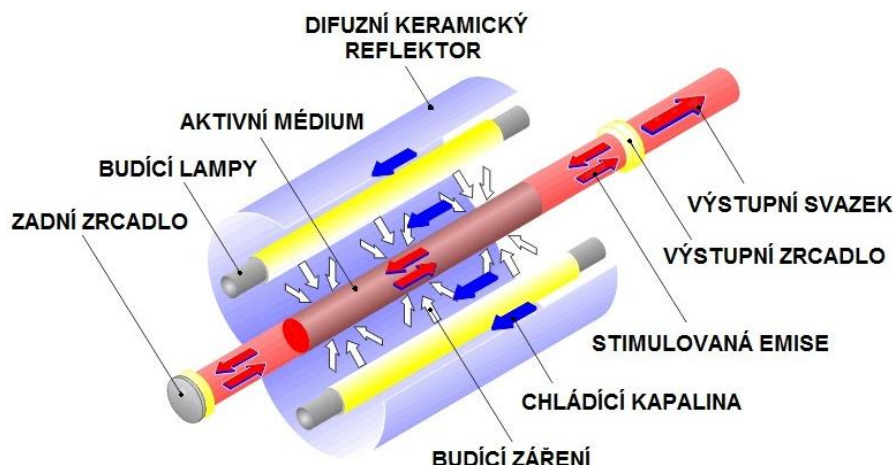
Obr. 1.7 Schéma deskového (slab) CO₂ laseru [5]

1.5.2 Pevnolátkové lasery [5], [17], [32], [33]

Do této skupiny laserů lze zařadit všechny lasery, jejichž aktivní prostředí se nachází v pevném stavu. Poté může následovat další dělení podle vodivosti aktivního prostředí na polovodičové lasery a lasery, jejichž aktivní prostředí tvoří izolanty. Základním materiálem, který určuje většinu vlastností daného krystalu, je u pevnolátkových laserů matrice, která musí být průhledná, opticky homogenní a musí být technologicky možné ji uměle vyrábět. Nejrozšířenějším a dnes nejlépe technicky zvládnutým je laser označovaný jako Nd:YAG. Pevnolátkové lasery jsou schopny pracovat ve všech možných režimech a jsou velmi flexibilní. Nesporná výhoda pevnolátkových laserů oproti jiným typům laserů spočívá v robustnosti, stabilitě a v malých nárocích na údržbu a provozní podmínky.

Nd:YAG laser

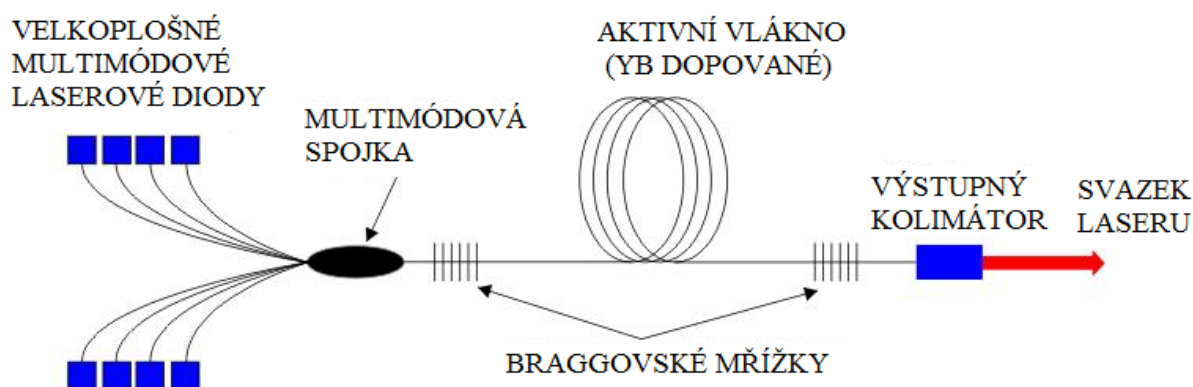
Nd:YAG laser je pevnolátkový laser a patří svou nabídkou k nejpoužívanějším typům průmyslových laserů (obr. 1.8). Jeho aktivním prostředím je Nd:YAG krystal (yttrium-aluminium granát dopovaný neodymem Nd³⁺). Neodym září na vlnové délce 1 064 nm, tedy desetkrát menší než je vlnová délka CO₂ laseru. S použitím nelineární optiky je schopen generovat záření na vlnové délce 532 nm. Nd:YAG lasery jsou používány k laserovému obrábění, vrtání a svařování.



Obr. 1.8 Schéma Nd:YAG laseru [5]

Vláknové lasery

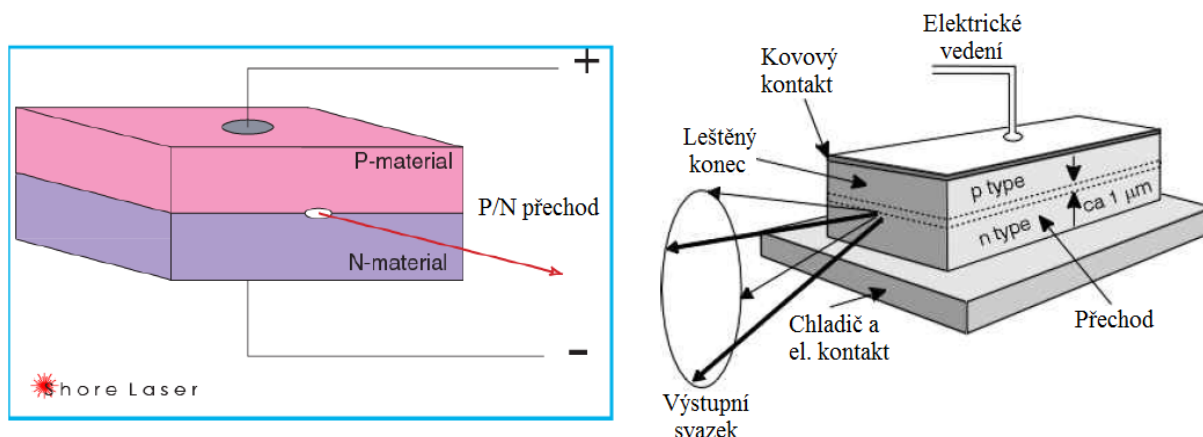
Vláknový laser představuje technologicky nejmodernější typ pevnolátkového laseru. Aktivním prostředím vláknových laserů je křemikové vlákno s průměrem jádra několik mikrometrů a délkou několik metrů, dopované ionty (Yb, Er nebo Tm), které se ve formě malých částic přimísí do jádra během výroby. Hlavní absorpční čáry těchto dopantů spadají do emisních pásů laserových diod (čerpání laserovými diodami vysoce účinné). Pro čerpání se používají nízkovýkonné polovodičové laserové diody. Rezonátor tvoří Braggovy mřížky na koncích vlákna. Princip vláknového laseru je na obr. 1.9.



Obr. 1.9 Schéma vláknového laseru [5]

1.5.3 Polovodičové lasery [14], [17], [32]

Polovodičové lasery jsou dnes vůbec nejrozšířenější lasery. Většinou se pro ně používá označení laserová dioda (obr. 1.10). Od ostatních laserů se liší tím, že nepracují s přechodem mezi diskrétními hladinami, nýbrž se u nich vyskytují elektronové přechody mezi vodivostním a valenčním pásem polovodiče. Aktivním prostředím polovodičových laserů je polovodičový materiál, ve kterém jsou aktivními částicemi nerovnovážné elektrony a díry, tj. volné nosiče náboje, které mohou být injektovány. Hlavní výhodou je vysoká kompaktnost, nízká hmotnost a především vysoká účinnost (až 50 %), možnost spektrálního přeladění v širokém spektrálním pásmu a pomocí výběru aktivního prostředí generace záření vlnových délek (0,3 – 30) μm . Nevýhodou je rozbíhavost generovaného záření a velká závislost parametrů generovaného záření na teplotě aktivního polovodičového materiálu.

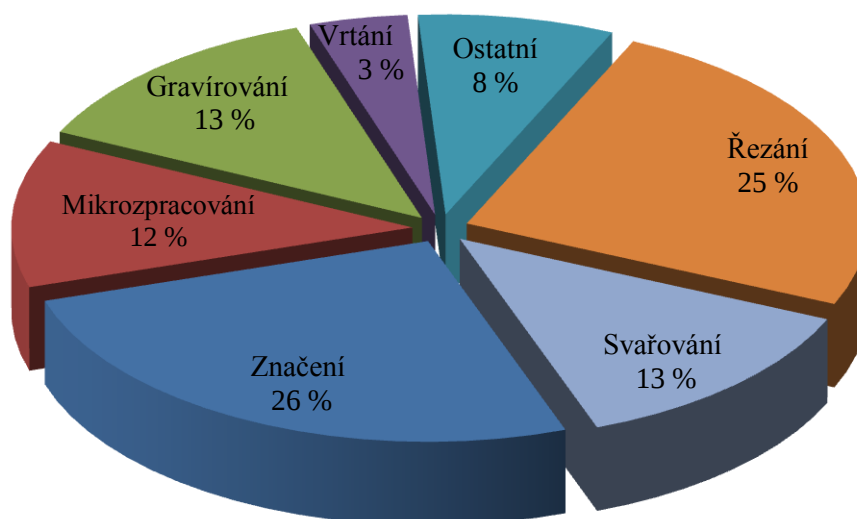


Obr. 1.10 Schéma laserové diody [14]

1.6 Využití laseru v průmyslu [14], [15], [33]

Laser se stal nepostradatelným nástrojem nejen vědy a výzkumu, ale především řady odvětví průmyslu, medicíny, ale i běžného života většiny členů moderní společnosti. Většina lidí se pravděpodobně potkala s nějakým zařízením využívající laserové záření nebo produktem vyrobeným za použití laseru.

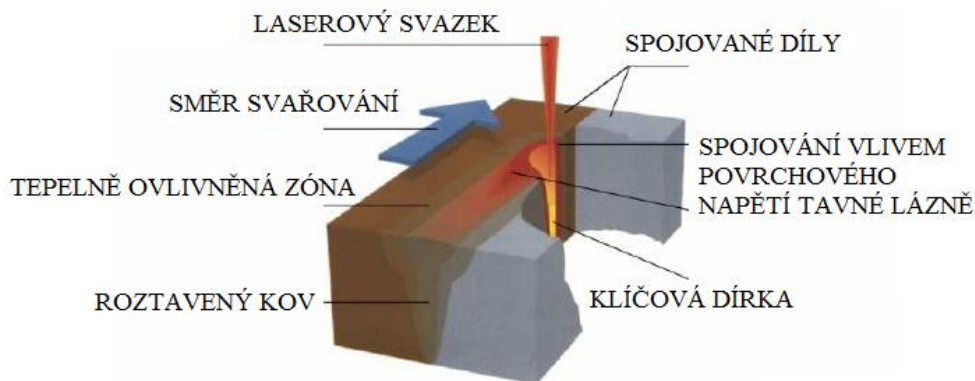
Vlastnosti laseru umožňují široké technologické využití laseru (laserové řezání, vrtání, sváření, kalení, gravírování, využití laserů v mikroelektronice a popisu materiálů laserem). Výhoda laserů je v univerzálnosti technologického zařízení. Jediným laserem je možno změnou geometrie ozařování, volbou časových prodlev a použitím nutných periferních přípravků provádět všechny tepelné úpravy (řezání, sváření, kalení, popouštění, cementování a nitridování). Využití laserů v průmyslu je na obr. 1.11.



Obr. 1.11 Graf využití laserů v průmyslu [15]

2 TECHNOLOGIE SVAŘOVÁNÍ LASEREM [2], [13], [19]

Svařování patří mezi náročné aplikace laserového paprsku a svařované spoje musí splňovat náročné požadavky na minimální deformaci, celistvost spojů a mechanické vlastnosti apod. Přitom se zpravidla požaduje co nejúžší a nejhlubší závar při daném výkonu. Princip svařování laserem metodou keyhole je na obr. 2.1.



Obr. 2.1 Princip svařování laserem metodou keyhole [19]

Tab. 2.1 Porovnání parametrů s ostatními metodami svařování [13]

Metoda svařování	Hustota energie [$\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$]	Hloubka průvaru [mm]	Šířka/hloubka svaru	Svařovací rychlost [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]
Laser	$10^7 - 10^9$	25	0,1 – 0,5	až 10
Plamen	10^3	3	3	0,01
El. oblouk	10^4	4	2	0,5 – 3
Plazma	10^6	až 12	1	0,5 – 5
El. paprsek	10^8	200	0,03	0,5 – 5

2.1 Mechanismus svařování laserem [16]

Při interakci laserového záření s povrchem kovového materiálu dochází postupně k několika procesům. V první fázi může dojít k významné reflexi laserového záření. Část vyzářeného tepla je absorbována povrchem materiálu a dochází k nárůstu teploty. Tento proces může ve výsledku způsobit lokální natavení nebo odpaření materiálu. Laserové svařování rozdělujeme na dva typy:

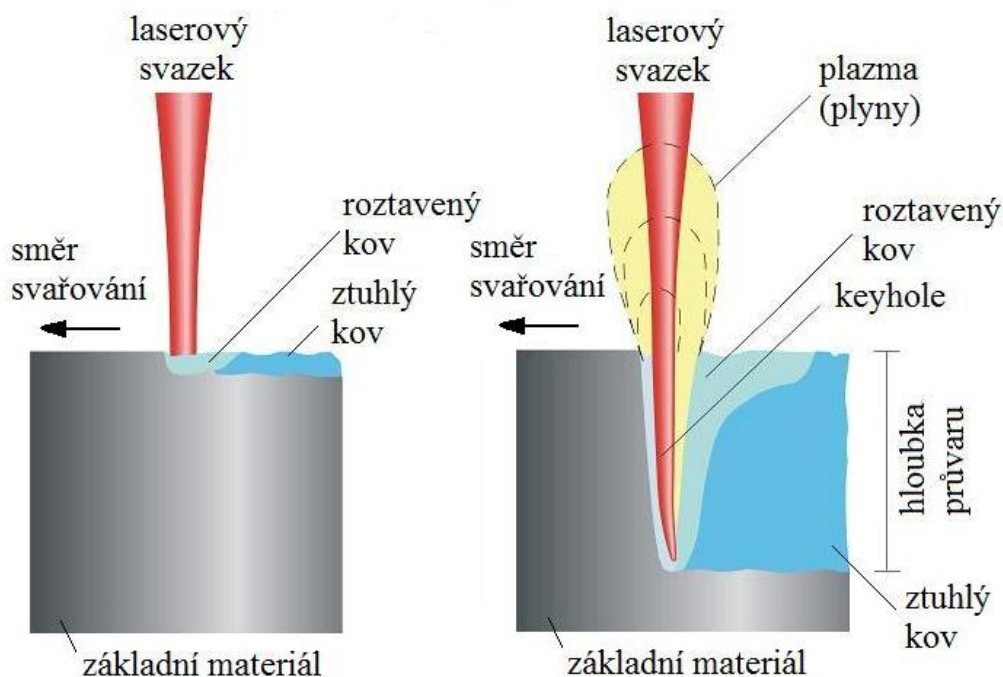
- kondukční svařování,
- penetrační svařování (keyhole).

2.1.1 Kondukční svařování [12], [16]

Kondukční svařování (obr. 2.2) se obvykle provádí pro hustoty výkonu menší než $10^6 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, kdy dochází jen k minimálnímu odpaření materiálu. Energie se při kondukčním svařování dostává do materiálu pouze kondukcí tepla, proto je hloubka svaru pouze několik desetin milimetru až 1 milimetr. Tepelná vodivost materiálu omezuje maximální hloubku svaru a šířka svaru je vždy větší než hloubka svaru. Laser vytváří hladký zaoblený svar. Svarový spoj kondukčního svařování v porovnání s penetračním svařováním má menší hloubku penetrace a větší tepelně ovlivněnou oblast (TOO).

2.1.2 Penetrační svařování [6], [16], [19]

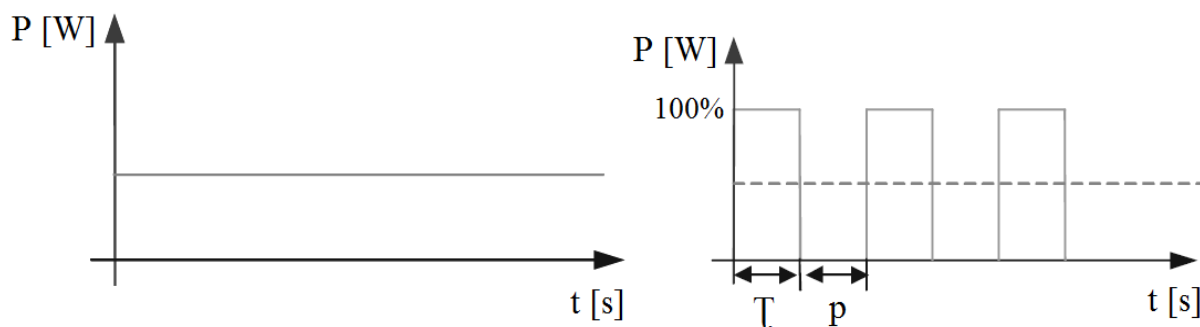
Pro penetrační svařování (obr. 2.2) jsou potřebné hustoty výkonu laserového záření nad $10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$. Laserový paprsek taví kov, ale vytváří také páru. Vytvoří se hluboký, úzký otvor naplněný párou: kapilára vyplněná párou – nazývaná také keyhole (klíčová dírka). Kapilára vyplněná párou je obklopena roztaveným kovem, který obtéká kapiláru a na zadní straně tuhne. Tímto způsobem je vytvořen úzký, hluboký svar se stejnoměrnou strukturou. Tavenina laserový paprsek téměř úplně absorbuje, proto je účinnost procesu svařování vysoká. Hloubka svaru je až desetkrát větší než šířka svaru a může být až 25 milimetrů. Penetrační svařování se vyznačuje vysokou rychlostí svařování, proto je malá tepelně ovlivněná oblast a nepatrná deformace.



Obr. 2.2 Porovnání indukčního a penetračního svařování [19]

2.2 Parametry svařování [2], [35]

Parametry svařování jednoznačně ovlivňují kvalitu svaru. Tyto parametry podmiňují efektivnost využití laseru na technologické procesy. Při svařování laserem rozlišujeme dva režimy svařování – kontinuální a pulzní (obr. 2.3).



Obr. 2.3 Průběh výkonu laseru při kontinuálním a pulzním režimu (T – délka pulzu, p – prodleva) [35]

2.2.1 Kontinuální režim [2], [22], [35]

Mezi parametry kontinuálního režimu svařování patří:

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

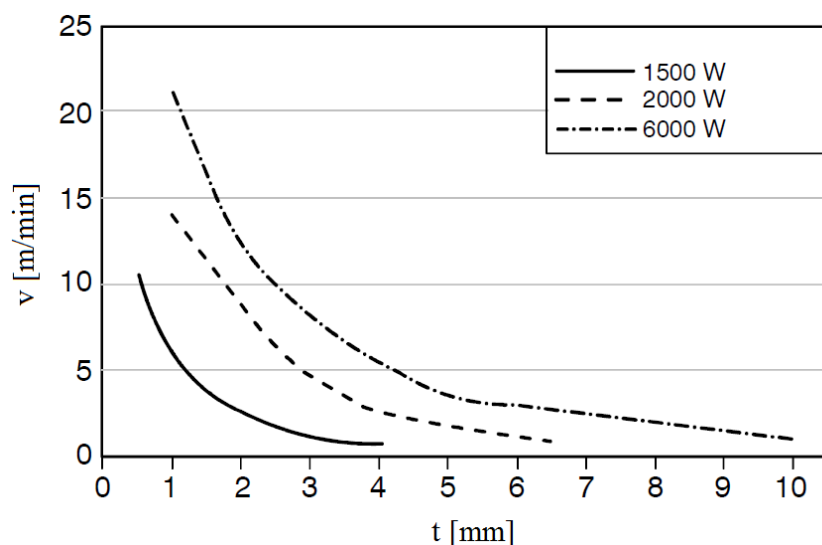
Výkon laseru

Velikost výkonu ovlivňuje schopnost protavení (čím větší tloušťka materiálu, tím vyšší jsou laserové výkony potřebné ke svaření). Zvyšováním výkonu laseru se zvětšuje hloubka a šířka svaru. Přechodem od jednoho modelu laseru k druhému se může optimální hodnota potřebného výkonu změnit.

Rychlost svařování

Označuje dráhu, kterou urazí zdroj ohřevu v kontaktu s materiálem za jednotku času. Při konstantní hodnotě výkonu rychlost svařování charakterizuje množství energie vnesené do materiálu. Rozložení teploty v materiálu je ovlivněno rychlostí svařování. Na rychlosti svařování závisí geometrie svaru, struktura, vlastnosti a chemické složení materiálu v teplem ovlivněné oblasti. Rychlost svařování výrazně ovlivňuje šířku i hloubku svaru. Zvyšováním rychlosti svařování se snižuje hloubka i šířka provaření a zmenšuje se velikost deformace.

Rychlosti svařování a tloušťka svařování v závislosti na laserovém výkonu je na obr. 2.4.



Obr. 2.4 Graf rychlosti svařování a tloušťky svařování v závislosti na výkonu (v – rychlost svařování, t – tloušťka svařovaného materiálu) [35]

Parametry fokusačního systému jsou charakterizované:

- průměrem zaostřeného paprsku,
- polohou ohniska od povrchu materiálu,
- divergencí paprsku.

Sekundární parametry:

- vnesené teplo – vyjadřuje energii použitou na jednotku délky $Q = P/v$ [$\text{J} \cdot \text{m}^{-1}$],
- hustotu výkonu – působení výkonu paprsku na plochu I [$\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$],
- ochranný plyn (druh a průtok).

2.2.2 Pulzní režim [2]

V pulzním režimu svařování jsou základními parametry svařování:

- energie pulzu E [J],
- maximální výkon pulzu $P_{\max}$ [W],
- délka pulzu τ [s],
- frekvence pulzu f [Hz],
- průměr zaostřeného paprsku d [mm],
- vzdálenost ohniska od povrchu materiálu s [mm],
- rychlost svařování v [mm·s⁻¹].

Energie pulzu

Je to základní energetická charakteristika v podstatné míře ovlivňující proces svařování, v průběhu jednoho pulzu. Energie pulzu má zásadní vliv na množství vneseného tepla do materiálu.

Délka pulzu

Je to čas laserového paprsku působící na materiál. Určuje také čas, ve kterém proběhne ohřev a tavení kovu. Pro každý materiál a tloušťku existují optimální intervaly hodnot délek pulzu. Délka pulzu má vliv hlavně na geometrii a celistvost svaru. Svařovaný materiál je citlivý na rychlost ochlazování, která se dá regulovat tvarem pulzu.

Průměr zaostřeného paprsku

Při výběru velikosti zaostřeného paprsku uvažujeme vztah mezi plochou ohřevu a hustotou výkonu. Pro svařování se používají průměry zaostřeného paprsku v rozmezí hodnot 0,05 až 1 mm. Pro regulaci intenzity záření se používá vzdálenost ohniska od povrchu materiálu.

2.3 Příprava svarových ploch [2]

Při svařování laserem energie laserového paprsku je absorbována povrchem materiálu a proniká do hloubky tepelným vedením. Při laserovém svařování závisí především na přesném a vzájemném uložení svařovaných dílů a na kvalitě povrchu materiálů.

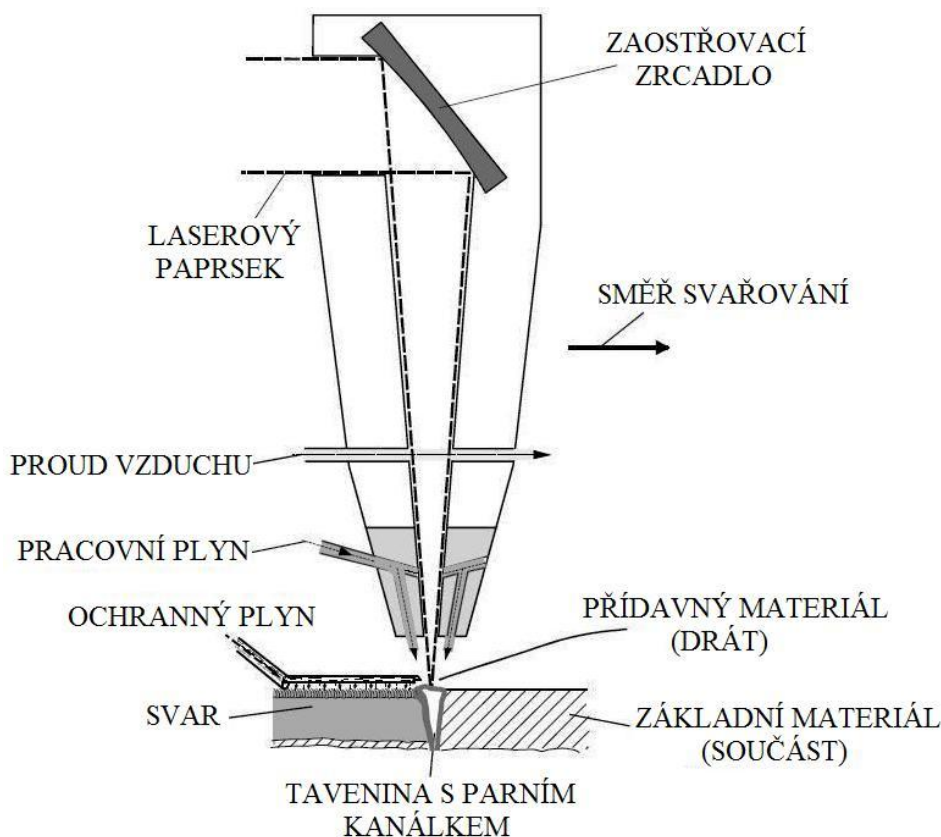
U tupého svaru je vhodné, aby svarové plochy materiálů byly v těsném kontaktu a ve stejné výšce, aby došlo k odevzdání tepelné energie do obou dvou částí svařovaných materiálů (ohřátí materiálů).

Na čistotu svarových ploch nejsou kladeny mimořádné požadavky. V případě snahy o zlepšení stavu povrchu materiálů je možné opracováním. Např. zoxidovaný povrch, který umožňuje vyšší absorpci paprsku. Výhodné mohou být i určité kovové povlaky na svařovaných materiálech. Zdrsněním povrchu dosáhneme zmenšení odrazu paprsku.

Při svařování speciálních materiálů a vysokých požadavcích na kvalitu svaru je důležité, aby povrchy svarových ploch byly zbaveny oxidů a nečistot.

2.4 Ochranné plyny při svařování laserem [26], [35]

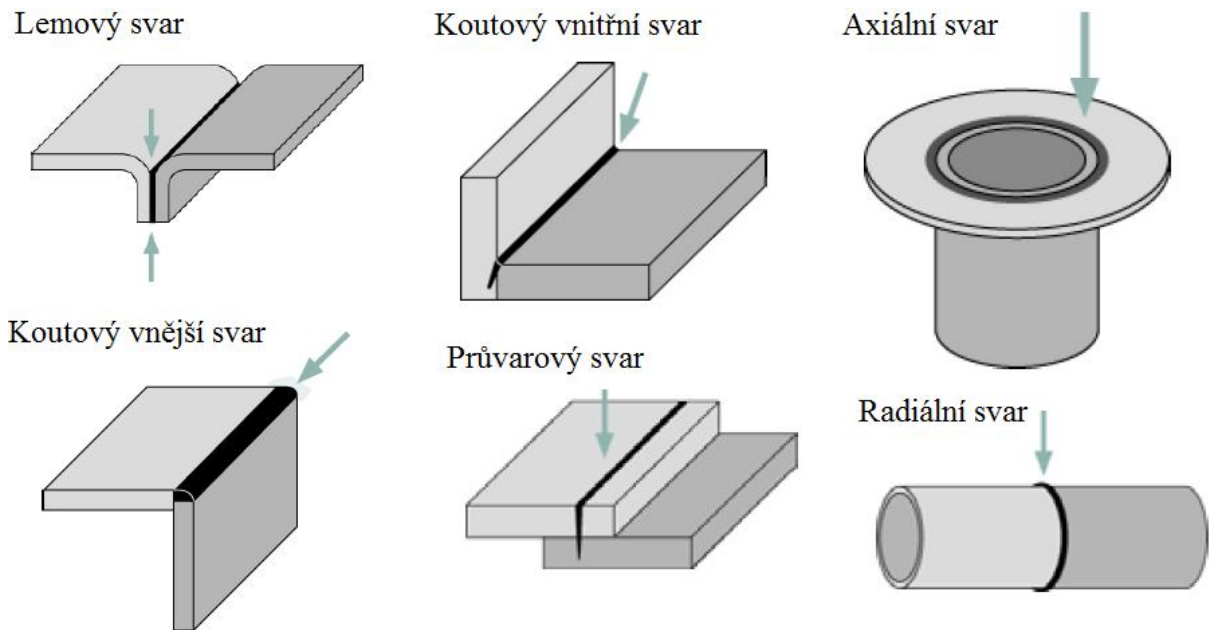
Ochranný plyn plní několik důležitých funkcí. Hlavní úkol ochranného plynu je ochrana svařovaného materiálu před okolní atmosférou. Snahou je zabránit absorpci kyslíku, dusíku, vlhkosti a následné oxidaci povrchu. Další úkol ochranného plynu je, že zajišťuje stálé odstraňování plazmy vystupující nad svařenec. Základem směsi ochranných plynů je hélium a argon. Přidáním CO_2 , kyslíku nebo vodíku je možné ovlivnit svařovací proces metalurgicky a termicky. Jako ochranný plyn se podle materiálů používají argon, hélium, dusík a směsi plynů, které byly zmíněny. Způsob přívodu ochranného plynu u laserové svařovací hlavy je na obr. 2.5.



Obr. 2.5 Přívod ochranného plynu u laserové svařovací hlavy [35]

2.5 Typy svarů [13], [35]

Při svařování laserem lze vytvářet všechny základní typy svarů (některé typy – obr. 2.6), které se vytvářejí i ostatními technologiemi. Svary vytvořené laserem mají řadu výhod (viz kapitola 2.6). Jeden typ svaru je možno provést kvalitně pouze dvěma metodami – laserem a elektronovým svazkem. Je to svařování přeplátováním materiálů (průvarový svar), kdy laser je schopen provařit dva i více materiálů položených nad sebe (tloušťky a typy materiálů mohou být odlišné). Při tomto svařování lze dosáhnout toho, že průvar nepronikne spodním materiálem zcela, ale jen do určité hloubky (spodní strana je povrchově nedotčená).



Obr. 2.6 Typy svarů [35]

2.6 Výhody a nevýhody svařování laserem [17], [19]

Výhody laserového svařování:

- vysoká kvalita a čistota svaru,
- vysoká svařovací rychlost,
- svařování různých materiálů s různou tloušťkou,
- svařování bez přídavného materiálu,
- malá tepelně ovlivněná oblast,
- malé vnesené teplo,
- úzký a hluboký průvar (průvarové svary),
- malé deformace materiálů,
- proces může být vysoce automatizovaný,
- vysoká flexibilita procesu svařování,
- bezkontaktní svařování,
- svařování na vzduchu pouze s použitím ochranné atmosféry,
- vysoká produktivita a progresivita.

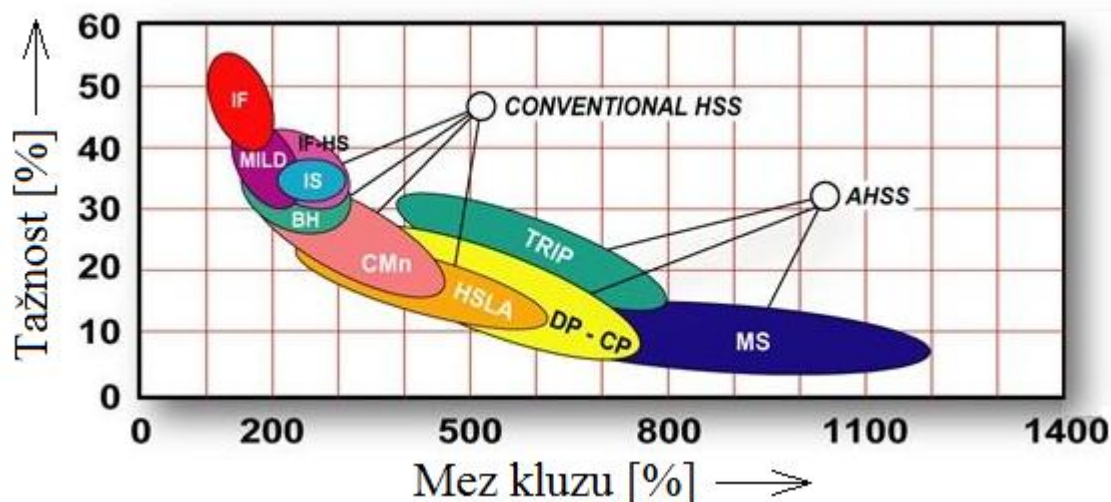
Nevýhody laserového svařování:

- vysoké pořizovací náklady na svařovací zařízení,
- složité přípravkování,
- vysoké nároky na bezpečnost.

3 OCELI VYŠŠÍ PEVNOSTI [1], [42]

Pro rozdělení ocelí s vyšší pevností je základním hlediskem mez kluzu. Do skupiny ocelí s vyšší mezí kluzu patří oceli, které mají mez kluzu větší než 300 MPa. Mez kluzu se u vysokopevnostních ocelí pohybuje v intervalu od 300 MPa až 1200 MPa (obr. 3.1). Další dělení těchto ocelí je podle jejich chemického složení a způsobu výroby.

Tyto materiály jsou používány v karoseriích automobilů a musí mít celou řadu důležitých vlastností. Materiály musí být pevné, schopné absorbovat energii při srážce, odolné proti rázu, svařitelné různými způsoby svařování, tvárné za studena, hlubokotažné, korozivzdorné, dobře lakovatelné a další. Jeden materiál není schopen splnit tyto protichůdné požadavky, a proto se používají kombinace více druhů materiálů nebo více typů jednoho materiálu.



Obr. 3.1 Závislost meze kluzu na tažnosti vybraných druhů ocelí [1]

HSS (high strength steel) – vysokopevnostní oceli (s vyšší mezí kluzu).

AHSS (advanced high strength steel) – vysokopevnostní oceli (s velmi vysokou mezí kluzu).

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.

BH (bake hardened steel) – vysokopevná ocel, u níž je zvýšení pevnosti výsledkem kombinace deformace a stárnutí.

HSLA (high strength low alloy steel) – ocel obsahující mikrolegující prvky (Ti, V nebo Nb), které zvyšují pevnost řízením velikosti zrna a rovněž precipitačně zpevňují strukturu.

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

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

TRIP (transformation induced plasticity) – ocel s multifázovou strukturou obsahující 50 až 60 % feritu, 25 až 40 % bainitu a 5 až 15 % zbytkového austenitu, který je při 20 °C nestabilní a při deformaci může transformovat na martenzit.

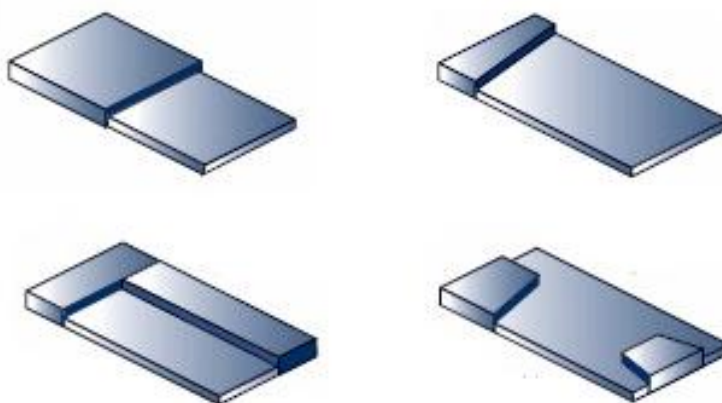
MS (martensitic steel) – ocel, ve které se struktura v průběhu zpracování téměř úplně přeměnila na tvrdý martenzit.

TWIP (twinning induced plasticity) – skupina uhlíkových ocelí na bázi FeMnAlC (0,5 až 0,7 % C, 17 až 24 % Mn, 9 % Al), které obsahují austenickou strukturu při všech teplotách, ve kterých je základním deformačním mechanismem dvojčatění.

4 TAILORED BLANKS [18], [34], [36]

Pojem tailored blanks lze přeložit jako přístřihy vyráběné na míru. Metoda je schopna svařovat dva i více materiálů s rozdílnými vlastnostmi, které jsou následně lisovány do finálního tvaru (obr. 4.2). Technologie tailored blanks se zabývá výrobou karoserií automobilů a cílem této technologie je snížení hmotností a nákladů na výrobu této karoserie a zvýšení bezpečnosti pasažérů. Při této technologii jsou svařeny materiály vysokopevnostní oceli v kombinaci s ocelmi s nižší pevností. Materiály mohou mít rozdílnou pevnost, rozdílnou povrchovou úpravu nebo rozdílnou tloušťku (obr. 4.1).

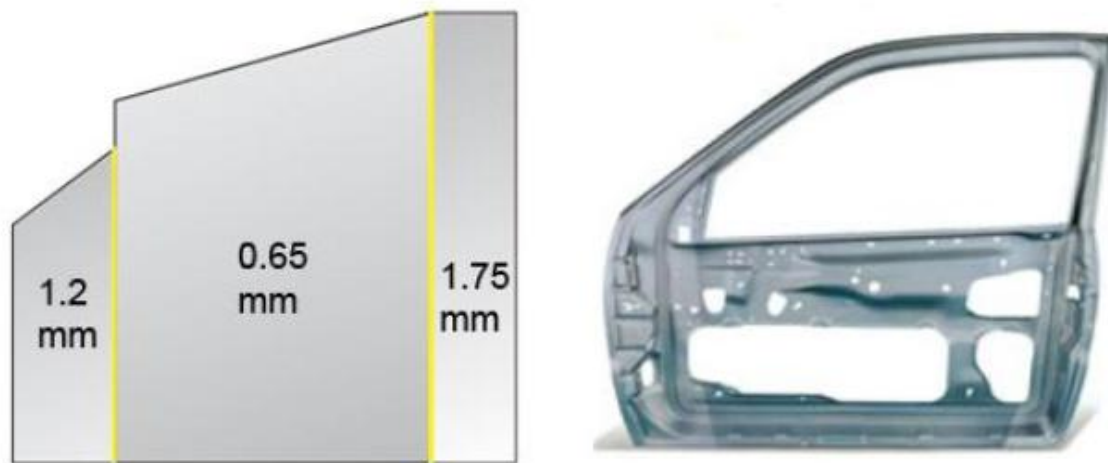
Při výrobě se používá švové svařování nebo svařování laserovým paprskem (výhodnější technologie). Výhodou je, že laser vytváří velmi malou tepelně ovlivněnou oblast. Další výhodou je, že technologie vytváří svary, u nichž svarová housenka nepřesahuje základní materiál (odpadají problémy vznikající při lisování švově svařených tailored blanks). Pro svařování se nejčastěji používají dva typy laserů (plynové nebo pevnolátkové).



Obr. 4.1 Základní typy svařování tailored blanks [34]

Při tváření se používají jak konvenční nástroje, tak nástroje speciálně vyvinuté pro lisování polotovarů tailored blanks. Nevýhodou použití klasickým nástrojů je, že dochází k neúplnému dosednutí přídržovače na tenčí část polotovaru, v jehož důsledku nebude vyvíjený přídržovací tlak dostatečně veliký, což může způsobovat problémy během procesu lisování (lomy a zvlnění).

Speciální nástroje byly vyvinuty s elastickým přídržovačem nebo děleným přídržovačem. Princip metody spočívá v tom, že elastický přídržovač během procesu přidržování dosedne na obě plochy plechu a dojde k jeho vytvarování podle tvaru polotovaru. Tím je zajištěno optimální přidržení obou polovin plechu. Druhou možností je použití nástrojů děleným přídržovačem, které umožňují nejlépe kompenzovat rozdílné tloušťky polotovaru. Jednotlivé části přídržovače jsou přizpůsobeny rozdílné tloušťce polotovaru a tím jsou obě části polotovaru optimálně přidržovány a nedochází tudíž k žádným problémům během lisovacího procesu. Výhoda je, že nástroje s děleným přídržovačem umožňují optimální nastavení přídržovací síly odděleně pro každý segment (při použití polotovaru z materiálu o rozdílné pevnosti). Speciální nástroje jsou v porovnání s konvenčními dražší.



Obr. 4.2 Segment před lisováním a po lisování [18]

Tailored blanks je velice perspektivní technologií, které se zejména v automobilovém průmyslu začíná využívat více. Použití v jiných oblastech průmyslu je omezeno nevýhodami.

Výhody technologie tailored blanks:

- snížení hmotnosti finálního dílu,
- snížení nákladů na materiál a odpadu materiálů,
- kombinování různé tloušťky materiálů,
- kombinování materiálů s rozdílnými vlastnostmi.

Nevýhody technologie tailored blanks:

- použití speciálních nástrojů (vysoká pořizovací cena),
- vysoké nároky procesu na technologické znalosti,
- vysoké náklady na provoz svařovacích laserů,
- vyšší nároky na používané stroje a nástroje.

5 ZKOUŠENÍ SVAROVÝCH SPOJŮ

Vady ve svarech je nutno považovat za nebezpečné napětí. Tyto vady mohou způsobit vznik křehkého lomu a tím následné vyřazení součásti z provozu.

5.1 Vady svarových spojů [8], [28], [35]

Zkoušení materiálů je velmi důležité, protože každý vyrobený materiál a vytvořený svar není nikdy bez vad. Vady zásadně ovlivňují vlastnosti kovového materiálu. Tyto vady obsahují všechny technicky vyrobené materiály, až na výjimky, které jsou vyrobené v laboratořích ve zvláštních podmínkách. Vadou výrobku se obecně rozumí každá odchylka od vlastností předepsaných technickými normami, technickými podmínkami případně smluvním vzorkem.

Vady výrobku mohou být zjevné nebo skryté. Zjevné vady se dají zjistit při prohlídce pouhým okem nebo jednoduchými pomůckami a skryté vady se obvykle zjišťují pomocí přístrojů nebo laboratorními zkouškami.

Rozdělení vad podle ustanovení příslušných předpisů:

- přípustné – odstranění není nutné, normy a technické podmínky je dovolují,
- nepřípustné – neodpovídají povoleným hodnotám (opravitelné nebo neopravitelné).

Defekty ve svarových spoích můžeme rozdělit na plošné (trhliny, neprůvary a studené spoje) a objemové (póry, bubliny, vměstky, nedodržení rozměrů a nepravidelnost povrchu svaru).

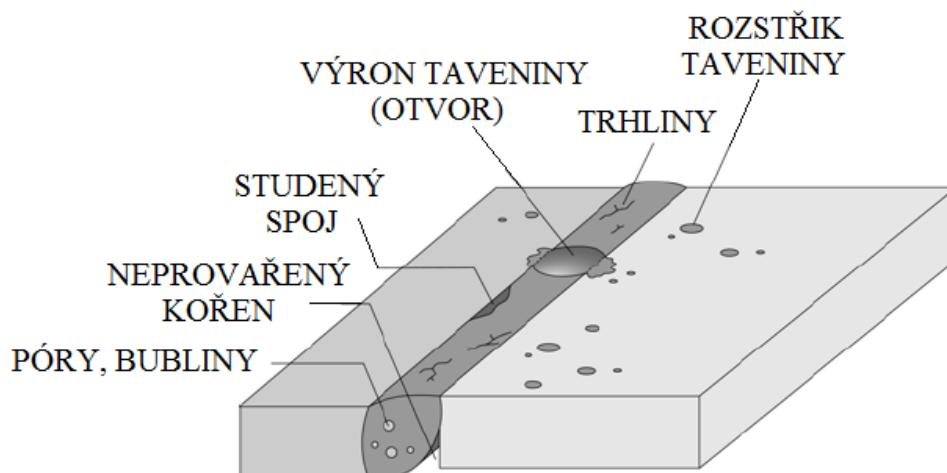
Vady svarů se rozdělují podle polohy vady ve svaru na:

- povrchové vady – nacházejí se na povrchu svaru,
- vnitřní vady – vyskytují se pod povrchem svaru.

Vady svarových spojů se rozdělují a číslovají podle charakteru v souladu s normou ČSN EN ISO 6520-1 na:

- trhliny (podélné, příčné, nespojité, kráterové, rozvětvenkové),
- dutiny (póry, bubliny, staženiny),
- vměstky (struskové, tavidlové, kovové, oxidické),
- vady tvaru a rozměru (zápaly, vruby mezi jednotlivými housenkami, vruby v kořeni, nadměrné převýšení svaru, neúplné vyplnění svaru, nepravidelná šířka, vadné napojení, atd.),
- studený spoj (není kovová vazba, materiál nebyl nataven),
- neprůvar (neprovařený kořen na některé straně),
- různé vady (rozstřík, vytržený povrch, vada stehu, brusné stopy).

Různé typy vad svaru při svařování laserem jsou na obr. 5.1.



Obr. 5.1 Vnější a vnitřní vady svaru při svařování laserem [35]

5.2 Hodnocení vad [8]

Pro hodnocení přípustnosti určitého typu vady se vychází z přístupu vhodnosti pro daný účel. V principu to znamená, že přípustná vada ovlivňuje nejvíce porušování křehkým lomem a únavové porušení (především trhliny – nejnebezpečnější). Hodnocení vychází z teorie lomové mechaniky. Hodnocení přípustnosti dalších vad ve svarech závisí na geometrii svařované konstrukce a jejím stavu napjatosti, dále typu, orientaci a velikosti vady. Mezi další ovlivňující faktory patří mechanické vlastnosti svarového spoje a prostředí namáhané konstrukce, ve kterém bude pracovat.

5.3 Nedestruktivní zkoušení svarů [8]

Nedestruktivní zkoušky svarů jsou nejrozšířenější skupinou zkoušek svarových spojů, protože výrobky se po zkoušce dají dále používat (svar není porušen). Nedestruktivními zkouškami v praxi nelze ověřit prokazatelně všechny užité vlastnosti svarových spojů (např. pevnost svarového spoje, odolnost proti cyklickému namáhání, plastické vlastnosti a podobné nelze spolehlivě určit z nedestruktivních zkoušek). Tyto zkoušky prokazují jen částečně dosažené užité vlastnosti svaru.

Rozdělení zkoušek dělíme podle toho, zda identifikujeme vady na povrchu svaru nebo uvnitř svaru.

Povrchové vady:

- vizuální metoda,
- penetrační (kapilární) zkouška,
- magnetická prášková zkouška.

Vnitřní vady se zjišťují metodami:

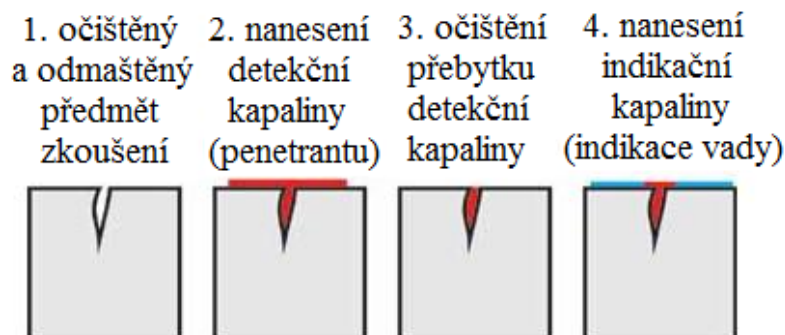
- ultrazvuková zkouška,
- prozařovací zkouška pomocí RTG.

5.3.1 Vizuální kontrola [8], [28]

Vizuální kontrola je nejjednodušší defektoskopickou kontrolou svarů, pomocí které se zjišťuje výskyt povrchových vad (trhliny, praskliny, koroze, atd.). Rozlišujeme kontroly podle přístupnosti kontrolovaného povrchu na vizuální kontrolu přímou (kontrola pouhým okem nebo lupou – zvětšení 3x až 6x) a vizuální kontrolu nepřímou (kontrola využívá dokonalejších optických přístrojů a zařízení – endoskopy, periskopy, televizní kamery). Při nepřímé kontrole rozeznáváme na povrchu materiálu detaily, které nejsou přímou vizuální zkouškou pozorovatelné (např. vnitřní povrch potrubí a nádob). Vizuální kontrola svarů je obecně popsána v normě ČSN EN 17637.

5.3.2 Kapilární (penetrační) zkouška [8], [28], [41]

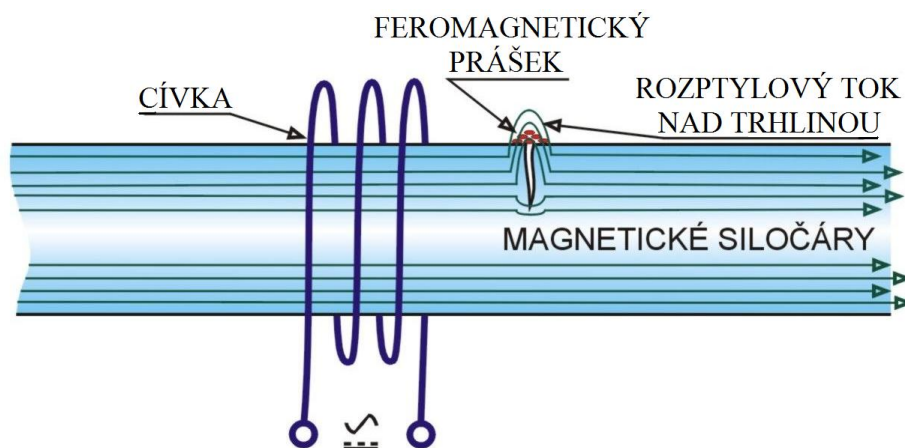
Tato zkouška se používá ke zjišťování necelistvostí povrchu materiálů a výrobků. Jedná se o vady, které jsou na povrchu otevřené (souvisí bezprostředně s povrchem), aby do nich mohla vniknout detekční tekutina (obr. 5.2). Na začátku je dokonalá příprava povrchu umytím a odmaštěním. Poté se nanese zkušební kapalina (penetrant) na zkoušený povrch (kapalina zateče do dutin vad). Doba penetrace bývá 10 až 30 minut a poté následuje znovu umytí (odstraní přebytek penetrantu). Poté se povrch osuší a vyvolá indikace nanesením vývojky (lepší viditelnost vad). Podle detekčních prostředků rozeznáváme metodu barevné indikace (vznik kontrastní barevné indikace a hodnocení se provádí na denním světle) a metodu fluorescenční (vada se projeví světélkující indikací při ozáření ultrafialovým světlem, vývojka se nepoužívá). Další zkoušky jsou olejem a petrolejem (vada se projeví mastnými skvrnami na povrchu). Penetrační zkouška je obecně popsána v normě ČSN EN 571-1.



Obr. 5.2 Princip penetrační zkoušky [41]

5.3.3 Magnetická prášková zkouška [8], [20], [23], [28]

Tato metoda zjišťuje povrchové nebo těsně podpovrchové (2 až 3 mm) vady. Princip (obr. 5.3) je založen na zjišťování rozptylu magnetického toku, který vznikne ve zmagnetizovaném feromagnetickém materiálu v místě necelistvostí (trhlin) nebo náhlé změny magnetických vlastností (struska). Jemný železný prach se používá na zviditelnění vystupujících siločar. Zviditelnění vady je v místě (obr. 5.4), kde vycházejí siločáry z povrchu zkoušeného svaru (přichycení železného prachu). Zkoušený předmět magnetizujeme buď průchodem elektrického proudu, nebo elektromagnetem. Provádění zkoušky a vyhodnocování vad předepisuje norma ČSN EN ISO 23278.



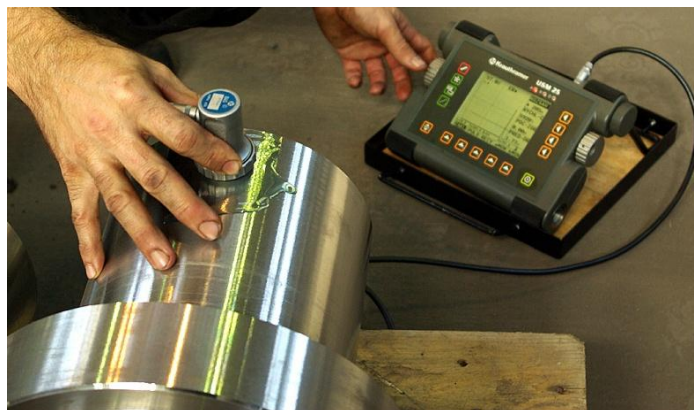
Obr. 5.3 Princip magnetické práškové zkoušky [23]



Obr. 5.4 Magnetická prášková zkouška [20]

5.3.4 Ultrazvuková zkouška [8], [28], [37]

Zkouška se používá k zjišťování skrytých vad v materiálu. Zkouška (obr. 5.5) je založena na principu odrazu vlnění na rozhraní dvou prostředí (mají odlišné vlastnosti). Každý materiál má jinou rychlost šíření ultrazvuku. Rychlost šíření je závislá na druhu prostředí a na frekvenci vlnění. Pro měření se používají sondy, které vytvářejí i přijímají ultrazvukové signály. Pro vyhodnocení se používá obrazovka, kde se objeví vysílací impuls a přijatý impuls. V případě vyskytnutí jiných impulsů je zjištěna vada v materiálu. Pro zkoušení materiálu ultrazvukem se používají metody průchodová a odrazová – impulzová.



Obr. 5.5 Ultrazvuková zkouška [37]

5.3.5 Prozařovací zkouška (RTG) [8], [28]

Tato zkouška slouží pro zjišťování vnitřních vad, ale i pro zjišťování povrchových (nepřístupných) vad a jde o nejstarší metodu nedestruktivního zkoušení. Princip spočívá v pohlcování ionizačního záření. Kontrolovaný svar je prozařován a prošlé záření je zachyceno na filmu (radiogramu). Vady (dutiny a póry) se nacházejí v místech, kde je záření méně pohlcováno a na filmu se jeví jako tmavší místa. Provádění zkoušky je obecně popsáno v normě ČSN EN 1435.

5.4 Destruktivní zkoušení svarů [25], [28]

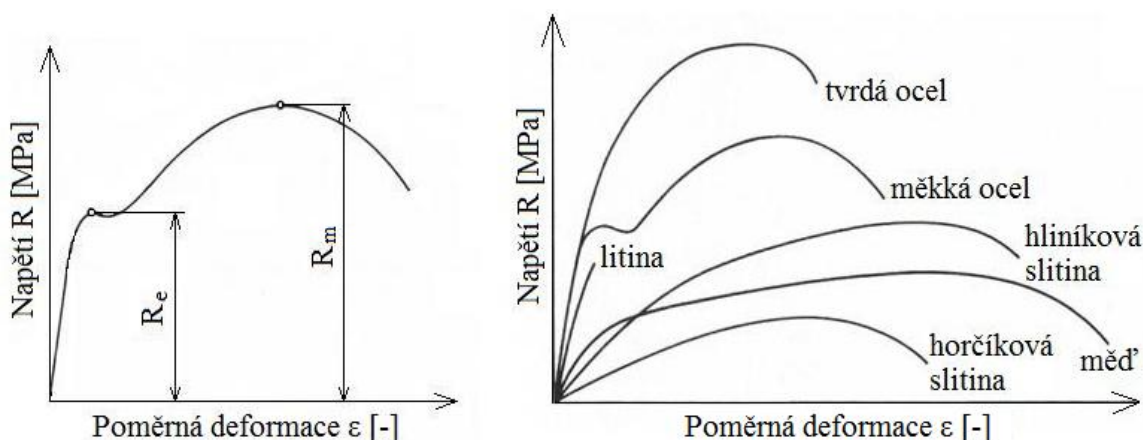
Pomocí destruktivních zkoušek zjišťujeme mechanické vlastnosti základních materiálů, svarových kovů a svarových spojů. Zkoušky jsou prováděny na speciálních zkušebních tyčích (vzorcích). Destruktivními zkouškami se ověřuje odolnost vůči vnějším vlivům, jako jsou zatížení, okolní prostředí a teplota.

Nejčastěji používané destruktivní zkoušky jsou:

- příčná zkouška tahem,
- zkouška ohybem,
- zkouška rázem v ohybu,
- zkouška tvrdosti podle Vickerse,
- zkouška hloubením podle Erichsena,
- zkouška makroskopická a mikroskopická.

5.4.1 Příčná zkouška tahem [25], [28], [30]

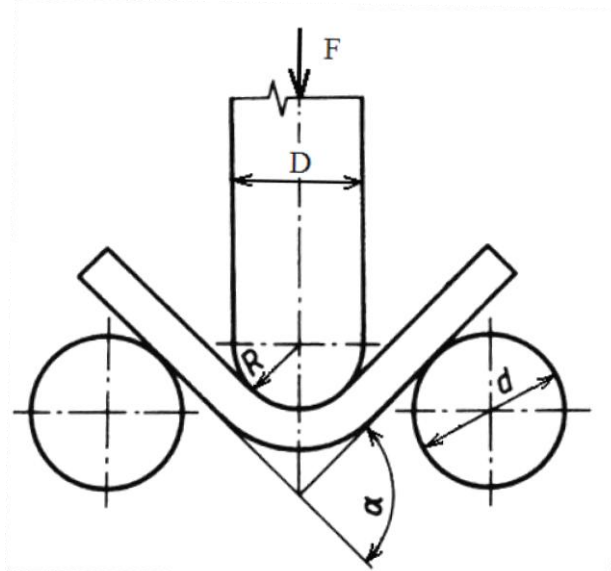
Příčná zkouška tahem představuje nejrozšířenější statickou zkoušku. Zkouška je používána k ověření pevnostních a plastických charakteristik. Zkouška tahem je prováděna na zkušebních tyčích, které jsou normalizovány. Ve zkušebním trhačím stroji dochází k deformaci zkušební tyče jednoosým tahovým zatížením (od nulového zatížení až do okamžiku přetržení tyče). Výstupem zkoušky je tahový diagram (obr. 5.6). Pomocí této zkoušky zjišťujeme mechanické vlastnosti: mez kluzu R_e [MPa], mez pevnosti R_m [MPa], tažnost A [%] a kontrakci Z [%]. Podmínky a způsob provedení zkoušky popisuje norma ČSN EN ISO 4136.



Obr. 5.6 Typy tahových diagramů kovových materiálů [30]

5.4.2 Zkouška ohybem [28], [29], [30]

Při zkoušce se zkušební tyč položí na dvě opory (válečky) a je zatěžována trnem, který působí silou uprostřed zkušební tyče (obr. 5.7). Průměr trnu je předepsán podle tloušťky a pevnosti zkoušeného materiálu. Zkušební tyč je namáhána tahem a tlakem (mezi trnem a materiálem). Kritériem této zkoušky je vyhodnocení úhlu ohybu a druhu vady. Postup provádění zkoušky je popsán normou ČSN EN ISO 5173.



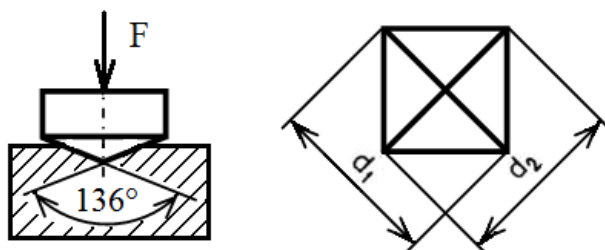
Obr. 5.7 Zkouška ohybem [30]

5.4.3 Zkouška rázem v ohybu [7], [28]

Zkouška rázem v ohybu je definována jako zkouška náchylnosti materiálu vůči křehkému porušení. Zkouška se provádí na zkušebních tělesech s defektem (v příčném směru je vrub, který představuje trhlinu v materiálu). Zkouška se provádí na Charpyho kladivu. Princip zkoušky spočívá v tom, že po uvolnění z počáteční polohy se kladivo pohybuje po kruhové dráze, narazí na zkušební těleso (opačná strana než je vyroben vrub), přerazí ji a vykývne do konečné polohy. Při zkoušce se zjišťuje velikost nárazové práce nutné k porušení zkušebního tělesa a hodnotí se charakter lomu (štěpný nebo tvárný). Podmínky a způsob provedení zkoušky popisuje norma ČSN EN ISO 9016.

5.4.4 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [7], [25], [38]

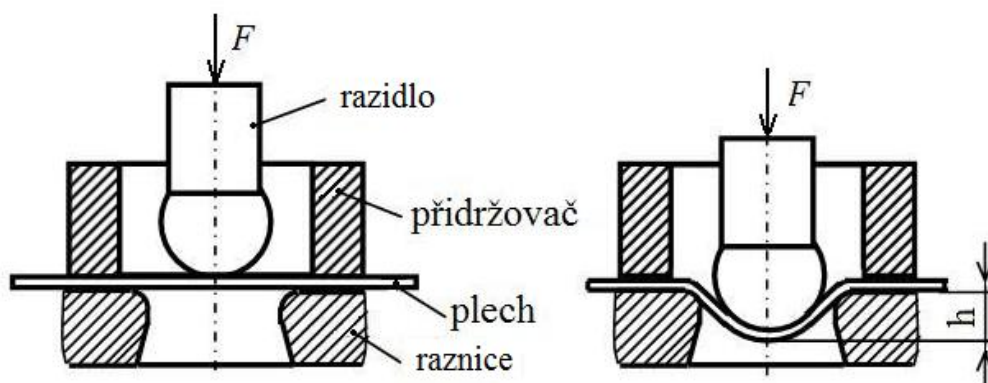
Zkouška tvrdosti podle Vickerse je nejrozšířenější zkouškou. Podstata zkoušky tvrdosti spočívá v tom, že diamantový čtyřboký jehlan o čtvercové základně a vrcholovém úhlu 136° je vtlačován silou F do povrchu zkušebního tělesa po dobu působení 10 až 15 s (obr. 5.8). Po odlehčení zkušebního tělesa jsou změřeny úhlopříčky vtisku. Postup provádění zkoušky je popsán normou ČSN EN ISO 6507-1.



Obr. 5.8 Podstata zkoušky podle Vickerse [38]

5.4.5 Zkouška hloubením podle Erichsena [7], [28], [38]

Princip zkoušky (obr. 5.9) je, že zkušební těleso (vzorek plechu) se v místě styku s razidlem natře grafitovým mazivem. Poté je vzorek plechu sevřen mezi raznicí a přidržovačem a následně se nechá dorazit razidlo na vzorek plechu. Razidlo zakončené vyleštěnou ocelovou koulí se pomalu vtlačuje do povrchu zkoušeného plechu. Následně při výskytu první trhliny se zkouška zastaví a změří se posuv razidla. Posuv razidla je měřítkem schopnosti plechu k hloubení a tato hodnota je charakteristikou materiálu (označuje se IE). Podmínky a způsob provádění zkoušky popisuje norma ČSN EN ISO 20482.



Obr. 5.9 Zkouška hloubením podle Erichsena [38]

5.4.6 Zkouška makroskopická a mikroskopická [9], [29]

Účelem makroskopické zkoušky je stanovení charakteru svarového spoje. Provádí se na zkušebním vzorku, který je vyhotoven v příčném řezu zkušebního vzorku. V příčném řezu je kontrolován svarový kov i tepelně ovlivněná oblast na obou stranách. Pozoruje se pouhým okem nebo pomocí mikroskopu (malá zvětšení pouze). Zkoumanou oblast je nutno před zkouškou vybrousit, případně i vyleštit. Zkouškou se zjišťují vady materiálu a hodnotí se chemická nestejnorodost.

Mikroskopická zkouška je obdobně stejná jako zkouška makroskopická. Příčný řez zkušebního vzorku je zkoumán pod mikroskopem (řádově vyšší než u makroskopické zkoušky). Příprava vzorku pro mikroskopické pozorování je složitá a pracná (skládá se z odběru vzorku, označení vzorku, broušení, leštění a leptání). Provádění makroskopické a mikroskopické zkoušky popisuje norma ČSN EN ISO 1321.

6 PRAKTICKÁ ČÁST

Cílem experimentu je provést svaření ocelových plechů Docol 1200 M a DC01 (ocel 11 321) pomocí vláknového laseru. Tyto materiály byly svařeny rozdílnými výkony a na některých materiálech bylo provedeno tepelné zpracování (žihání) v peci o teplotě 180 °C po dobu 15 minut, protože u plechu Docol 1 200 M dochází ke zpevňování materiálu ohřevem. Na vzorcích budou provedeny destruktivní zkoušky, z kterých budou vyhodnoceny výsledky svarových spojů.

6.1 Charakteristika svařovaných materiálů [24]

Jako výchozí materiály byly použity vysokopevnostní ocel společně s hlubokotažnou ocelí. Materiály byly zvoleny na základě rozdílných mezí kluzů, pro použití na výrobu automobilových dílů (TB plechy).

Docol 1200 M

Tato ocel je produktem švédské firmy SSAB Tunnpilat. Jedná se o moderní vysokopevnostní ocel s malou odchylkou tloušťky. Produkty Docol jsou nejsilnější za studena válcované oceli na trhu a jsou vyráběny pomocí speciálního tepelného zpracování a rychlého kalení ve vodě pro dosažení vyšší pevnosti a delší životnosti (oceli odolné atmosférické korozi). Docol 1200 M se používá především v automobilovém průmyslu (zvýšení bezpečnosti) a jedná se o plně jednofázovou martenzitickou ocel, která je vhodná pro svařování, lisování, ohýbání a válcování. Tato ocel má dobrou svařitelnost.

Ocel DC01

Jedná se o jakostní nelegovanou ocel, která je vhodná pro tváření (válcování) za studena k středně hlubokému tažení, lakování a pokovování. Ocel má zaručenou svařitelnost.

Tab. 6.1 Mechanické vlastnosti ocelí (min. hodnoty)

Materiál	Mez kluzu R_e [MPa]	Mez pevnosti R_m [MPa]	Tažnost A_{80} [%]
DC01	230	270	28
Docol 1200 M	1095	1250	4

Tab. 6.2 Chemické složení ocelí (max. hodnoty)

Materiál	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	Nb [%]	V [%]	Cr [%]	Ni [%]
DC01	0,040	0,01	0,35	0,01	-	-	-	0,009	-	-
Docol 1200 M	0,106	0,19	1,58	0,01	0,003	0,044	0,015	0,010	0,03	0,03

Atesty ocelí jsou uvedeny v příloze 1 a 2.

6.2 Výpočet uhlíkového ekvivalentu [39]

Při svařování uhlíkových ocelí je nutné znát uhlíkový ekvivalent (CEV). Uhlíkový ekvivalent se počítá na základě vzorce navrženého Mezinárodním svářečským institutem IIW/IIS:

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \quad (6.1)$$

Je-li $CEV \leq 0,45$ hm. % a zároveň platí, že $C \leq 0,20$ hm. % a svařovaná tloušťka $t \leq 25$ mm, nejsou nutné při svařování žádná zvláštní opatření a materiály mají zaručenou svařitelnost. Není-li splněna některá z těchto uvedených podmínek, je nutné použít zvláštní opatření (především předehřev), aby se zamezilo vzniku trhlin.

Výpočet uhlíkových ekvivalentů (podle chemického složení atestů):

- materiál DC01,

$$CEV = 0,04 + \frac{0,35}{6} + \frac{0 + 0 + 0,009}{5} + \frac{0 + 0}{15} = 0,10 \%$$

- materiál Docol 1200 M

$$CEV = 0,106 + \frac{1,58}{6} + \frac{0,03 + 0 + 0,01}{5} + \frac{0,01 + 0,03}{15} = 0,38 \%$$

V našem případě materiály odpovídají uvedeným podmínkám a můžeme konstatovat, že materiály mají zaručenou svařitelnost.

6.3 Příprava a realizace svařovacího procesu

Svařování bylo provedeno na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky pomocí vláknového laseru YLS 2000 od společnosti IPG (příloha 6).

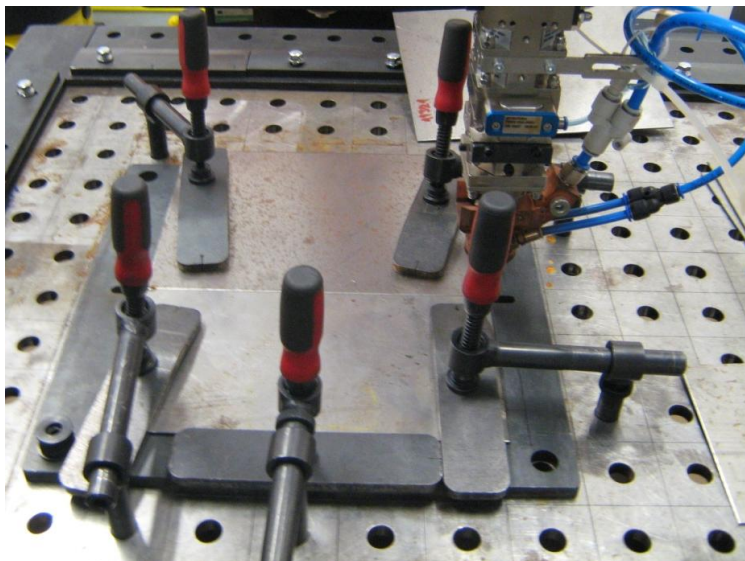
Před svařováním byly svarové plochy materiálů zdrsňeny pomocí smirkového papíru a následně byly plechy odmaštěny a zbaveny nečistot.

Jednotlivé zkušební plechy byly postupně zajištěny upínkami na stole. Po upnutí byly provedeny stehové svary na koncích plechů, aby se zamezilo rozevření během svařování (vlivem tuhnutí svarového kovu). Poté došlo ke svaření materiálů kontinuálním režimem svařování (CW). Jako ochranný plyn byl použit argon (čistota plynu 99,998 %). Poloha ohniska je definována vůči povrchu materiálu, záporné hodnoty jsou udávány nad povrchem. Zvolené parametry svařování jsou uvedeny v tab. 6.3.

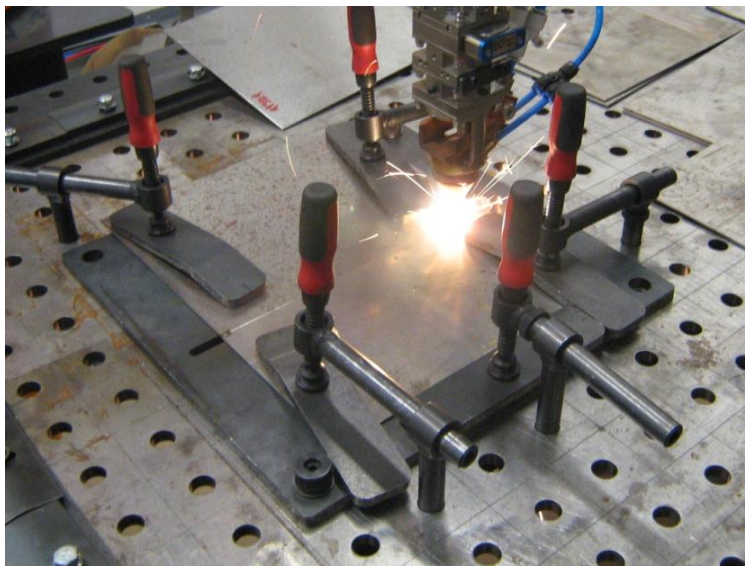
Tab. 6.3 Parametry svařování

Svar číslo	Ochranný plyn	Tloušťka plechů [mm]	Výkon laseru [W]	Poloha ohniska [mm]	Svařovací rychlost [mm·s ⁻¹]	Průtok plynu [l·min ⁻¹]
1	Ar	2	1000	-1	20	12
2	Ar	2	1200	-1	20	12
3	Ar	2	1400	-1	20	12

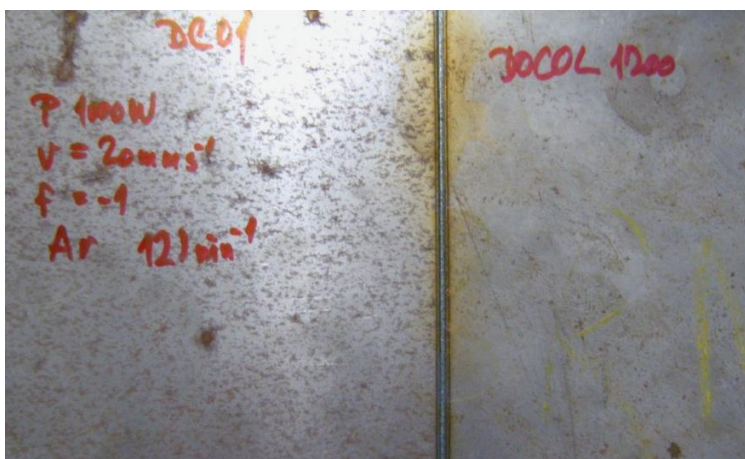
Příprava, realizace svařovacího procesu a svar ocelí jsou na obr. 6.1 až 6.3.



Obr. 6.1 Upnutí svařovaných plechů



Obr. 6.2 Proces svařování



Obr. 6.3 Svar ocelí DC01 a Docol 1200 M

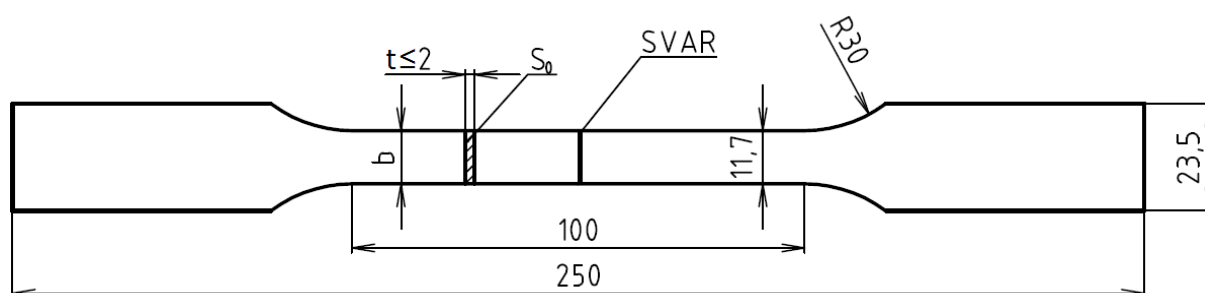
6.4 Zvolený počet vzorků

Pro zkoušku tahem bylo vyrobeno 12 vzorků (pro každý svařovací výkon 4 vzorky), pro zkoušku hloubením podle Erichsena byly vyrobeny 3 vzorky (pouze bez tepelného ovlivnění) a pro zkoušku makrostruktury a mikrostruktury bylo zhotoveno 6 vzorků (pro každý svařovací výkon 2 vzorky – vzorek tepelně ovlivněný a bez tepelného ovlivnění).

6.5 Příčná zkouška tahem

Příčná zkouška tahem byla provedena na Ústavu strojírenské technologie VUT v Brně pomocí hydraulického zkušebního stroje ZD 40.

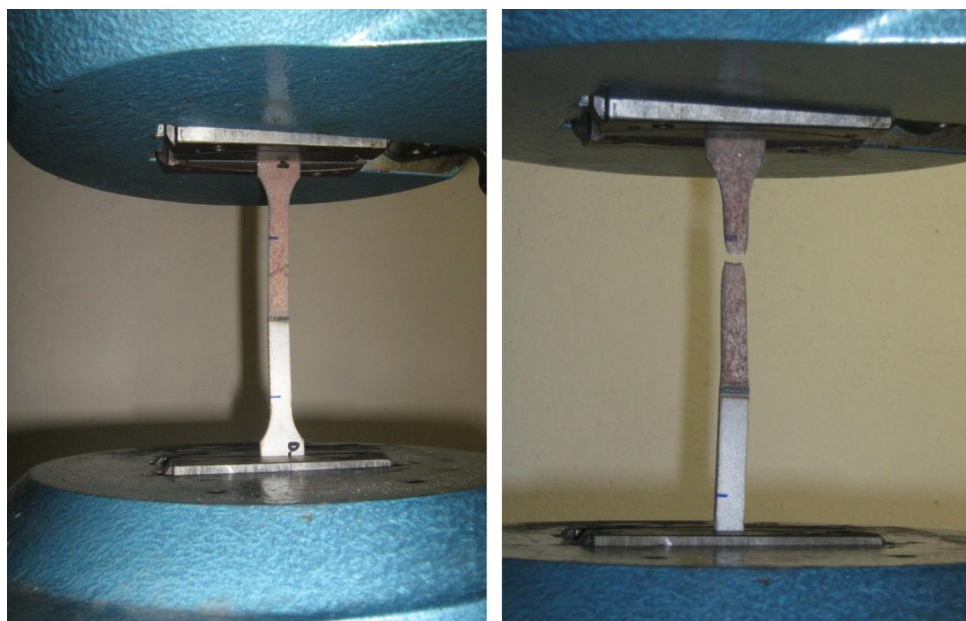
Pro příčnou zkoušku tahem byly vyrobeny vzorky podle normy ČSN EN ISO 4136. Zvolené rozměry vzorků byly stanoveny v závislosti na tloušťce svařovaných plechů. Rozměry vzorků pro příčnou zkoušku tahem jsou na obr. 6.4.



Obr. 6.4 Rozměry vzorku pro zkoušku tahem pro tloušťku $t \leq 2$ mm

Zkouška tahem byla provedena na hydraulickém zkušebním stroji (ZD 40) pro tahové, tlakové a ohybové zkoušky do maximálního zatížení 400 kN. Vzorky byly ve zkušebním stroji upnuty pomocí kleští (obr. 6.5). Ukázka vzorku před zkouškou a po zkoušce je na obr. 6.6. Fotodokumentace vzorků po zkoušce tahem je umístěna v příloze 3. Zkušební stroj (ZD 40) pro zkoušku tahem a jeho technické parametry jsou uvedeny v příloze 7.

Rychlost zatěžování vzorků byla nastavena $850 \text{ MPa} \cdot \text{min}^{-1}$.



Obr. 6.5 Upnutí vzorku ve zkušebním trhačím stroji



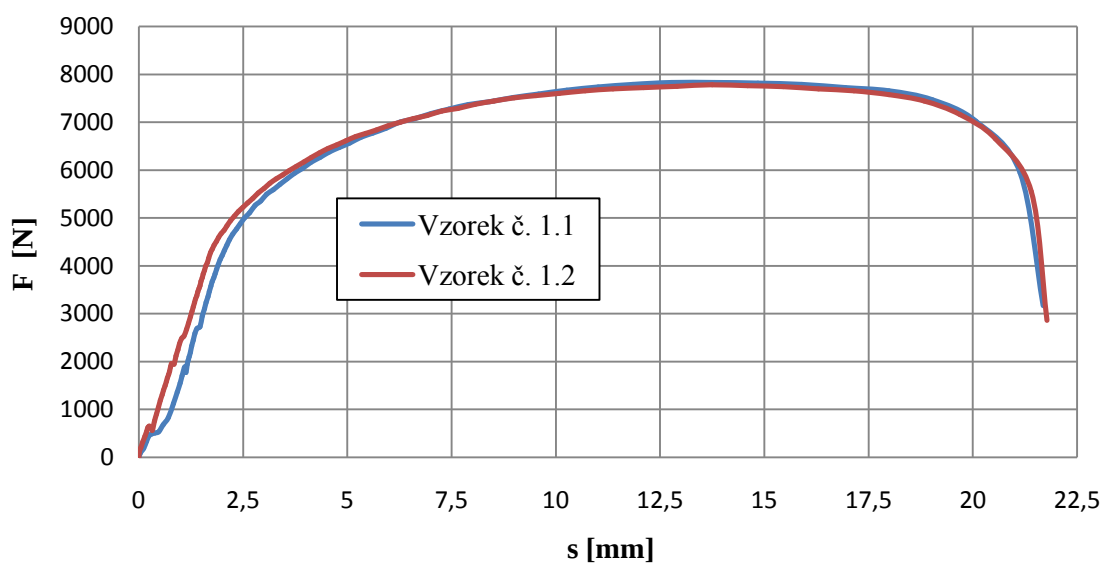
Obr. 6.6 Ukázka vzorku před zkouškou a po zkoušce tahem

Vzorky svařené výkonem 1 000 W

U obou vzorků došlo k porušení mimo svar i tepelně ovlivněnou oblast, to svědčí o kvalitním provedení svarů. K porušení vzorků došlo u oceli DC01, tedy u materiálu s nižší mezí kluzu. Naměřené hodnoty odpovídají hodnotám uváděným výrobcem v místě porušení.

Tab. 6.4 Naměřené hodnoty z tahové zkoušky pro vzorky svařené výkonem 1 000 W

Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	S ₀ [mm ²]	F _m [N]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
1.1	2	11,70	23,4	7833,2	221,44	334,75	17,50
1.2	2	11,70	23,4	7776,8	222,24	332,34	15,00



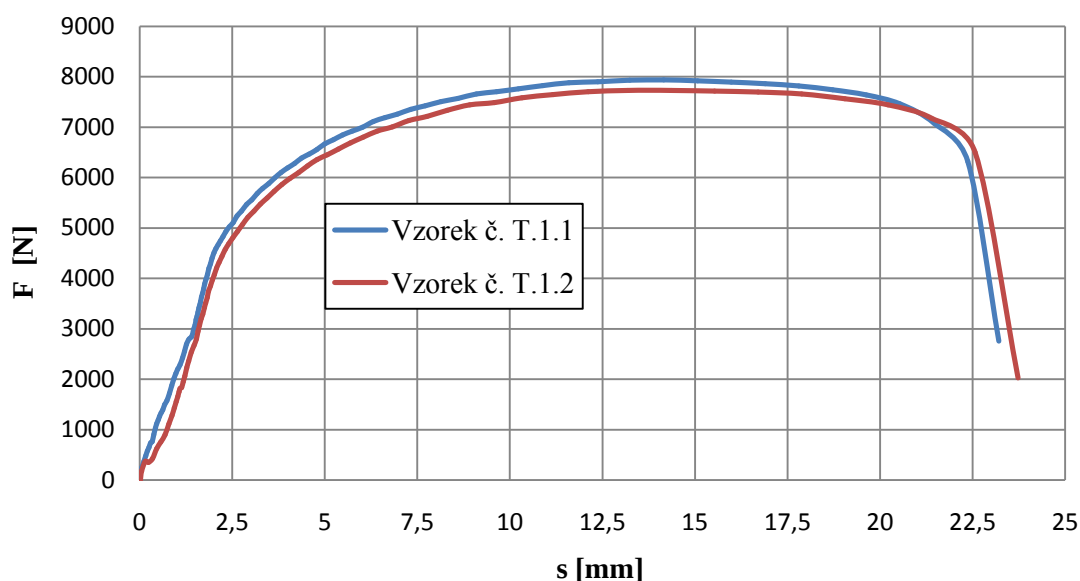
Obr. 6.7 Tahové diagramy pro vzorky svařené výkonem 1 000 W

Vzorky svařené výkonem 1 000 W, tepelně ovlivněny (T)

U obou vzorků došlo k porušení mimo svar i tepelně ovlivněnou oblast, to svědčí o kvalitním provedení svarů. K porušení došlo v oblasti nižší meze kluzu, tedy u oceli DC01. Naměřené hodnoty odpovídají hodnotám uváděným výrobcem v místě porušení.

Tab. 6.5 Naměřené hodnoty z tahové zkoušky pro vzorky svařené výkonem 1 000 W, T

Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	S ₀ [mm ²]	F _m [N]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
T.1.1	2	11,80	23,6	7946,0	229,12	336,69	20,00
T.1.2	2	11,65	23,3	7758,0	218,35	332,96	22,50



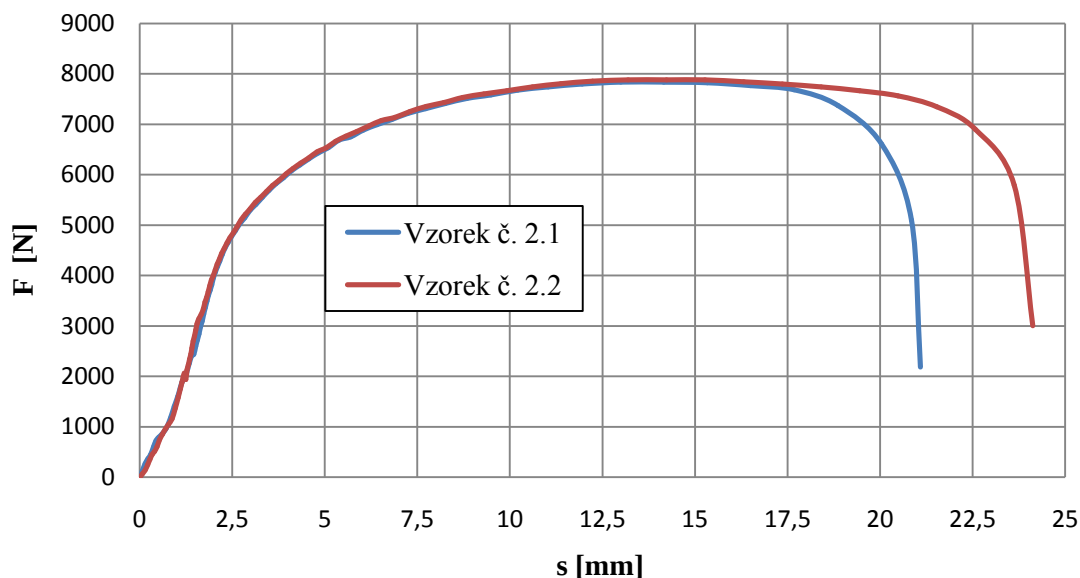
Obr. 6.8 Tahové diagramy pro vzorky svařené výkonem 1 000 W, T

Vzorky svařené výkonem 1 200 W

U obou vzorků došlo k porušení mimo svar i tepelně ovlivněnou oblast, to svědčí o kvalitním provedení svarů. K porušení vzorků došlo u oceli DC01, tedy u materiálu s nižší mezí kluzu. Naměřené hodnoty odpovídají hodnotám uváděným výrobcem v místě porušení.

Tab. 6.6 Naměřené hodnoty z tahové zkoušky pro vzorky svařené výkonem 1 200 W

Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	S ₀ [mm ²]	F _m [N]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
2.1	2	11,65	23,3	7861,6	222,78	337,41	18,75
2.2	2	11,75	23,5	7889,6	223,29	335,73	21,25



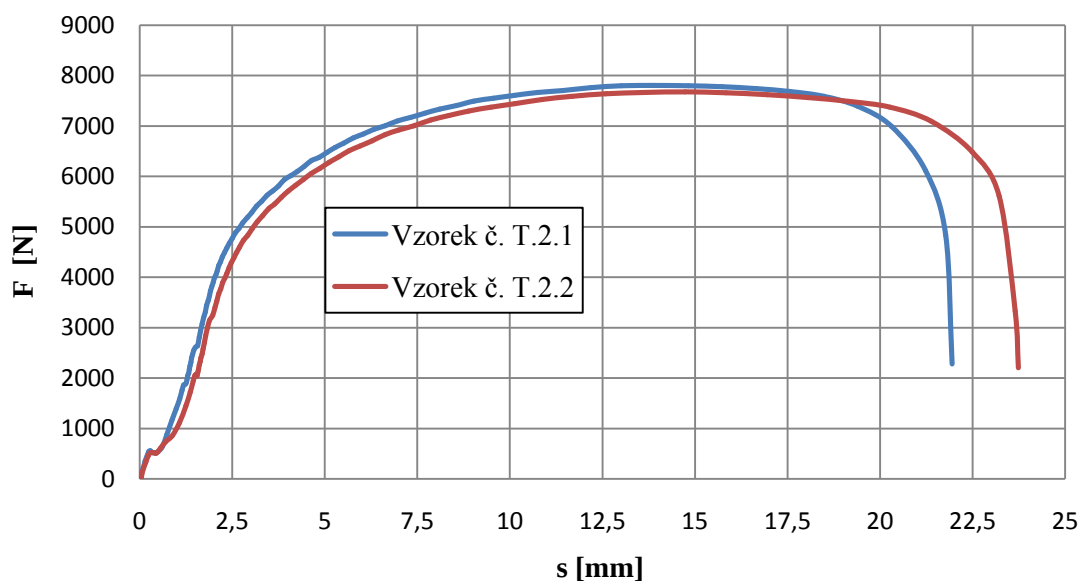
Obr. 6.9 Tahové diagramy pro vzorky svařené výkonem 1 200 W

Vzorky svařené výkonem 1 200 W, tepelně ovlivněny

U obou vzorků došlo k porušení mimo svar i tepelně ovlivněnou oblast, to svědčí o kvalitním provedení svarů. K porušení došlo v oblasti nižší meze kluzu, tedy u oceli DC01. Naměřené hodnoty odpovídají hodnotám uváděným výrobcem v místě porušení.

Tab. 6.7 Naměřené hodnoty z tahové zkoušky pro vzorky svařené výkonem 1 200 W, T

Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	S_0 [mm ²]	F_m [N]	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A [%]
T.2.1	2	11,75	23,5	7824,0	218,49	332,94	20,00
T.2.2	2	11,55	23,1	7682,8	219,83	332,59	21,25



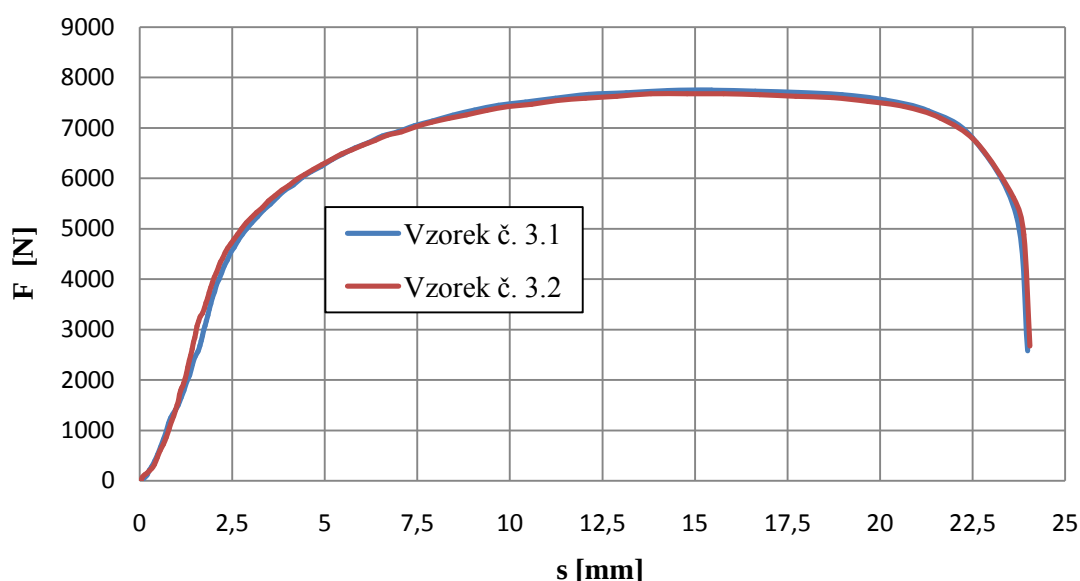
Obr. 6.10 Tahové diagramy pro vzorky svařené výkonem 1 200 W, T

Vzorky svařené výkonem 1 400 W

U obou vzorků došlo k porušení mimo svar i tepelně ovlivněnou oblast, to svědčí o kvalitním provedení svarů. K porušení vzorků došlo u oceli DC01, tedy u materiálu s nižší mezí kluzu. Naměřené hodnoty odpovídají hodnotám uváděným výrobcem v místě porušení. U vzorku č. 3.1 došlo k porušení mimo vyznačenou (měřenou) oblast, z tohoto důvodu vyšla tažnost materiálu zkreslená.

Tab. 6.8 Naměřené hodnoty z tahové zkoušky pro vzorky svařené výkonem 1 400 W

Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	S ₀ [mm ²]	F _m [N]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
3.1	2	11,60	23,2	7758,0	218,48	334,40	13,75
3.2	2	11,55	23,1	7692,4	218,61	333,00	20,00



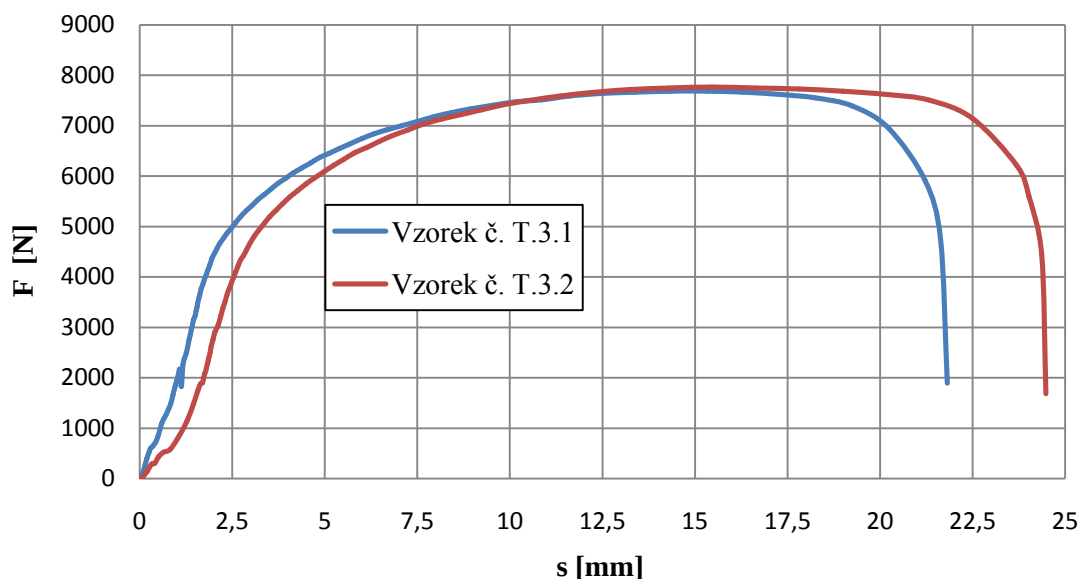
Obr. 6.11 Tahové diagramy pro vzorky svařené výkonem 1 400 W

Vzorky svařené výkonem 1 400 W, tepelně ovlivněné

U obou vzorků došlo k porušení mimo svar i tepelně ovlivněnou oblast, to svědčí o kvalitním provedení svarů. K porušení došlo v oblasti nižší meze kluzu, tedy u oceli DC01. Naměřené hodnoty odpovídají hodnotám uváděným výrobcem v místě porušení. U vzorku č. T.3.1 došlo k porušení mimo vyznačenou (měřenou) oblast, z tohoto důvodu vyšla tažnost materiálu zkreslená.

Tab. 6.9 Naměřené hodnoty z tahové zkoušky pro vzorky svařené výkonem 1 400 W, T

Č. vzorku	t [mm]	b [mm]	S ₀ [mm ²]	F _m [N]	R _{p0,2} [MPa]	R _m [MPa]	A [%]
T.3.1	2	11,65	23,3	7682,8	217,13	329,73	11,25
T.3.2	2	11,70	23,4	7767,6	216,21	331,95	18,75



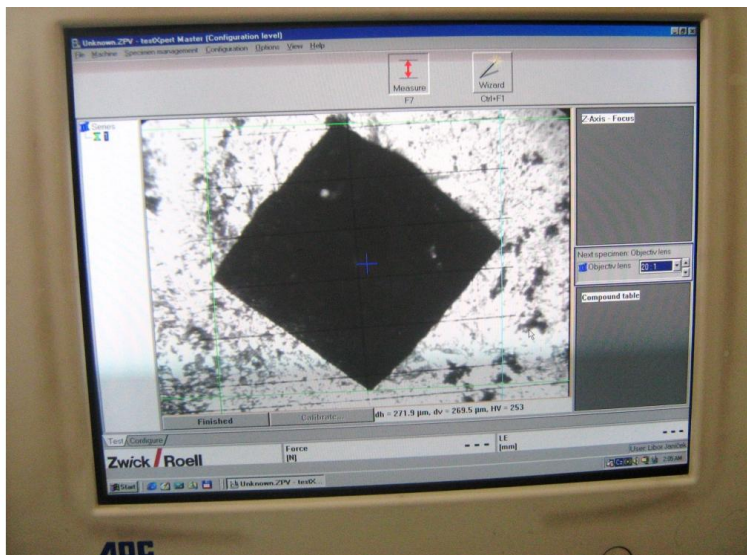
Obr. 6.12 Tahové diagramy pro vzorky svařené výkonem 1400 W, T

Zhodnocení příčné zkoušky tahem

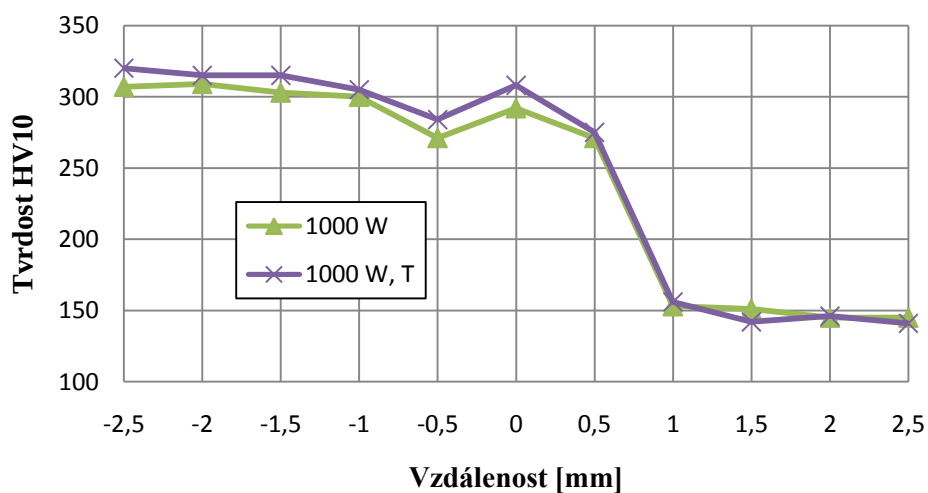
U všech vzorků došlo k porušení mimo svarový spoj i mimo tepelně ovlivněnou oblast svaru. K porušení materiálu došlo vždy u materiálů s nižší mezí kluzu (DC01). Z výsledků zkoušek je zřejmé, že vzorky mají kvalitní svarový spoj a požadovanou pevnost.

6.6 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

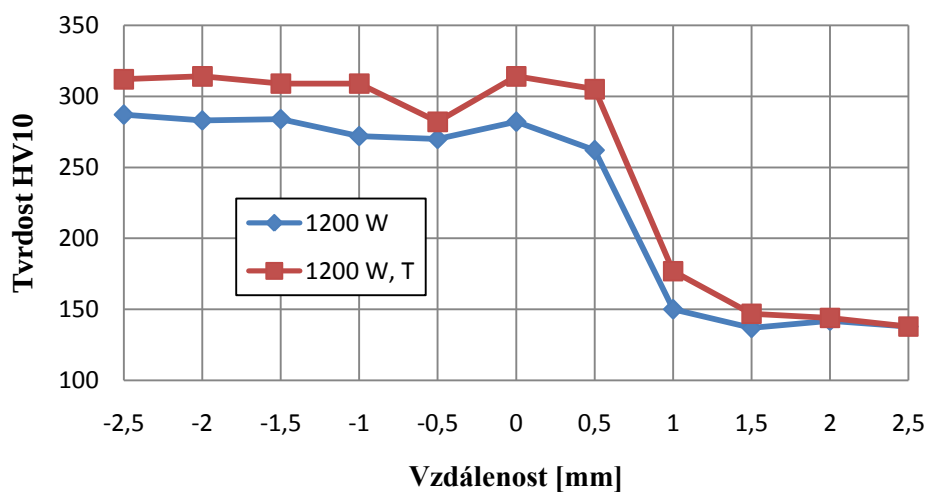
Zkouška tvrdosti podle Vickerse proběhla dle normy ČSN EN ISO 6507-1 na tvrdoměru Zwick 3212 (obr. 6.13). Pro zkoušku tvrdosti byly použity vzorky ze zkoušky mikrostruktury a makrostruktury. Při zkoušce bylo zvoleno zatížení 10 kg po dobu 12 sekund a k vyhodnocení naměřených hodnot byl použit software testXpert (obr. 6.13). Na každém vzorku bylo provedeno 11 vtisků v jedné řadě a vzdálenost mezi jednotlivými vtisky byla 0,5 mm (menší vzdálenost nelze uskutečnit, z důvodu ovlivnění jednotlivých vtisků). Průběh naměřených hodnot všech vzorků pro jednotlivé výkony jsou na obr. 6.14 až 6.16. Měření tvrdosti probíhalo od základního materiálu Docol 1200 M, přes tepelně ovlivněné oblasti a svarový kov, až do základního materiálu DC01.



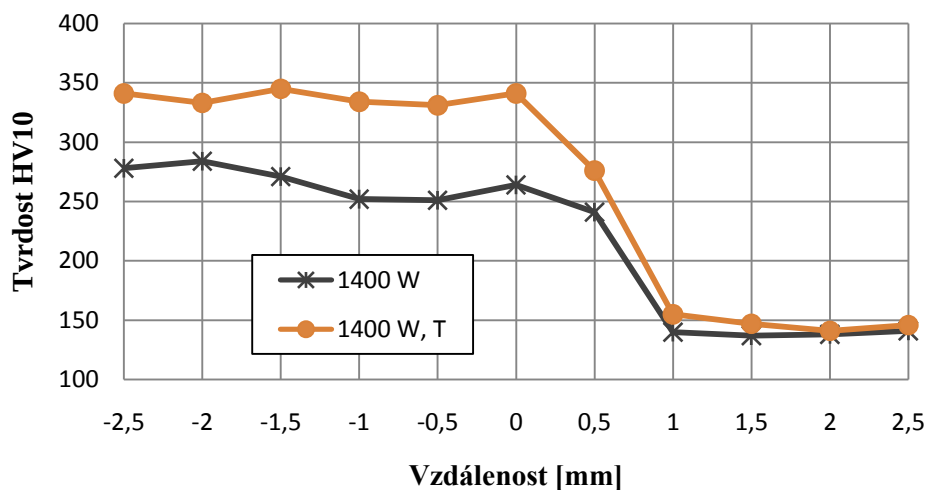
Obr. 6.13 Tvrdoměr Zwick 3212 a vyhodnocení tvrdosti pomocí programu na počítači



Obr. 6.14 Zkouška tvrdosti pro vzorky svařené výkonem 1 000 W

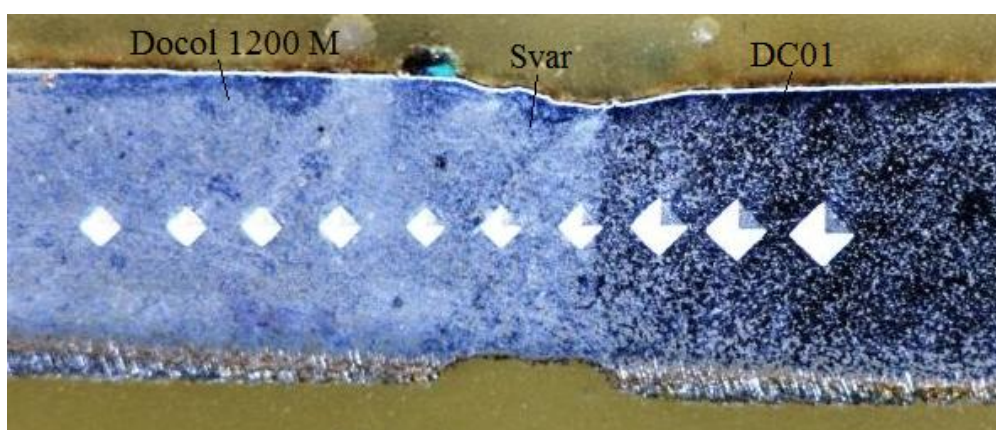


Obr. 6.15 Zkouška tvrdosti pro vzorky svařené výkonem 1 200 W



Obr. 6.16 Zkouška tvrdosti pro vzorky svařené výkonem 1 400 W

Ukázka makrosnímku po zkoušce tvrdosti podle Vickerse je na obr. 6.17. Fotodokumentace makrosnímků všech svařených materiálů jsou v příloze č. 4.



Obr. 6.17 Makrosnímky po zkoušce tvrdosti podle Vickerse

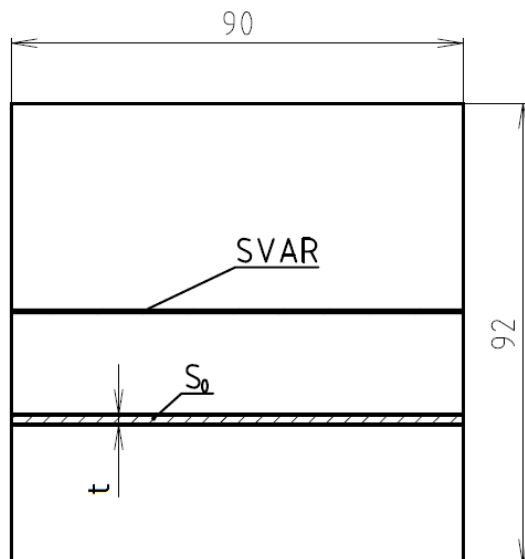
Zhodnocení zkoušky tvrdosti podle Vickerse

Při zkoušce tvrdosti bylo zjištěno, že tvrdost svarového kovu se přibližuje hodnotám tvrdosti materiálu Docol 1200 M (tvrdost svaru je především ovlivněna vysokopevnostní ocelí). Tvrdost tepelně ovlivněné oblasti vysokopevnostního materiálu se mírně snížila oproti svaru a základnímu materiálu. Naopak tvrdost tepelně ovlivněné oblasti materiálu DC01 se výrazně snížila vzhledem ke svaru (ovlivněno ocelí DC01). U vyžíhaných vysokopevnostních ocelí došlo k vytvrzení materiálů (důvodem je zvolená nízká teplota žhání), a proto mají vyšší tvrdost než vysokopevnostní materiály, které nebyly tepelně ovlivněny. U materiálu DC01 nedošlo k vytvrzení materiálů.

6.7 Zkouška hloubením podle Erichsena

Pro zkoušku hloubením podle Erichsena byly vyrobeny tři vzorky (bez tepelného zpracování). Rozměry vzorků pro zkoušku podle Erichsena jsou na obr. 6. 18.

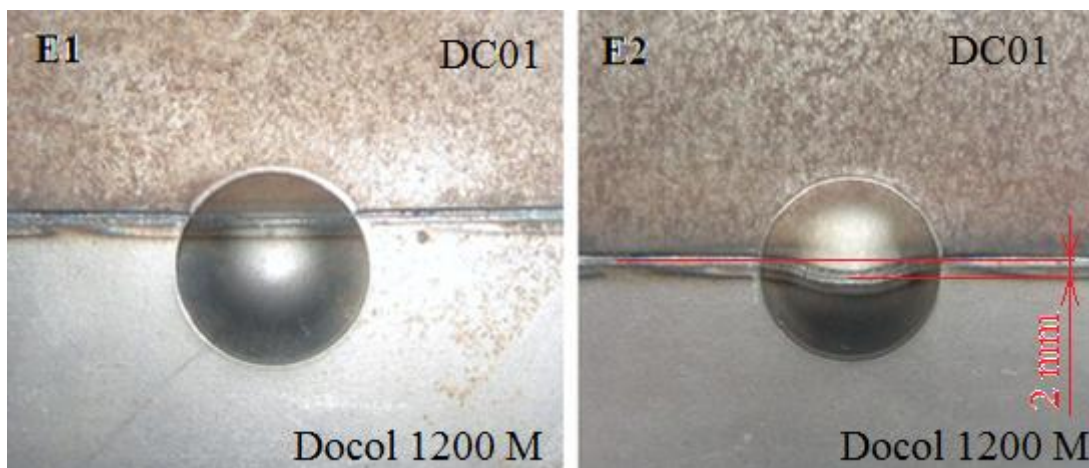
Zkouška hloubením podle Erichsena byla provedena na zkušebním zařízení ERICHSEN F4 se snímací jednotkou HEIDENHAIN (příloha 8). Zkouška byla provedena na dvou zkušebních vzorcích. Třetí vzorek byl ponechán jako výchozí stav.



Obr. 6.18 Rozměry vzorku pro zkoušku hloubením podle Erichsena

Tab. 6.10 Naměřené hodnoty ze zkoušky hloubení podle Erichsena

Č. vzorku	Výkon laseru [W]	Tloušťka plechu [mm]	IE [mm]	Vznik trhliny
E1	1200	2	7,51	ne
E2	1400	2	9,47	ne



Obr. 6.19 Vzorky E1 a E2 po Erichsenově zkoušce

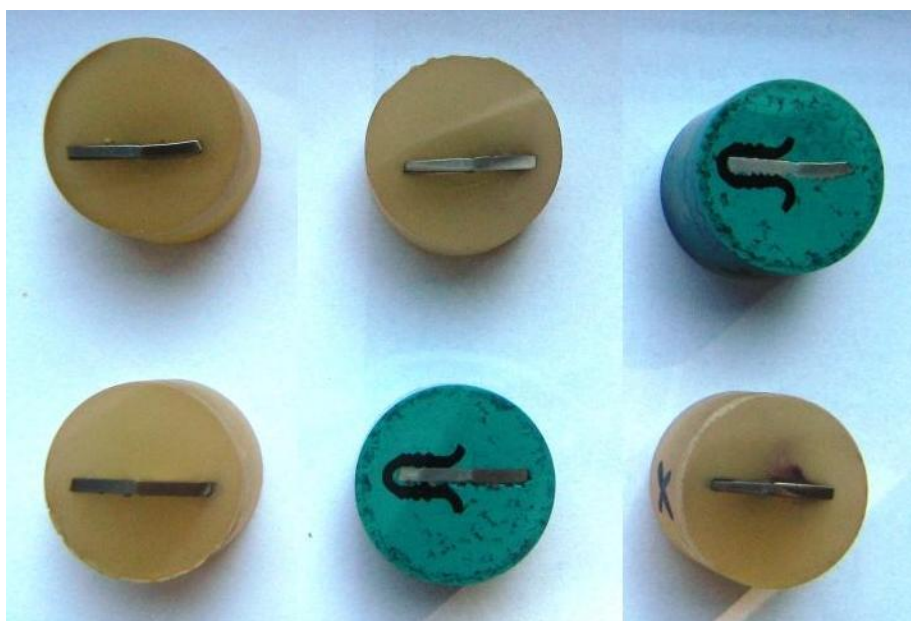
Zhodnocení zkoušky hloubením podle Erichsena

U vzorku E1 nevznikla v průběhu zkoušky žádná trhlina (obr. 6.19). Vzorek byl zatěžován z větší části na vysokopevnostní oceli, jelikož svar nebyl uprostřed vzorku. Zkouška hloubením byla ukončena v maximální hloubce $IE = 7,51 \text{ mm}$, ne však z důvodu porušení, ale z důvodu omezeného zkušebního rozsahu zařízení.

U vzorku E2 nevznikla v průběhu zkoušky žádná trhlina (obr. 6.19). Vzorek byl zatěžován uprostřed svaru. Při zkoušce hloubení došlo k posunutí linie svaru na prohlubni o 2 mm a ke zvrásnění materiálu DC01. K posunutí linie svaru došlo u Docol 1200 M na úkor materiálu DC01 vlivem rozdílných hodnot tažností jednotlivých svařených materiálů. Zkouška hloubením nebyla ukončena z důvodu porušení, ale z důvodu omezeného zkušebního rozsahu zařízení v maximální hloubce $IE = 9,47 \text{ mm}$.

6.8 Zkouška mikrostruktury a makrostruktury

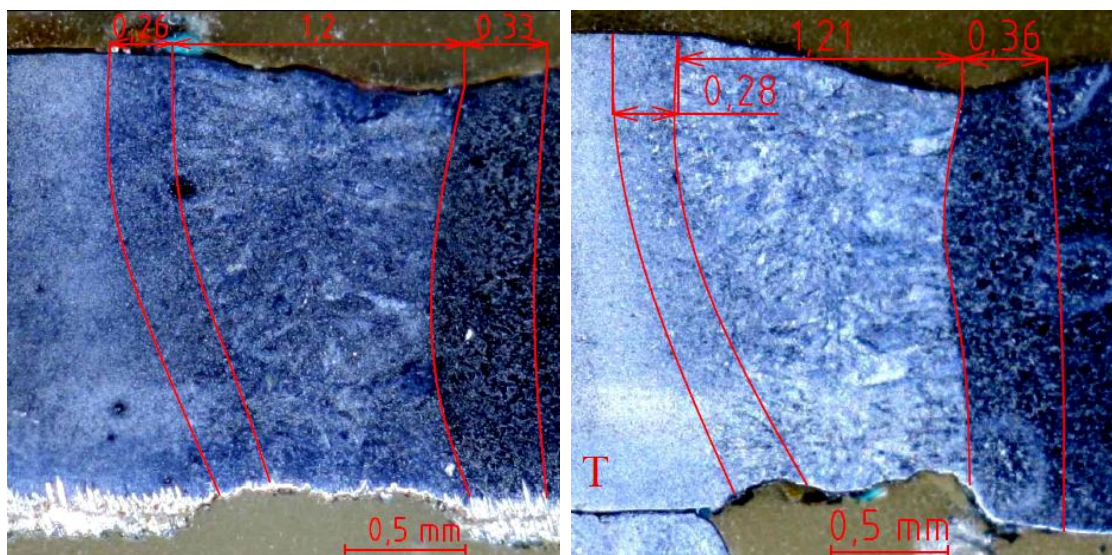
Pro zkoušku mikrostruktury a makrostruktury bylo zhotoveno šest vzorků (obr. 6.20). Pro každý svařovací výkon dva vzorky (bez tepelného ovlivnění a s tepelným ovlivněním). Po vyřezání byly vzorky zalisovány a poté bylo provedeno broušení a leštění jejich povrchu. Následně se provedly na vzorcích snímky jednotlivých svarových spojů. Tyto snímky byly využity pro vyhodnocení velikostí jednotlivých částí svarových spojů a TOO.



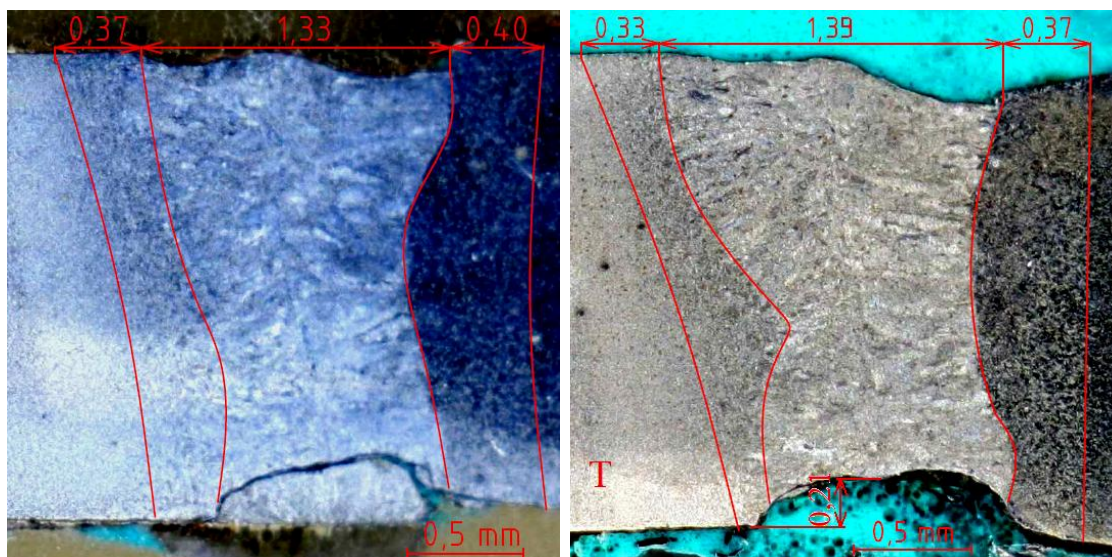
Obr. 6.20 Vzorky pro zkoušku mikrostruktury a makrostruktury

Zkouška makrostruktury

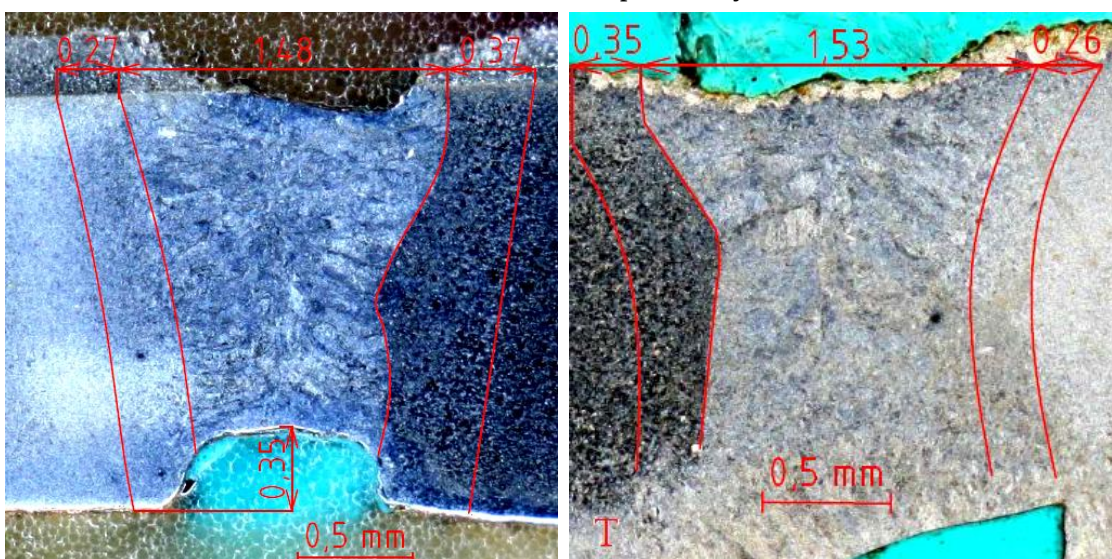
Na vyrobených snímcích, kde jsou vidět svarové spoje, byly pomocí programu AutoCAD 2010 změřeny TOO a šířky svarů (obr. 6.21 až 6.23).



Obr. 6.21 Makrostruktura pro vzorky 1 a 2



Obr. 6.22 Makrostruktura pro vzorky 3 a 4



Obr. 6.23 Makrostruktura pro vzorky 5 a 6

Tab. 6.11 Naměřené hodnoty TOO a svarů ze zkoušky makrostruktury

Vzorek 1 – svařený výkonem 1 000 W			
Základní materiál	Šířka TOO [mm]	Šířka svaru [mm]	Šířka svaru s TOO [mm]
DC01	0,33	1,20	1,79
Docol 1200 M	0,26		
Vzorek 2 – svařený výkonem 1 000 W, T			
Základní materiál	Šířka TOO [mm]	Šířka svaru [mm]	Šířka svaru s TOO [mm]
DC01	0,36	1,21	1,85
Docol 1200 M	0,28		
Vzorek 3 – svařený výkonem 1 200 W			
Základní materiál	Šířka TOO [mm]	Šířka svaru [mm]	Šířka svaru s TOO [mm]
DC01	0,40	1,33	2,10
Docol 1200 M	0,37		
Vzorek 4 – svařený výkonem 1 200 W, T			
Základní materiál	Šířka TOO [mm]	Šířka svaru [mm]	Šířka svaru s TOO [mm]
DC01	0,37	1,39	2,09
Docol 1200 M	0,33		
Vzorek 5 – svařený výkonem 1 400 W			
Základní materiál	Šířka TOO [mm]	Šířka svaru [mm]	Šířka svaru s TOO [mm]
DC01	0,37	1,48	2,12
Docol 1200 M	0,27		
Vzorek 6 – svařený výkonem 1 400 W, T			
Základní materiál	Šířka TOO [mm]	Šířka svaru [mm]	Šířka svaru s TOO [mm]
DC01	0,35	1,53	2,14
Docol 1200 M	0,26		

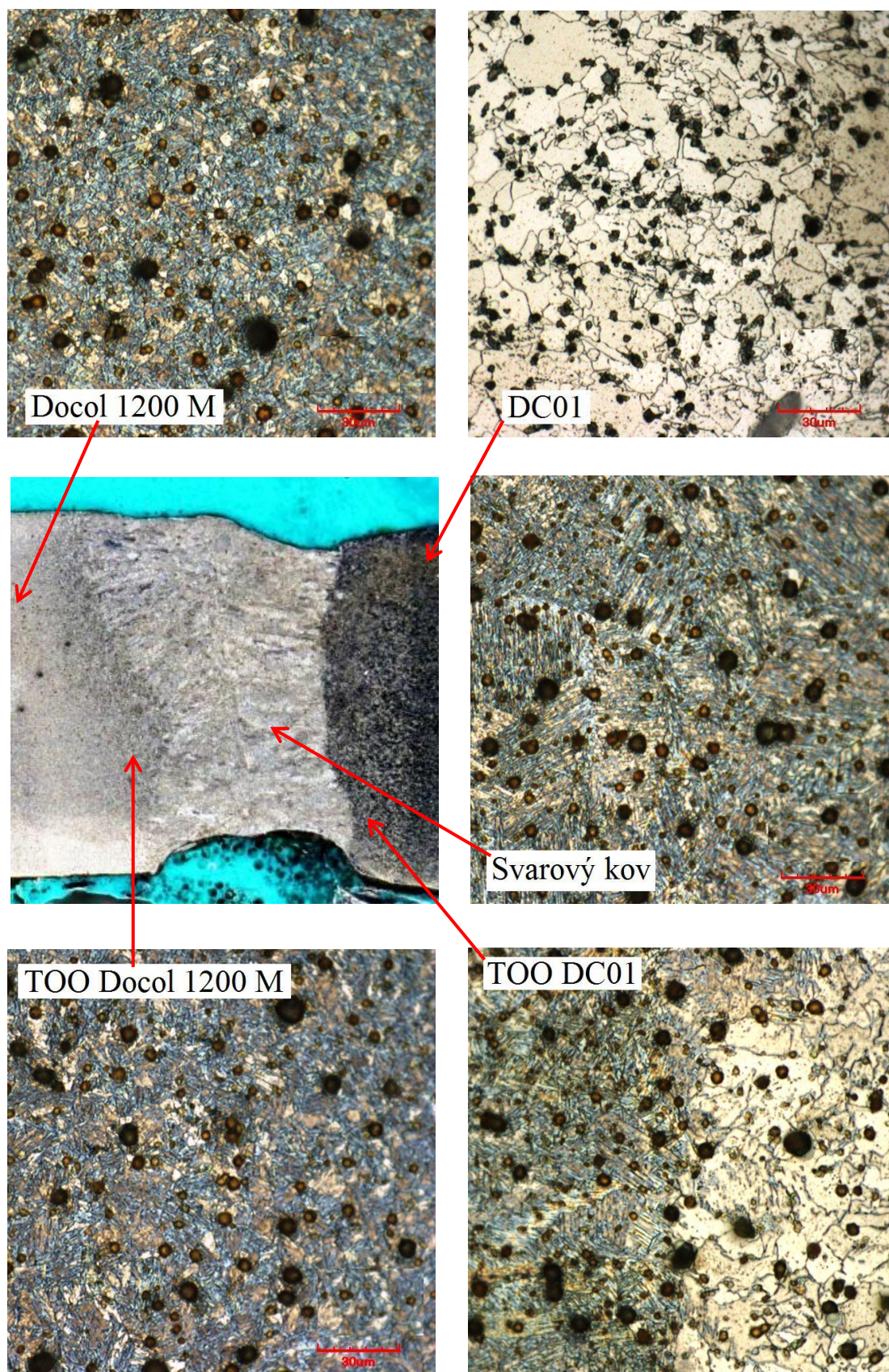
Zhodnocení zkoušky makrostruktury

Z odměřených hodnot můžeme konstatovat, že čím vyšší byl zvolen svařovací výkon laseru, tím větší byla šířka svaru a také čím vyšší výkon laseru byl zvolen, tím větší byl neprovařený kořen svaru. Nejlepší svar vznikl při svařování výkonem 1 000 W. U výkonu 1 200 W došlo k neprovaření kořene svaru (0,21 mm) a u výkonu 1 400 W došlo ještě k výraznějšímu neprovaření kořene svaru (0,35 mm). U jednotlivých vzorků můžeme konstatovat, že TOO materiálu DC01 byla vždy větší než TOO Docolu 1200 M. Dále lze pozorovat zhrubnutí zrna v oblasti svarového kovu. V porovnání s konvenčními technologiemi svařování má svařování pomocí laseru v ochranném plynu argonu velmi malou TOO a úzký svar.

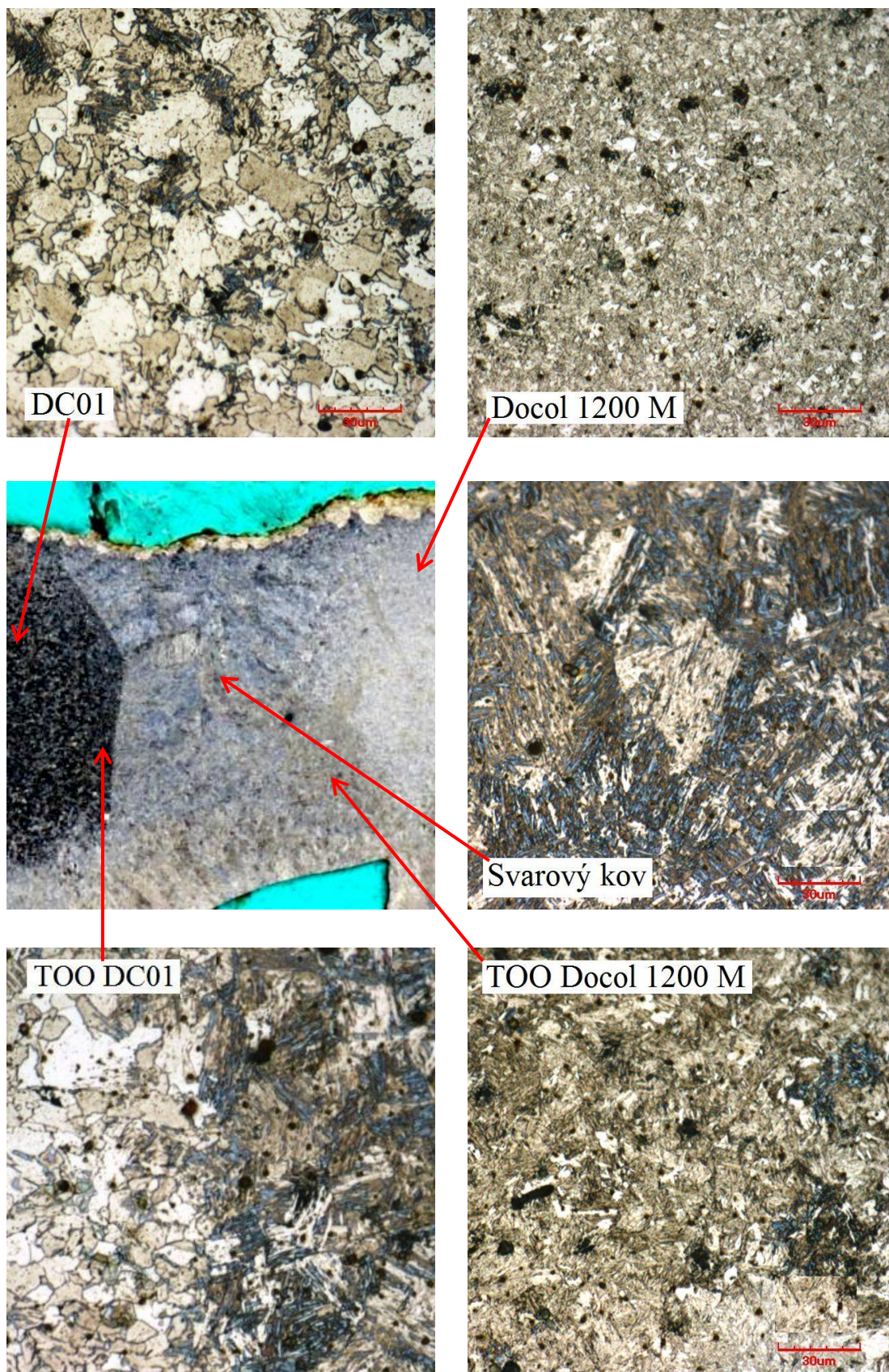
Zkouška mikrostruktury a její zhodnocení

Na následujících snímcích můžeme vidět strukturu základních materiálů, TOO a svarových kovů (obr. 6.24 a obr. 6.25). V základním materiálu Docol 1200 M můžeme pozorovat jemnozrnnou strukturu martenzitu a v základním materiálu DC01 můžeme vidět feritickou strukturu. Svarový kov je tvořen acikulárním feritem, zbytek tvoří bainit. V TOO a svarových kovech dochází k zhrubnutí zrn. Černé většinou kruhové útvary na snímcích jsou z důvodu

špatného zvolení leptadla, a proto jsou vybrány pouze dva vzorky na mikrostrukturu. Ostatní mikrostruktury vzorků jsou uvedeny v příloze 5.



Obr. 6.24 Rozbor mikrostruktury vzorku 4 – svařený výkonem 1 200 W, T



Obr. 6.25 Rozbor mikrostruktury vzorku 6 – svařený výkonem 1 400 W, T

7 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V technicko-ekonomickém zhodnocení jsou porovnávány svary vytvořené pomocí laseru se svary vytvořenými pomocí svařování elektrickým obloukem v ochranné atmosféře (MAG). Srovnání těchto metod je závislé na mnoha faktorech. U svařování laserem jsou používány svařovací rychlosti cca $(10 \text{ až } 50) \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, naopak u svařování metodou MAG je svařovací rychlost uváděna cca $(1 \text{ až } 10) \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Tab 7.1 Porovnání metod svařování

Metoda svařování	Cena 1 m svaru [Kč]	Cena provozu [Kč/hod]	Rychlost svařování [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$]
Laser	28	2000	20
MAG	35	500	4

Při svařování laserem je nutné použít speciální přípravky (přidržovače, upínací přípravky), které nejsou v ceně zahrnuty. Nevýhodou svařování laserem je vysoká pořizovací cena laserového svařovacího zařízení, avšak svařování laserem má řadu výhod, které u svařování elektrickým obloukem nelze dosáhnout. U svařování metodou MAG jsou započteny v ceně provozu i náklady potřebné na rovnání a broušení převýšení hlavy svaru cca $(150 \text{ až } 200) \text{ Kč}$, které musí následovat po svaření.

Pokud porovnáme výše uvedené metody svařování, můžeme konstatovat, že svařování laserem je ekonomicky výhodnější než svařování metodou MAG. V neposlední řadě nesmíme zapomenout, že svařováním laserem jsou vytvářeny i značně lepší mechanické vlastnosti svaru.

ZÁVĚR

Diplomová práce se v teoretické části zabývá především lasery a technologií laserového svařování, dále ocelí s vyšší pevností, technologií tailored blanks a zkouškami svarových spojů. V experimentální části byly provedeny svary vytvořené metodou laserového svařování v ochranné atmosféře argonu. Svařování proběhlo rozdílnými výkony pomocí vláknového Yb-YAG laseru. Pro svařování byla zvolena vysokopevnostní ocel Docol 1200 M a nelegovaná ocel DC01. Tato kombinace plechů se používá při technologii tailored blanks v automobilovém průmyslu, přičemž u plechu Docol 1200 M dochází ke zpevňování materiálu ohřevem, který nastává při vypalování barvy na hotové karoserii, a proto se toto zpevnění simulovalo na části vzorků ohřevem v peci a následně byly provedeny zkoušky vlastností svarů. Pro porovnání těchto svarů byla vybrána příčná zkouška tahem, zkouška tvrdosti podle Vickerse, zkouška hloubením podle Erichsena a zkouška makrostruktury a mikrostruktury.

Příčná zkouška tahem prokázala vysokou kvalitu provedených svarů. U příčné zkoušky tahem nedošlo v průběhu zkoušky k přetržení vzorků ve svarovém spoji, ani v tepelně ovlivněné oblasti. K porušení vzorků došlo vždy v základním materiálu DC01. Naměřené hodnoty odpovídají uváděným hodnotám základního materiálu, a to svědčí o dobré kvalitě svaru.

Zkouška tvrdosti podle Vickerse prokázala, že tvrdost svarového kovu je především ovlivněna vysokopevnostním materiálem. Hodnoty tvrdosti svarového kovu se přibližují hodnotám tvrdosti materiálu Docol 1200 M. Tvrdost TOO Docol 1200 M se mírně snížila oproti svaru. U TOO DC01 pak došlo, na rozdíl od svaru, k výraznému snížení tvrdosti.

U zkoušky hloubením podle Erichsena byly vyhodnoceny pouze dva vzorky. U obou vzorků v průběhu zkoušky nedošlo ke vzniku trhliny. První vzorek byl svařen výkonem 1200 W a byl zatěžován z větší části na vysokopevnostní oceli. Zkouška hloubením byla ukončena v maximální hloubce $IE = 7,51$ mm. Druhý vzorek svařený výkonem 1400 W byl zatěžován uprostřed svaru a při zkoušce hloubením došlo k posunutí linie svaru na prohlubni o 2 mm a ke zvrásnění povrchu materiálu DC01. K posunutí linie svaru došlo na úkor materiálu DC01 vlivem rozdílných hodnot tažností materiálů. Zkouška hloubením byla ukončena v maximální hloubce $IE = 9,47$ mm. Výsledky dokazují dobrou kvalitu svaru.

Poslední zkouškou byla kontrola makrostruktury a mikrostruktury svaru, přičemž u zkoušky makrostruktury byly změřeny velmi malé šířky svarů a relativně malé šířky TOO. Z této zkoušky bylo dále zjištěno, že čím vyšší byl zvolen výkon laseru, tím větší byly velikosti šířky svarů. Při výkonu laseru 1200 W došlo k neprovaření kořene svaru (0,21 mm) a při výkonu laseru 1400 W došlo ještě k výraznějšímu neprovaření kořene svaru (0,35 mm). Při hodnocení mikrostruktury základního materiálu Docol 1200 M byla zjištěna jemnozrnná martenzitická struktura a u materiálu DC01 byla zjištěna feritická struktura. Svarový kov je tvořen acikulárním feritem a bainitem.

Na základě výsledků destruktivních zkoušek byl vyhodnocen nejlepší svar, který byl vytvořen výkonem laseru 1000 W. Po zhodnocení výše uvedených zkoušek lze konstatovat, že při svařování kombinace námi zvolených plechů stejné tloušťky můžeme pomocí vláknového laseru vytvořit velmi úzký a kvalitní svar bez přídavného materiálu. Nevýhodou svařování laserem je však vysoká pořizovací cena laserového svařovacího zařízení.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [4]

1. Automotive Steel Definitions. *WorldAutoSteel* [online]. [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://www.worldautosteel.org/steel-basics/automotive-steel-definitions/>
2. BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technologie*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2000, 122 s. ISBN 80-227-1425-9.
3. Budoucnost gravírovaných zařízení. *Svět tisku* [online]. 2009 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: http://www.svettisku.cz/buxus/generate_page.php?page_id=5067
4. *Citace.com: naučte se citovat* [online]. ©2004-2013 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://www.citace.com/>
5. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *Lao* [online]. 2011 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
6. Hluboké svařování. *Trumpf* [online]. [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-svari/hluboke-svarovani.html>
7. HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie I: Nauka o materiálu I. díl*. 3. přepracované vydání. Praha: SCIENTIA, 2005, 266 s. ISBN 80-7183-262-6.
8. Hodnocení kvality svarového spoje: Teoretický úvod k cvičení z předmětu Technologie I. *ČVUT* [online]. 2011 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/def_kontrola_sv.pdf
9. Hodnocení svarových spojů. *Svet svaru* [online]. [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2009-2_Hodnocen%C3%AD%20svarov%C3%BDch%20spoj%C5%AF.pdf
10. Industrial fiber lasers for materials processing. In: *IPG Photonics high power fiber lasers* [online]. ©2012 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://www.ipgphotonics.com/Collateral/Documents/English-US/HP_Brochure.pdf
11. IRB – 2400 – Roboty. ABB. The ABB Group: Automation and power technologies [online]. ©2013 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.abb.com/product/seitp327/657d58e39c804f64c1256efc002860a7.aspx>
12. Kondukční svařování. *Trumpf* [online]. [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://www.cz.trumpf.com/produkty/laserova-technika/reseni/oblasti-pouziti/laserove-svari/kondukcni-svarovani.html>
13. KUBÍČEK, Jaroslav a Libor MRŇA. *Technické aspekty svařování laserem* [online]. [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://svarak.cz/images/stories/pdf/Svarov%C3%A1ni%20laserem.pdf>
14. LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi* [online]. Olomouc, 2010 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/laser.pdf>
15. Laserová technologie. *Lintech* [online]. [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.lintech.cz/co-je-laserova-technologie>

16. Laserové svařování. *Centrum laserových a automatizačních technologií* [online]. [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://laser.zcu.cz/wiki/laserove-svarovani>
17. Lasery, laserové technologie a stroje s laserem. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2006 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem.html>
18. *Metody tváření kovů a plastů: nekonvenční materiály pro automobilový průmysl* [online]. Liberec, 2012. 35 s. Prezentace. [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/mtk/MTK3.pdf
19. Mrňa, Libor. *Přednášky z předmětu speciální technologie svařování*. [soubory pdf] 2012. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
20. Nedestruktivní kontrola materiálu. *Tbb-bike* [online]. [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://www.tbb-bike.cz/articles/nedestruktivni-kontrola-materialu-jak-objevit-prasklinu-na-ramu-vidlici-ci-riditkach/1920>
21. Neionizující formy záření. *Eamos* [online]. [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: http://eamos.pf.jcu.cz/amos/kra/externi/kra_7169/ch08.htm
22. NĚMEČEK, Stanislav. *Využití laseru v průmyslu: MATEX PM*. Plzeň: Tribun EU, 2013. ISBN 978-80-263-0359-6.
23. Ocelový tubusový stožár. *ČSVE* [online]. [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://www.csve.cz/clanky/Ocelovy-tubusovy-stozar/229#prettyPhoto>
24. Pevnější ocel pro silnější zákazníky. *Winfa* [online]. [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.winfa.sk/pdf/domexpevocol.pdf>
25. PODHORA, Jiří. *Destruktivní zkoušení základních materiálů a svarových spojů*. Brno: TDS Brno - SMS, s. r. o., 2005. ISBN 80-903386-4-X.
26. Plyny: neviditelné tajemství zpracování materiálu laserem. *Messergroup* [online]. [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://www.messergroup.com/cz/Tisk/Archiv-2012/Technik_91.pdf
27. Pracoviště a vybavení. *Odbor technologie tváření a kovů a plastů* [online]. [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/pracoviste.htm>
28. PTÁČEK, Luděk a kolektiv. *Nauka o materiálu I*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2003, 516 s. ISBN 80-227-1425-9.
29. SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 4. vydání. Plzeň: TYPOS - Digital Print, 2005, 178 s. ISBN 80-7043-417-1.
30. Strojírenská technologie. *Strojirenstvi* [online]. [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06a_pruznost_pevnost.php
31. ŠEBESTOVÁ, Hana. *Průmyslové lasery pro svařování: studijní texty pro předmět SLO. Fyzika.upol* [online]. [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/sebestova_prumyslove_lasery_pro_svarovani.pdf
32. ŠULC, Jan. *Lasery a jejich aplikace* [online]. 2002 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/lasery.pdf>
33. ŠULC, Jan. *Průmyslové aplikace laserových systémů* [online]. 2004 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://www.plslaser.cz/pdf/prumysl.pdf>

34. Tailored blanks: Basic types. *Arcelormittal* [online]. [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: http://www.arcelormittal.com/automotive/tailoredblanks/TB_products/Basic_types
35. *Technical information: Laser processing: CO₂ laser* [online]. 2007 [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: http://iconmachinetool.com/education/Library_Laser_CO2_Laser.pdf
36. Technologie tailored blanks. *MM Průmyslové spektrum* [online]. 2002 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/technologie-tailored-blanks.html>
37. Ultrazvukové zkoušky výkovků a hutních materiálů. *Triangolo* [online]. [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://www.triangolo.cz/vyrobní-možnosti/ultrazvukove-zkousky-vykovku.html>
38. Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení. *Jhamernik* [online]. [cit. 2013-04-30]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>
39. Výpočet uhlíkového ekvivalentu C_{ekv} . *Svarbazar* [online]. 2006 [cit. 2013-05-19]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/showpage.php?name=cekv>
40. Základní princip laseru a jejich dělení. *Lao* [online]. 2011 [cit. 2013-04-25]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
41. Zkoušení materiálů: defektoskopie. *Testinglab* [online]. [cit. 2013-03-05]. Dostupné z: <http://www.testinglab.cz/defekt05.php>
42. ZRNÍK, Josef, Libor KRAUS, Tasilo PRNKA a Karel ŠPERLINK. *Evropská strategie výrobních procesů: Příprava ultrajemnozrných a nanokrystalických kovových materiálů extrémní plastickou deformací a jejich vlastnosti* [online]. Ostrava: Repronis, 2007, 76 s. [cit. 2013-04-30]. ISBN 978-80-7329-153-2. Dostupné z: <http://www.nanotechnologie.cz/storage/strategie4.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
T	[-]	Tepelně ovlivněný vzorek
TB	[-]	Tailored blanks
TOO	[mm]	Tepelně ovlivněná oblast

Symbol	Jednotka	Popis
A	[%]	Tažnost
E	[J]	Energetický rozdíl mezi hladinami
E₁	[J]	Energie na základní hladině
E₂	[J]	Energie na excitační hladině
F	[N]	Síla
F_m	[N]	Síla na mezi pevnosti v tahu
I	[W·cm ⁻²]	Hustota výkonu
L	[mm]	Vzdálenost zrcadel
P	[W]	Výkon laseru
P_{max}	[W]	Max. výkon pulzu
Q	[J·m ⁻¹]	Vnesené teplo
R_e	[MPa]	Mez kluzu
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
R_{p0,2}	[MPa]	Smluvní mez kluzu
S₀	[mm ²]	Průřez vzorku
Z	[%]	Kontrakce
b	[mm]	Šířka vzorku
d_m	[mm]	Průměr paprsku na výstupu z rezonátoru
f	[Hz]	Frekvence pulzu
h	[J·s ⁻¹]	Planckova konstanta
n	[-]	Přirozené číslo
s	[mm]	Vzdálenost ohniska
t	[mm]	Tloušťka plechu
v	[mm·s ⁻¹]	Rychlost svařování
λ	[mm]	Vlnová délka záření
π	[-]	Ludolfovo číslo
ν	[s ⁻¹]	Frekvence vyzářeného fotonu
τ	[s]	Délka pulzu

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Atest oceli DC01 (plech tloušťky 2 mm)
Příloha 2	Atest oceli Docol 1200 M (plech tloušťky 2 mm)
Příloha 3	Fotodokumentace vzorků po zkoušce tahem
Příloha 4	Makrosnímky po zkoušce tvrdosti podle Vickerse
Příloha 5	Rozbor mikrostruktury vzorků 1, 2, 3 a 5
Příloha 6	Laser YLS 2000 a průmyslový robot IRB 2400-10
Příloha 7	Hydraulický zkušební stroj ZD40/400 kN
Příloha 8	Zkušební zařízení Erichsen F4

Příloha 1 Atest oceli DC01 (plech tloušťky 2 mm)

20.02.2009 13:36:56
C-2008-12337

DENDERA A.S.
KANICE 104
BÍLOVICE NAD SVITAVOU
664 01

Tuto kopii dokumentu kontroly vystavila Ferona, a.s. k zakázce č. 91176, položce č. 250430M, s jednoznačným údajem pro přiřazení č. 46697 na množství 506 KG. Postupy v QMS zaručují spojitost mezi originálem dokumentu a dodaným výrobkem.

Inspection certificate according to EN 10 204-3.1

U. S. Steel Košice, s.r.o.
Vstupní kontrola U. S. Steel
044 54 Košice
SLOVAK REPUBLIC

Code: 728AYJL8/02C
Works Order No: XD860586
Advice No: 08/437503 01
Your order: 394230/L

Ferona, a.s.
Polygrafická 1
108 33 PRAHA 10
Czech republic

METALLURGICAL CERTIFICATE NO: 08/437503 01

Desc. of goods: COLD ROLLED STEEL SHEETS	Size: 2.000 x 1250,0 x 2500,0 mm EN 10131/06
Standard: EN 10130/06	Net Weight: 31 400 kg
Quality: DC01 A5	Spec. No: 60356402

MECHANICAL TEST RESULTS

Coil No / Heat	Yield point Re (Rp)	Tensile strength Rm	Elongation A80	Impact en. KV J	Bend test				
	Max. Min.	Mpa	Mpa	%					
4669730 46697	280	410	28,0						
4669731 46697	193 204	328 333	42,5 41,0						

CHEMICAL COMPOSITION, %

Heat No	C	Mn	Si	P	S						
46697	0,04	0,35	0,01	0,010	0,009						

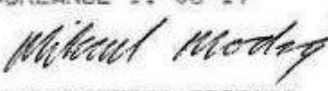
MATERIAL MASS RADIOACTIVITY DOES NOT EXCEED VALUE OF 100 BQ/KG.
Emission: 29.05.2008, 7:31:07 MATERIAL MEETS THE PRESCRIBED REQUIREMENTS.
JOSEF ČERVENÁK, AUTHORIZED INSPECTION REPRESENTATIVE
e-mail: jcervenak@sk.uso.com, tel.: +421-55-6737464

193- 1

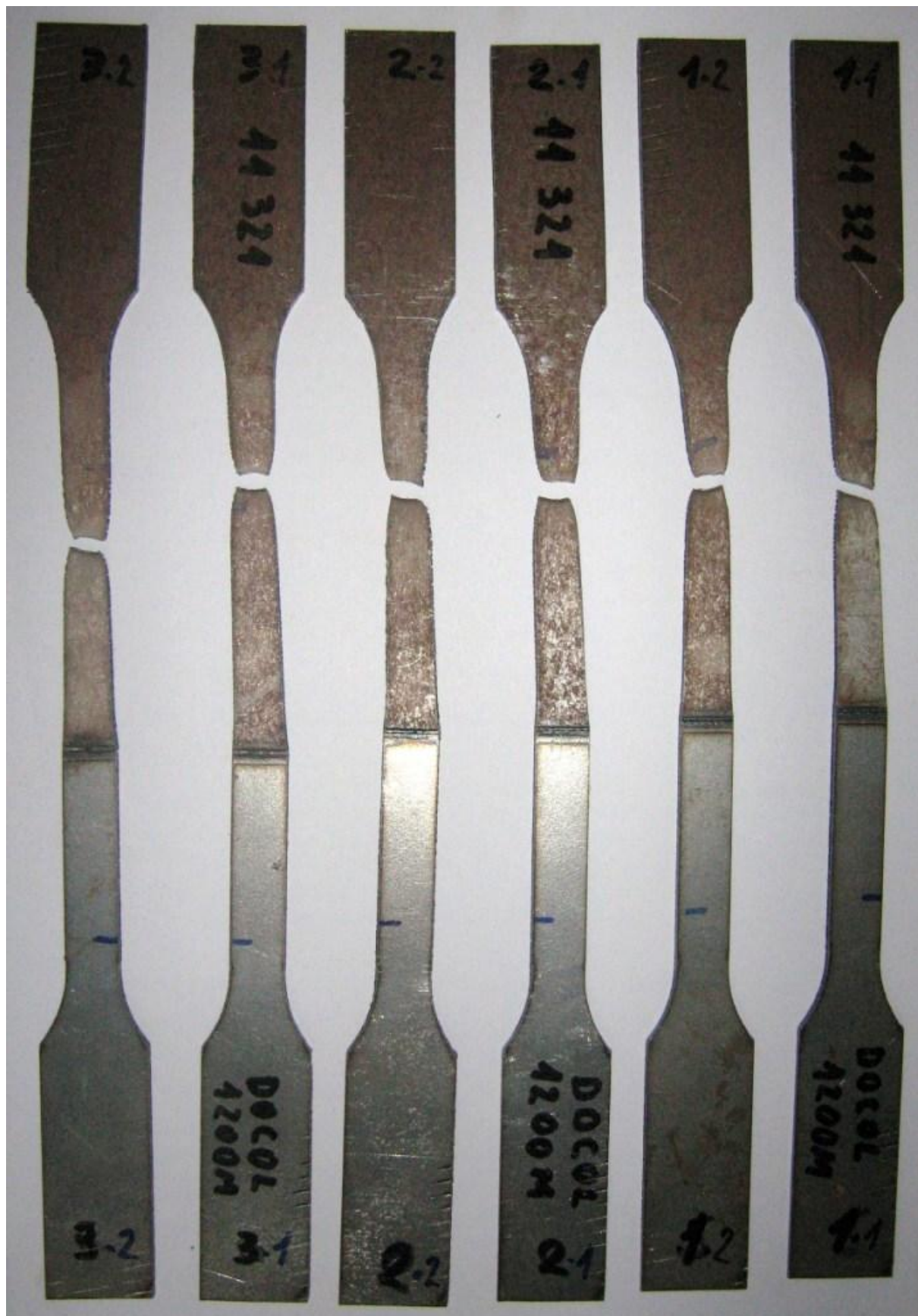
Last Page: 1
P-0/VV/17-12/06-01-12

U. S. Steel Košice, s.r.o.
Vstupní kontrola U. S. Steel
odbor Ověřování křepových změn
a hotové stavy
oddělení Hlavní zprávy
044 54 Košice

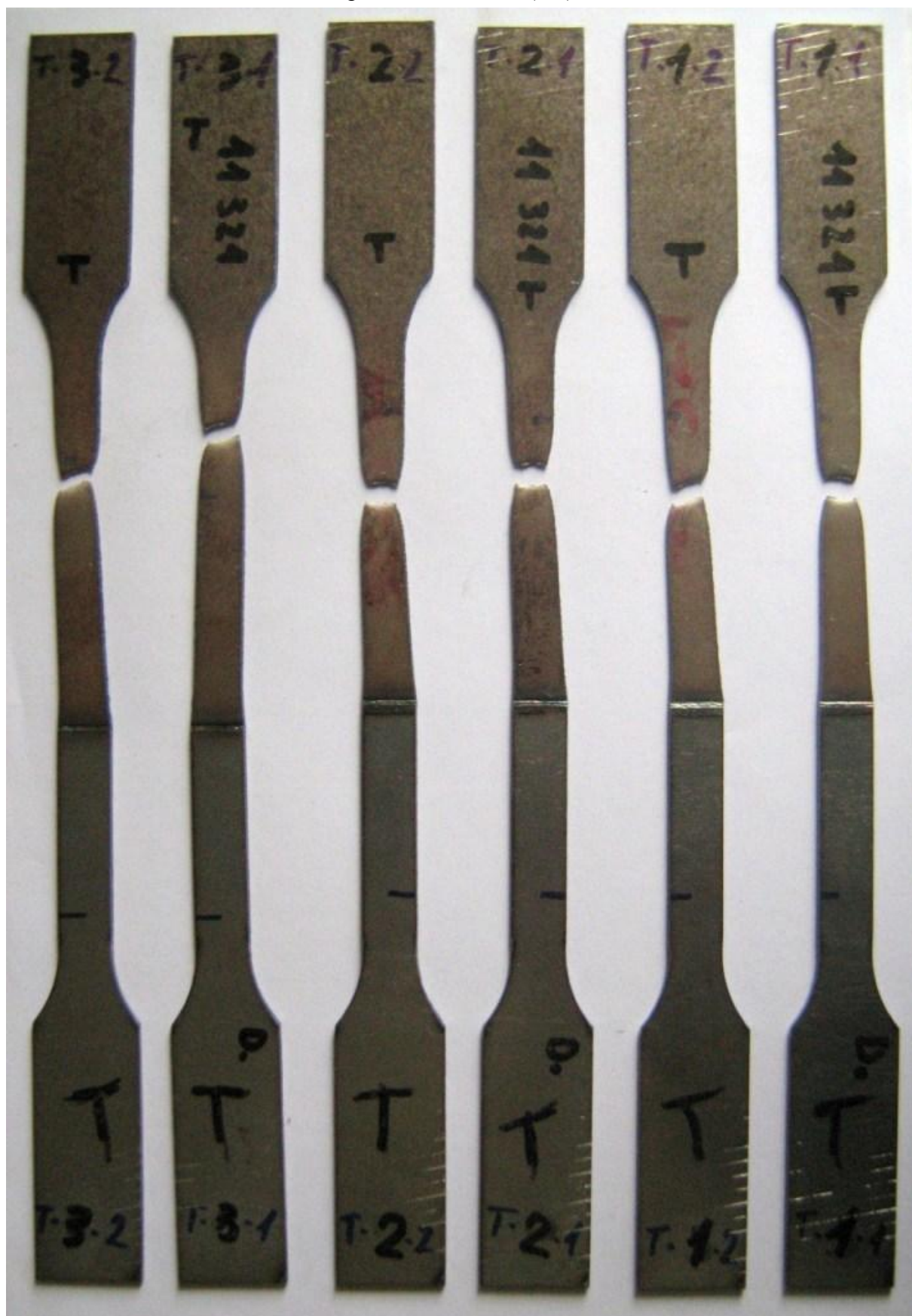
Příloha 2 Atest oceli Docol 1200 M (plech tloušťky 2 mm)

SSAB		Charger/Testing / Mill sheet out / and Provningssintyg / Test certificate															Sider Page				
Intygstyp/Type of certificate		EW 10204-3.1 Inspection cert															1				
Stålsort/Steel grade		DOCOL 1200 M-A										Faktura nr/Invoice No.					702588				
Standard, specification enligt beställning/Standard specification according to the order		110512 Voh11159										Köperens/Buyer's order (Date)					19860				
Produkt/Product		CR cont annealed sheet										GAMA OCEL S.R.O. 1252					CZ-696 02 RATISKOVICE TIECKISKA REP.				
Pos/ Item	Charge/Cast	*p	*p	Provnr/Test No.	Dimension			Kg/Kilos	St/Pieces	*LEV TILLST											
1	25-8483	LD	S	12654118	2000	X	1250	2,00	195	5	R										
Charge/Cast	*Ec	C	Si	Mn	P	S	N	Cr	Ni	Cu	Mo	Al	Nb	V	Ti	B	Desox				
25-8483	38	106	19	158	10	3	4	3	3	1	0	44	15	1	0	3	SI+AL				
		x 10 ⁻²	x 10 ⁻³	x 10 ⁻²	x 10 ⁻³			x 10 ⁻²			x 10 ⁻³			x 10 ⁻²			x 10 ⁻⁴				
Prov nr Test No	*L	RP02 N/mm ²	N/mm ²	RM N/mm ²	A% A80	A% mm															
1265411	T	1095		1252	4																
ANMÄRKNINGAR				ANMÄRKNINGAR								ANMÄRKNINGAR									
Vi intygar härmed att materialet är tillverkat och provat i överensstämmelse med vår ovan angivna order. We hereby certify that the material has been made and tested in accordance with our the above mentioned order.				 Tillverkarens märke/ Mark of the Manufacturer				BORLANGE 11-05-19  DEPT MATERIALTESTING MIKAEL MODIG								Inspektör's stämp					
Postadress/Postal address S-781 84 BORLÄNGE Sweden				Telefon/Telephone 0243-700 00 +46 243 700 00				Telefax 50950 ssab s				* = FÖRKLARINGAR, SE BAKSIDA EXPLANATIONS, PLEASE TURN OVER ERKLÄRUNGEN, BITTE WENDEN									

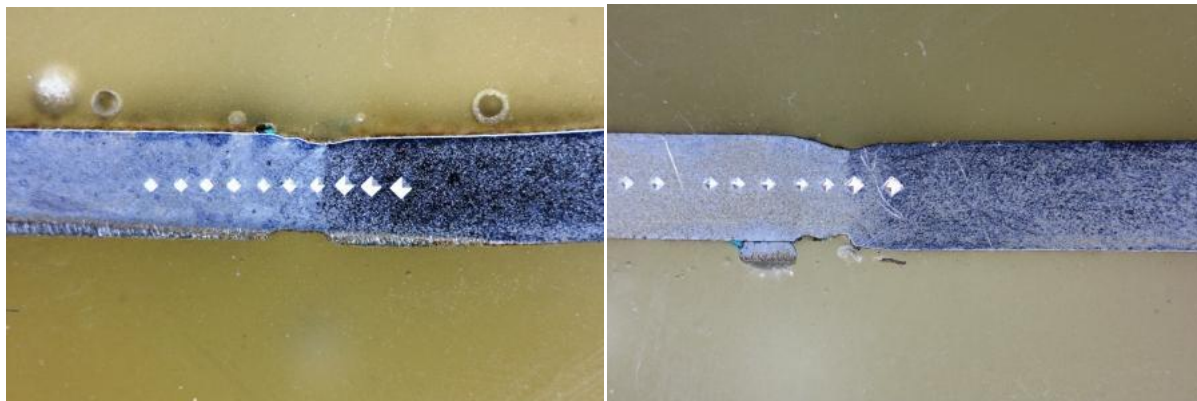
Příloha 3 Fotodokumentace vzorků po zkoušce tahem (1/2)



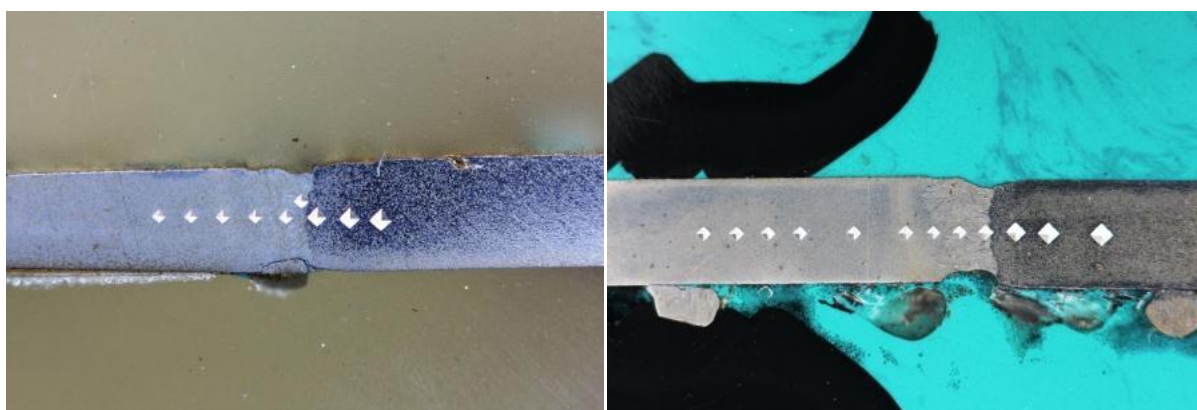
Příloha 3 Fotodokumentace vzorků po zkoušce tahem (2/2)



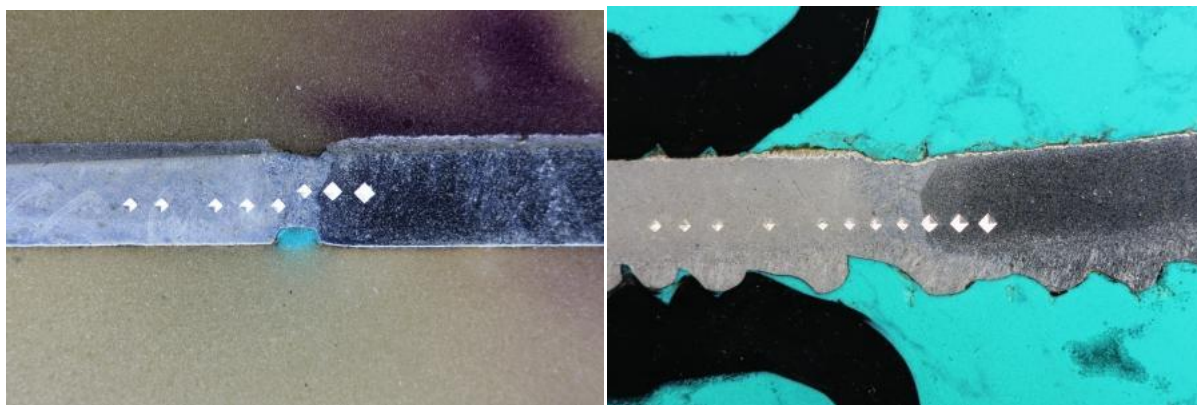
Příloha 4 Makrosnímky po zkoušce tvrdosti podle Vickerse



Materiály svařené výkonem 1 000 W (vzorek 1 a 2)

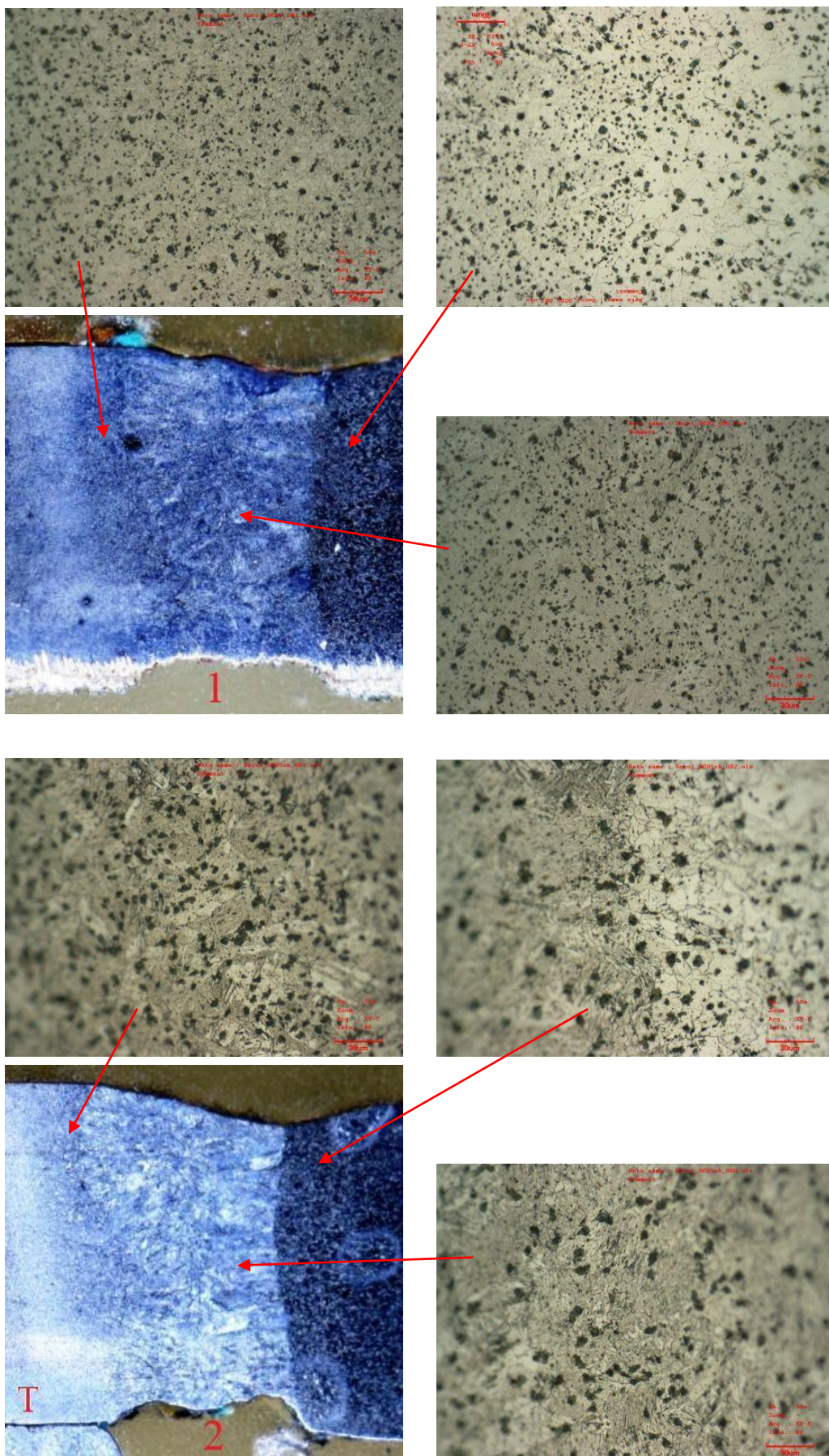


Materiály svařené výkonem 1 200 W (vzorek 3 a 4)

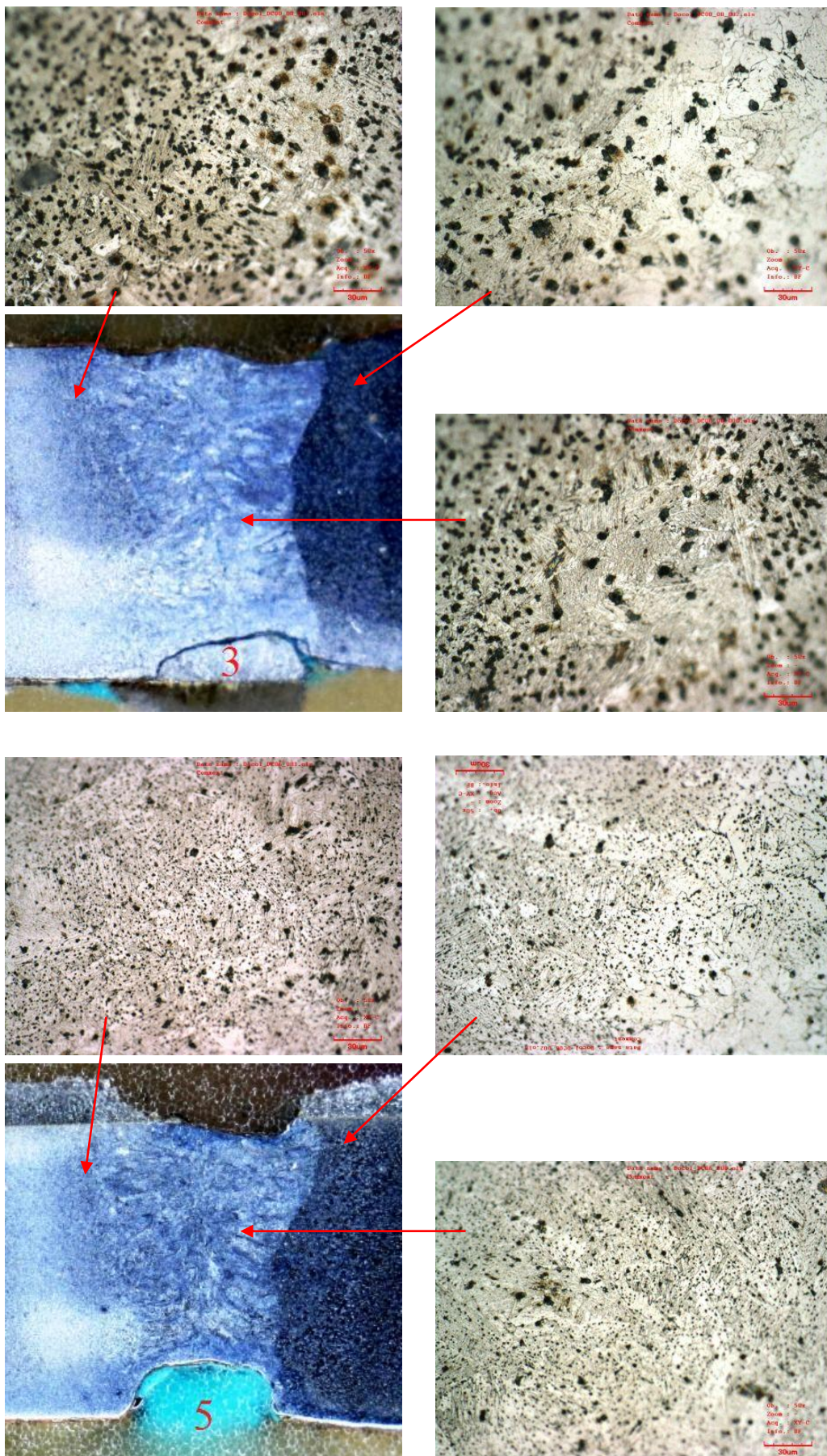


Materiály svařené výkonem 1 400 W (vzorek 5 a 6)

Příloha 5 Rozbor mikrostruktury vzorků 1 (1 000 W) a 2 (1 000 W,T) (1/2)



Příloha 5 Rozbor mikrostruktury vzorků 3 (1 200 W) a 5 (1 400 W) (2/2)



Laser YLS 2 000

Laser YLS 2 000 je vláknový Yb-YAG laser od firmy IPG Photonics. Jde o univerzální a přizpůsobitelný laser různým technologickým účelům. Na pracovišti ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky je možné tento laser použít jako svařovací nebo řezací zařízení. Zdroj je umístěn v kompaktní vzduchem chlazené skříní.

Technické parametry:

- výrobce: IPG Photonics,
- výstupní výkon: 2 kW,
- vlnová délka: (1070 až 1080) nm,
- účinnost: >30 %,
- max. tloušťka řezu: cca 5 mm,
- max. hloubka průvaru: cca 5 mm,
- režim: CW, QCW, SM,
- možnost rozšíření na 4 kW.

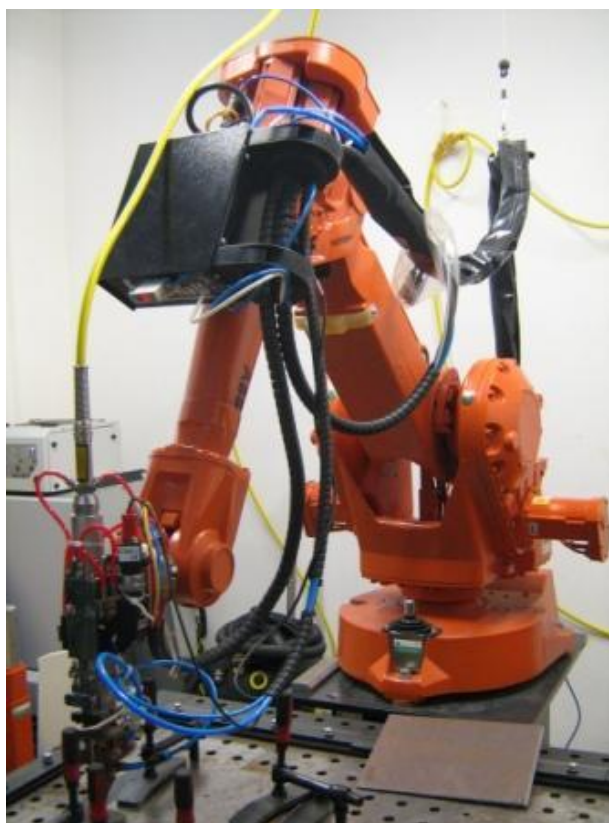


Průmyslový robot IRB 2400-10

Tento robot je nejpoužívanější polohovací robot ve své třídě. Používá se pro řadu technologií. Mezi některé patří např. svařování, řezání, lepení, broušení, montáž, manipulace s materiálem a další použití v průmyslovém odvětví.

Technické parametry:

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



Příloha 7 Hydraulický zkušební stroj ZD40/400 kN [27]

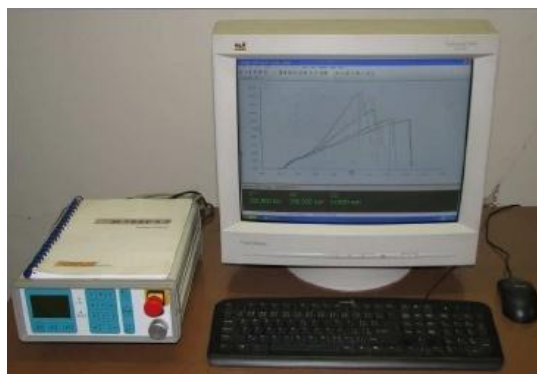
Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

Řídicí jednotka EDC 60 je vysoce precizní elektronické zařízení speciálně konstruované pro řízení servo-hydraulických zkušebních strojů. Je vyráběna speciálně pro aplikace řízení zkušebních strojů a využívají ji přední evropsí výrobci universálních zkušebních strojů. Jednotka je opatřena programem pro zkoušky kovů s možností provádět zkoušky bez PC u jednoduchých aplikací bez použití průtahoměru.

Technické parametry:

- výrobce: HBM/SRN,
- měřicí rozsah: $8 \div 400$ kN,
- chyba měření síly: $1/100$ jmenovitého rozsahu síly, tj. ± 1 % odpovídá třídě přesnosti 1,
- měřicí rozsah měření dráhy: $0 \div 280$ mm,
- chyby měření dráhy: $\pm 0,01$ mm,
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC COM1 pro PC s FIFO s maximální rychlostí 115 kB,
- inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy.

Počítač je vybaven programem M-TEST v.1.7 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10001-2 s vyhodnocením výsledků a grafickým zpracováním.



Řídicí jednotka EDC 60

Příloha 8 Zkušební zařízení Erichsen F4 [27]

Laboratoř tváření plechu a mechanických zkoušek je vybavena zkušebním zařízením pro zkoušku hlubokotažnosti plechů a pásů ERICHSEN F4. Toto zařízení obsahuje snímací jednotku HEIDENHAIN s přesností stanovení prohloubení v 0,001 mm a zařízením Surtronic 3+1 pro měření a vyhodnocení struktury povrchu a vlnitosti plechu s výsledky měření na LCD panelu, které mohou být také převedeny na připojenou tiskárnu nebo počítač k dalšímu vyhodnocení.

