



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

POSOUZENÍ SVAROVÝCH VAD PŘI LASEROVÉM SVAŘOVÁNÍ S ROZMÍTÁNÍM SVAZKU HLINÍKOVÉ SLITINY

ASSESSMENT OF WELD DEFECTS DURING LASER WELDING WITH BEAM WOBBLING OF ALUMINUM
ALLOY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Michal Slíž

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

BRNO 2018

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Michal Slíž**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.**
Akademický rok: 2017/18

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

Posouzení svarových vad při laserovém svařování s rozmítáním svazku hliníkové slitiny

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na základě zhotovených metalografických výbrusů uvést do souvislosti nalezené svarové vady s procesními parametry rozmítaného svazku.

Cíle bakalářské práce:

Osvojit si problematiku laserového svařování materiálu.
Seznámit se z možnosti techniky laserového svařování s rozmítaným svazkem.
Osvojit si základy metalografického vyhodnocení svaru.
Osvojit si metodiku návrhu a vyhodnocení experimentu.

Seznam doporučené literatury:

BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.I: Laserové technológie, 1. vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9.

DULEY W.W.: Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4.

KANNATEY-ASIBU, E.: Principles of Materials Processing, John Wiley&Sons, Inc. Publication, 2009, ISBN 978-0-470-17798-3.

AMBROŽ O., KANDUS B., KUBÍČEK J.: Technologie svařování a zařízení, Ostrava, Zeross, 2001, 395 str. ISBN 80-85771-81-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

SLÍŽ Michal: Posouzení svarových vad při laserovém svařování s rozmítáním svazku hliníkové slitiny.

Práca je zameraná na posúdenie zvarových väd pri laserovom zváraní s rozmietaním zväzku hliníkovej zliatiny. Teoretická časť sa zaoberá štúdiom hlavných typov priemyselných laserov, režimami zvárania a rozborom techniky rozmietania zväzku. Ďalej sú popísané zliatiny hliníku, ich zvárateľnosť, zvarové vady a spôsoby ich vyhodnotenia. V experimentálnej časti je vyhotovených 16 skúšobných zvarov na plechu z hliníkovej zliatiny AlMg3. Nasleduje vyhodnotenie vzniknutých väd a stanovenie optimálnych zváracích parametrov.

Kľúčové slová: laser, zváranie laserom, rozmietanie zväzku, zvarová vada, hliníkové zliatiny

ABSTRACT

SLÍŽ Michal: Assessment of weld defects during laser welding with beam wobbling of aluminum alloy.

This bachelor thesis is aimed on assessment of weld defects during laser welding with beam wobbling of aluminum alloy. Theoretical part deals with study of main types of industrial lasers, laser modes and analysis of beam wobbling technique. Further described aluminum alloys, their weldability, weld defects and methods of their evaluation. In the experimental part, sixteen test welds are made on sheet metal from aluminum alloy AlMg3. This is followed by the evaluation of the defects and determination of optimal welding parameters.

Keywords: laser, laser welding, wobbling, weld defect, aluminum alloys

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

SLÍŽ, Michal. *Posouzení svarových vad při laserovém svařování s rozmítáním svazku hliníkové slitiny*. Brno, 2018. 41s, 10 příloh, CD. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedúci práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Týmto prehlasujem, že predkladanú bakalársku prácu som vypracoval samostatne, s využitím uvedenej literatúry a podkladov, na základe konzultácií a pod vedením vedúceho bakalárskej práce.

V dňa 24.5.2018

.....

Podpis

POĎAKOVANIE

Týmto ďakujem pánovi doc. RNDr. Liborovi Mrňovi, Ph.D za rady a pripomienky týkajúce sa vypracovania tejto bakalárskej práce. Ďalej by som sa chcel poďakovať spoločnosti KRÁLOVOPOLSKÁ, a.s. a jej zamestnancom za uskutočnenie NDT skúšok vzoriek zvarov. V neposlednej rade ďakujem aj svojej rodine za podporu, ktorú mi prejavovali počas celej doby štúdia.

OBSAH

Zadanie

Abstrakt

Bibliografická citácia

Čestné prehlásenie

Pod'akovanie

Obsah

	Str.
ÚVOD	9
1 LASERY V PRIEMYSLE	10
1.1 CO₂ laser	11
1.2 Diskový laser	12
1.3 Vláknový laser	13
1.4 Polovodičový laser	14
1.5 Zváranie laserom	15
1.5.1 Penetračný režim	15
1.5.2 Kondukčný režim	16
1.5.3 Technika rozmietania zväzku	17
2 HLINÍK A JEHO ZLIATINY	19
2.1 Vlastnosti hliníku a jeho zliatin	19
2.2 Triedy hliníku	20
2.3 Zliatiny hliníku a ich zvárateľnosť	21
3 ZVAROVÉ VADY	22
3.1 Pórovitosť	23
3.2 Trhliny za tepla	24
3.3 Trhliny za studena	25
3.4 Prepady	25
3.5 Skúšky zvarových spojov	26
4 EXPERIMENT	30
5 ZÁVERY	41

Zoznam použitých zdrojov

Zoznam použitých symbolov a skratiek

Zoznam obrázkov

Zoznam tabuliek

Zoznam grafov

Zoznam príloh

ÚVOD [1], [2], [3], [4], [5], [6]

Zváranie laserom je v súčasnosti považované za metódu, ktorá dosahuje vysoké rýchlosti zvárania spojené s vysokou štíhlosťou zvaru. Priemyselná výroba kladie stále náročnejšie požiadavky a tie si vyžadujú vývoj ďalších variant základnej metódy laserového zvárania. Jednou z nich je zváranie s rozmietaním zväzku, tzv. wobbling. Táto metóda využíva vychyľovanie laserového zväzku pomocou zrkadiel. Pri wobblingu dochádza okrem posuvnej rýchlosti aj k mikropohybu laserového zväzku pozdĺž trajektórie zvárania. Pomocou riadenia parametrov tohto mikropohybu je možné meniť šírku závaru, mikroštruktúru zvaru a taktiež zmenšiť množstvo vznikajúcich chýb vo výslednom spoji. Avšak nastavenie optimálneho a stabilného procesu zvárania nie je ľahké a v dôsledku nevhodných nastavení dochádza pri zváraní hliníkových zliatin k tvorbe vád, ako sú napríklad póry a trhliny. Preto je dôležité pozorne preskúmať rôzne možnosti nastavení tak, aby bola dosiahnutá čo najmenšia chybovosť.



Obr. 1 Zváranie polovodičovým laserom a wobbling [4], [5], [6]

1 LASERY V PRIEMYSLE [7], [8], [9], [10], [11], [12]

Z prvých písmen anglického popisu princípu činnosti vznikol názov LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – zosilnenie svetla stimulovanou emisiou žiarenia.

Laserom sa rozumie zväzok fotónov, ktorý je neovplyvniteľný elektrickým alebo magnetickým poľom. Vďaka tomu je ho možné používať aj na magnetické materiály a výhodná je aj jeho schopnosť prenikania do škár a úzkych medzier. Všeobecne sa v priemysle používa najmä na zváranie, ale taktiež nachádza využitie aj pri vŕtaní, rezaní, žíhaní alebo značení. Laserové zváranie zaznamenalo postupným rozvojom a zvyšovaním výkonov pevnolátkových laserov pomerne veľký vývoj. Toto bolo spôsobené vyvinutím výkonnejších laserov a ich nových typov, ale aj vďaka používaniu nových moderných materiálov, ktoré sa inými metódami zvárajú ťažko. Veľký vplyv na tento rozvoj mali aj neustále rastúce požiadavky na zvyšovanie produktivity výroby a opakovateľnosti technologického procesu.

Rozdelenie laserov je možné z viacerých hľadísk, ako sú aktívne prostredie, typ budenia aktívneho prostredia, vlnová dĺžka, pracovný režim a typ prevádzky. V priemysle je najrozšírenejšie práve delenie podľa aktívneho prostredia. Rozlišujú sa:

- plynové
- pevnolátkové
- polovodičové

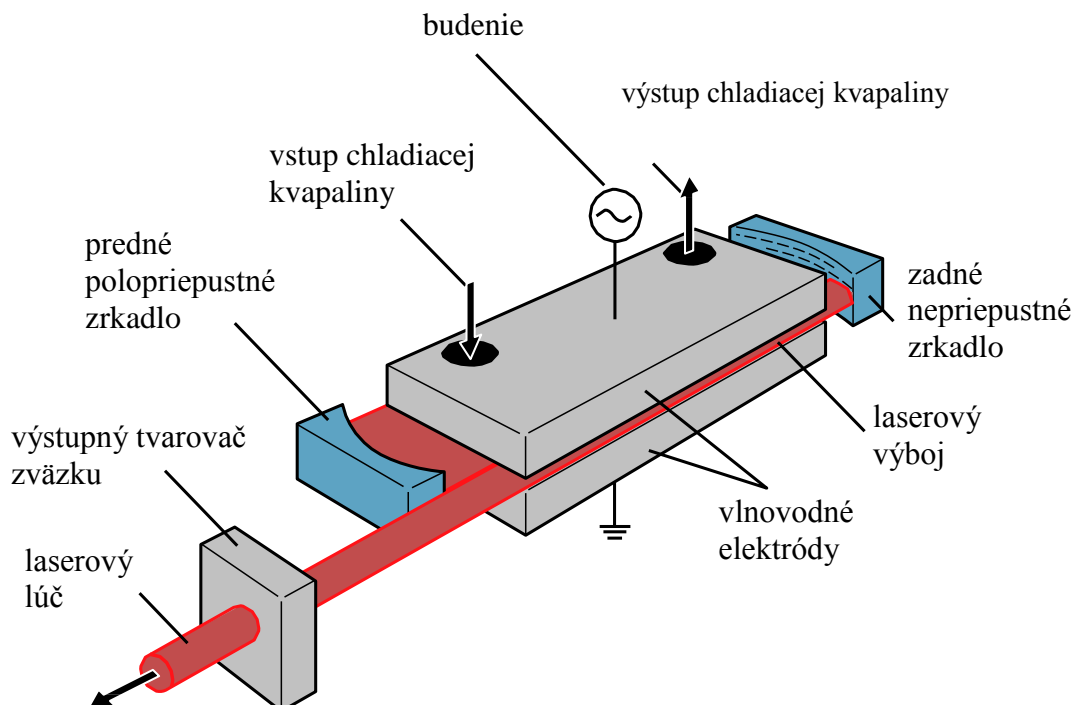
V nasledujúcich kapitolách sú popísané typické príklady jednotlivých druhov. Základné porovnanie parametrov je uvedené v tabuľke 1.

Tab. 1 Typy laserov používaných v priemysle [10], [11]

Laser	Budenie	Režim	Výkon [W]	Efekt. [%]	Typické aplikácie	Životnosť [h]
CO ₂	rádio-frekvenč.	kontinuálny / pulzný	10 – 250 5 000	~ 10	značenie, gravírovanie, rezanie	20 000
	elektrické		~ 20 000		~ 25	
Diskový	laser. diódou	kontinuálny	~ 16 000	~ 15	rezanie, zváranie	~ 10 000
Vláknový	laser. diódou	kontinuálny	~ 80 000	~ 50	rezanie, zváranie	~ 100 000
		kvázi - pulzný	~ 1 200		značenie, gravírovanie, mikroobrábanie	
		pulzný	~ 100		značenie, gravírovanie, mikroobrábanie	
Diódový	elektrické	kontinuálny	~ 10 000	~ 60	zváranie, kalenie, nanášanie vrstiev	~ 15 000

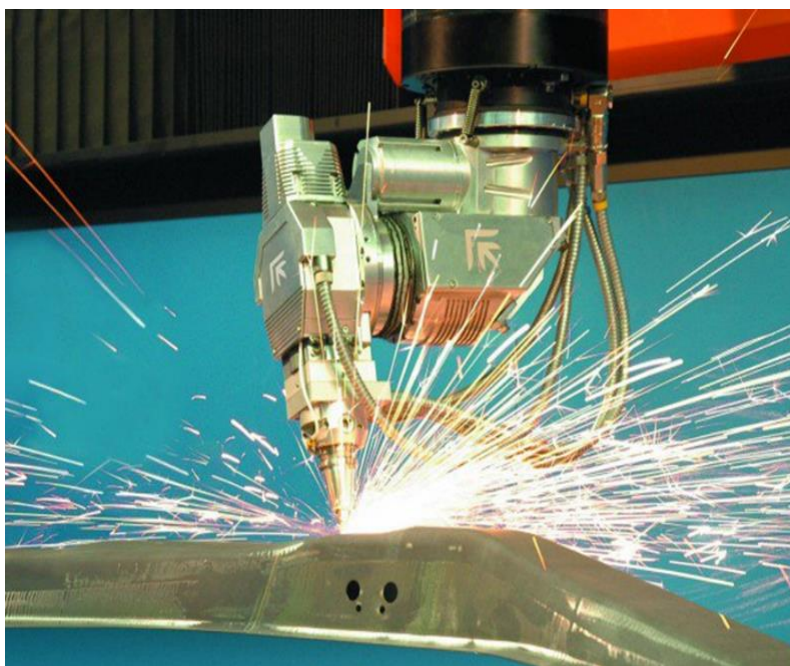
1.1 CO₂ laser [7], [8], [11], [13], [14], [15]

Aktívne prostredie plynového CO₂ laseru je tvorené zmesou plynov: He + N₂ + CO₂, ktoré sú uzatvorené v sklenenej trubici. Najbežnejším pomerom plynov je 82:13,5:4,5 ,



Obr. 2 Schematické znázornenie CO₂ doskového laseru [8]

avšak v praxi sú používané aj iné pomery. Zosilňovací proces začína excitáciou molekúl dusíku, ktoré sa zrazia s molekulami oxidu uhličitého, čo má za následok rezonančné prenesenie energie, vybudenie CO₂ častíc a následné vyžiarenie fotónov. Aby nedochádzalo k zníženiu kontinuálneho žiarenia, je použité hélium, ktoré odoberie oxidu uhličitému excitačnú energiu a ochladzuje aktívne prostredie laseru, vďaka vysokej hodnote tepelnej vodivosti. Obr. 2 schematicky zobrazuje jedno z možných usporiadaní jednotlivých prvkov CO₂ typu. Podľa smeru prúdenia plynu sa rozlišujú lasery s pozdĺžnym prúdením, najčastejšie čerpané doutnavým výbojom a priečnym prúdením s vyšším výkonom, ktoré sú čerpané vysokofrekvenčným výbojom. Na obr. 3 je zobrazený tento typ počas pracovného procesu.

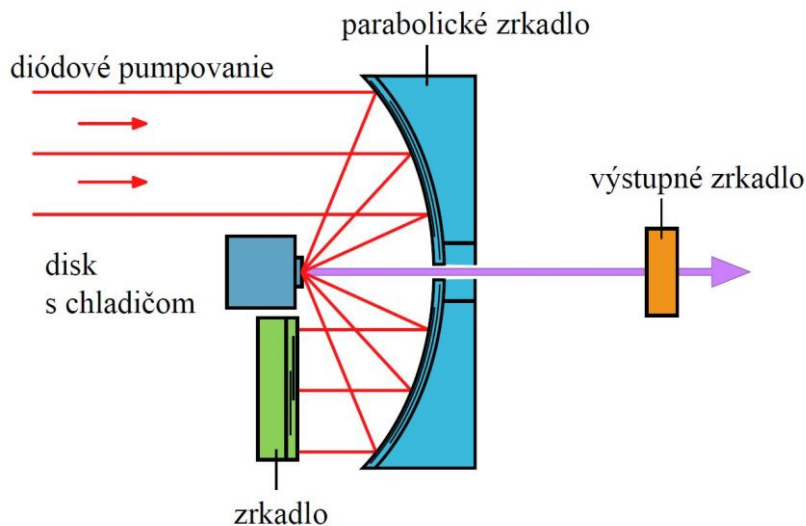


Obr. 3 CO₂ laser v priebehu činnosti [14]

1.2 Diskový laser [8], [10], [16], [17], [18]

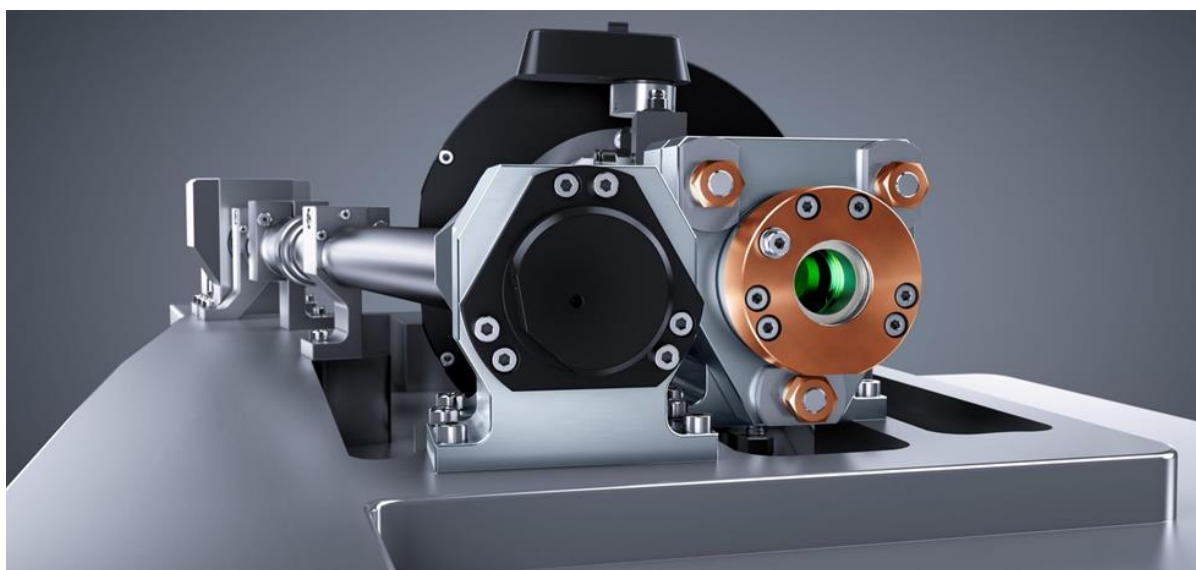
Patrí do skupiny pevnolátkových laserov. Jeho princíp ilustruje obrázok . Aktívne médium je tvarované vo forme tenkého disku s priemerom obvykle do 100 mm. Čerpanie prebieha pomocou viacnásobných dopadov žiarenia diód.

Budiacie žiarenie sa absorbuje s vysokou účinnosťou celou hrúbkou aktívneho prostredia. Parabolické zrkadlo slúži na nasmerovanie čerpaných lúčov na jednu stranu disku, na ktorom následne dochádza k sústreďovaniu veľkého množstva tepla. Nadbytočná tepelná energia je odstraňovaná pomocou kontaktného chladiča, umiestneného na druhej strane disku. Chladenie je vďaka tomu intenzívne



Obr. 4 Schematické zobrazenie diskového laseru [8]

a rovnomerné, čo vedie k homogénemu rozdeleniu intenzity vo zväzku. Vznikajúci lúč následne vystupuje cez otvor v strede parabolického zrkadla, vid' obr. 4. Vzhľadom k tomu, že výsledné tepelné gradienty sú rovnobežné s osou výstupného lúča, je minimalizovaný účinok tzv. thermal lensing-u. Kvalita takéhoto lúča je štyrikrát lepšia v porovnaní s tyčovým laserom budeným diódami. Tým je možné dosiahnuť menšiu sústredenú veľkosť lúča, čoho výsledkom je vyššia hustota výkonu a tak aj možnosť dosiahnutia vyššej rýchlosti procesu. Nezávislosť kvality zväzku na výkone laseru umožňuje aj veľmi úzkym lúčom zvärať materiály s veľkými hrúbkami a s nižším tepelným ovplyvnením. Obr. 5 je znázornením možnej podoby diskového laseru.

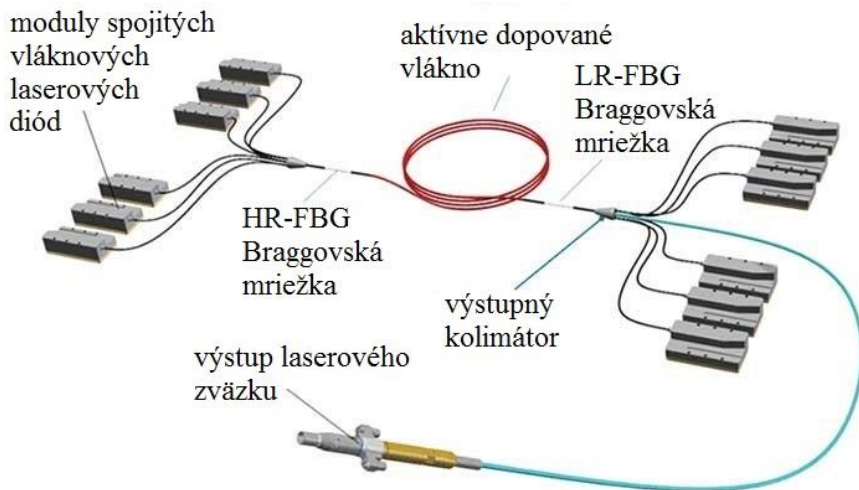


Obr. 5 3D model diskového laseru [18]

1.3 Vláknový laser [19], [20], [21], [22], [23], [24], [25]

Je najmodernejším variantom štandardného pevnolátkového laseru. Na rozdiel od ostatných variant slúži v tomto prípade ako aktívne prostredie dlhé optické vlákno, dopované iónami prvkov vzácnych zemín, ako napríklad Erbium (Er_{68}), Túlium (Tm_{69}), alebo Ytterbium (Yb_{70}).

Čerpanie s vysokou účinnosťou je uskutočňované kolmým žiarením laserových diód na prierez aktívneho vlákna, ktoré sa následne ďalej šíri pomocou odrazov na vnútorných stranách plášťa vlákna. Braggovské mriežky sú rezonátorom laseru a plnia funkciu zrkadiel. Jedna z nich HR-FBG je reflektorom a druhá LR-FBG slúži na vycloňovanie laseru. Namiesto nich môžu byť použité aj dichroické zrkadlá. Lúče následne prechádzajú výstupným kolimátorom. Jednotlivé časti laseru zobrazuje obr. 6.



Obr. 6 Základné časti vláknového laseru [24]

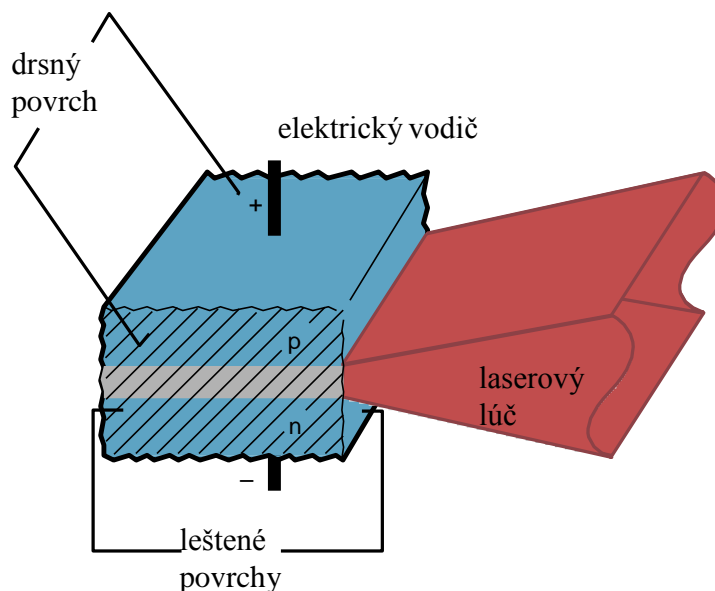
Vďaka geometrii aktívneho prostredia je dostačujúcim vzduchové chladenie. Pre väčšinu priemyslových aplikácií, akou je napríklad zobrazená na obr. 7, je dostatočný výkon jedného vlákna, ale v prípade požiadaviek na vyššie výkony je možno skombinovať niekoľko výstupov vláknových laserov.



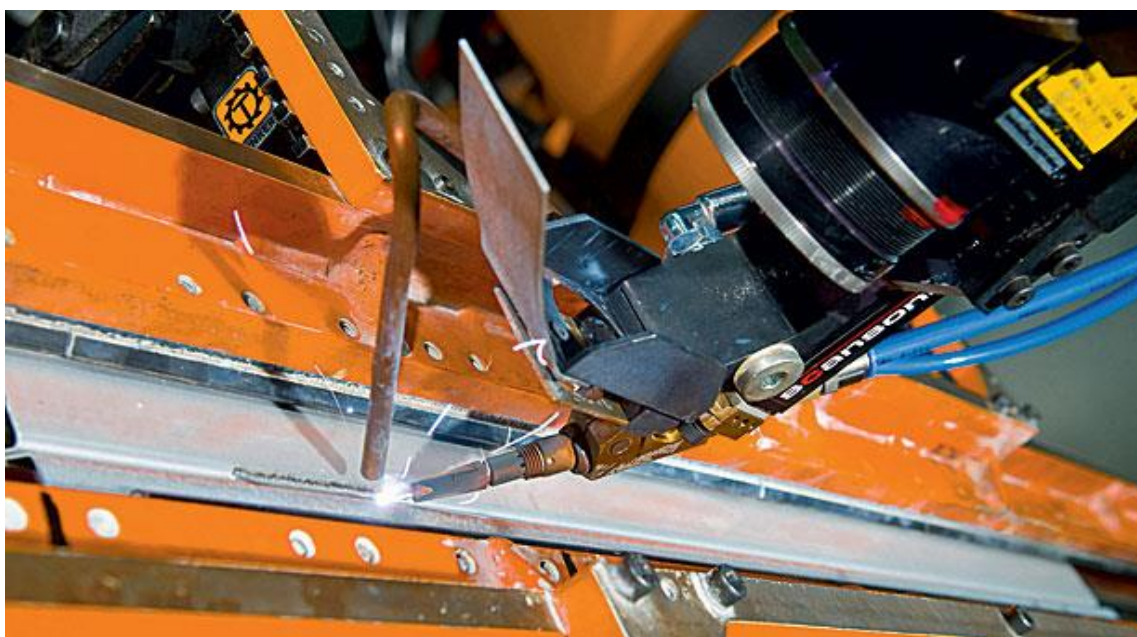
Obr. 7 Reálna aplikácia vláknového laseru [25]

1.4 Polovodičový laser [8], [15], [20], [22], [26], [27]

Diódové, nazývané aj polovodičové lasery patria v súčasnosti k najrozšírenejším druhom laserov, nie len pre ich veľkú rôznorodosť priameho použitia, ale aj vzhľadom k používaniu vo funkcií čerpadiel pre pevnolátkové lasery. Aktívne prostredie laserovej diódy je polovodič, jedná sa teda o dvojvrstvový laserový systém. Horná časť je kondukčným pásmom a spodná časť valenčné pásmo, ako zobrazuje obr. 8. Lúč je emitovaný z medzery, ktorá je medzi nimi a šíri sa v rovine PN prechodu a zosilňuje sa opakovanými odrazmi. Pre začiatok vyžarovania je potrebný dostatočný zisk energie vznikajúcej rekombináciou elektrónov medzi pásmami polovodičového materiálu.



Túto rekombináciu je možné budiť aj externe pomocou prúdu elektrónov. Avšak v priemyselnej praxi sa vo väčšine prípadov používajú lasery budené vnútorne PN prechodom. Leštené čelné plochy, kolmé k PN prechodu, tvoria tzv. Fabry-Pérotov rezonátor. Zväzok, ktorý z neho vystupuje má veľkú divergenciu, preto sú na stene bloku umiestnené valcové mikrošošovky, aby ho kolimovali. Na obr. 9 je znázornený laser používaný v spoločnosti Audi na zváranie štruktúrnych hliníkových komponentov áut.



1.5 Zváranie laserom [1], [2], [7], [28]

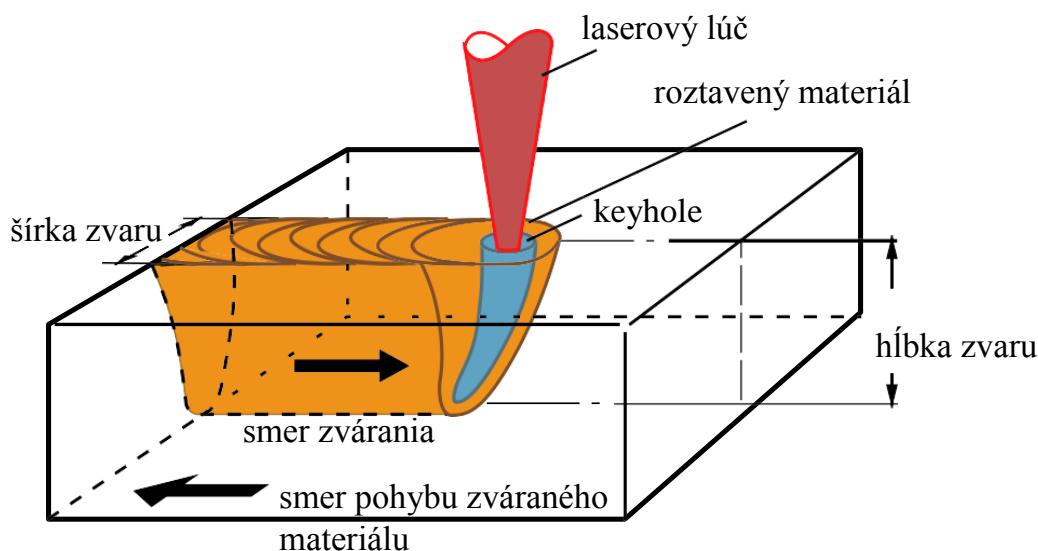
Zváranie sa zaraďuje k veľmi náročným využitím laserového lúča. Je to ale veľmi populárny proces spájania materiálu, vyznačujúci sa vysokou hustotou energie a flexibilitou, z čoho vyplývajú výhody ako vysoká rýchlosť zvárania, menšia tepelne ovplyvnená oblasť (TOO), malá deformácia a jednoduchosť automatizácie. Vďaka týmto vlastnostiam je vhodný pre použitie u hliníkových zliatin. Konkrétne minimalizácia zvarovej šírky a TOO predstavujú výhodu pri aplikácií u precipitačne vytvrdených hliníkových zliatin, ktoré majú problém so zmäkčením v tepelne ovplyvnenej oblasti. Avšak ťažkosť zvárania hliníkových zliatin laserom spočíva v ich vysokej reflexnosti voči laserovému lúču, tvorbe pórovitosti a vyparovaní horčíka a zinku vo zvarovom kove. Ďalšou nevýhodou tejto metódy je, že pri veľmi vysokých rýchlostiach ochladzovania dochádza k vzniku vytvrdených štruktúr, ktoré zvyšujú tvrdosť, znižujú plasticosť (tvárnosť) zvarového spoja a tepelne ovplyvnenej oblasti a zvyšujú úroveň zvyškových napätí.

Laserové zváranie, ako vzájomné pôsobenie laserového žiarenia a povrchu materiálu, možno rozdeliť na dva režimy:

- penetračný
- kondukčný

1.5.1 Penetračný režim [8], [9], [22], [26], [29], [30]

Pri veľkých hodnotách hustoty výkonu okolo 10^6 W/cm^2 a väčších sa časť materiálu obrobku odparí a vznikne paroplynový kanál, tzv. kľúčová dierka, v anglickej literatúre označovaná ako keyhole, ktorá je obklopená roztaveným kovom. Roztavený materiál vyplní túto dutinu pri priechode laserového lúča pozdĺž spoja. V keyhole sa vyskytuje buď para, alebo plazma,



Obr. 10 Penetračný režim zvárania [8]

prípadne oboje. Na obr. 10 je zobrazený schematický popis procesu. Ako je viditeľné, v prípade sprievodného pohybu materiálu, dochádza k zakrivovaniu keyhole. V základnom stave, keď k tomu pohybu nedochádza, je táto dutina zvislá a kolmá na povrch.

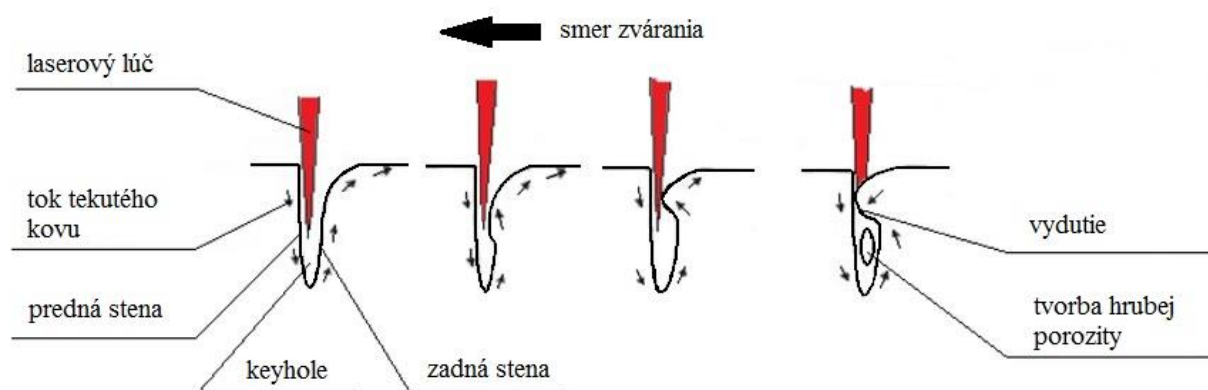
Energia laseru, ktorá vstupuje do vznikajúcej dutiny, sa postupne prenáša hlbšie do materiálu, čo má za následok veľmi vysokú absorpciu, viac ako 90%.

Penetračný režim umožňuje vytvárať veľmi úzke zvary a tiež zvary s hlbokým prienikom. Táto funkcia ho robí atraktívnym pre opracované komponenty a komponenty leteckých a raketových motorov, pretože následná deformácia je minimálna.

Ak je laserový lúč nehybný, spôsobí to kontinuálne odparovanie materiálu a dutina rastie. Za takýchto okolností nemožno dosiahnuť rovnovážny stav a keyhole by sa nakoniec zrútila. Sily, ktoré zvyšujú tendenciu k tomuto procesu sú nasledovné:

- povrchové napätie na rozhraní medzi roztaveným kovom a parou alebo plazmou
- hydrostatický tlak roztaveného kovu
- hydrodynamický tlak roztaveného kovu

Na obr. 11 je zobrazený spôsob, akým dochádza k zrúteniu a následnej tvorbe pórov.



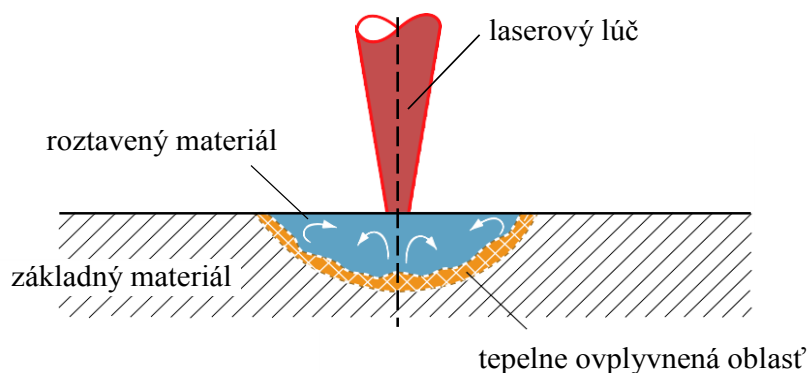
Obr. 11 Vznik zrútenia keyhole v procese zvarania [29]

Preto je vhodné použitie pohyblivého lúča, ktorý umožňuje dosiahnutie ustálených podmienok. Dutina sa pohybuje spolu s lúčom, pri rýchlosti ktorá je ním určená. Pretože je potrebné dostatočné množstvo pary, aby sa zabránilo zrúteniu, je potrebná minimálna rýchlosť posunu v ustálenom stave. Materiál sa neustále pohybuje z prednej do zadnej časti, čo sa môže prejavovať buď prietokom roztaveného materiálu okolo dutiny alebo ako pary ňou prechádzajúce prípadne cez roztavený materiál.

V prípade zvarovania materiálov s vysokou odrazivosťou, ako je napríklad hliník, je stabilita keyhole kritickým faktorom. Je to čiastočne z dôvodu ich tendencie k rozstrekovaniu a u niektorých zliatin hliníku sa prejavuje aj vysoká úroveň pórovitosti, spôsobenej viskozitou materiálu a povrchovým napätím taveniny.

1.5.2 Kondukčný režim [8], [9], [26], [30], [31]

Zváranie v tomto režime sa zvyčajne vyskytuje pri hustote energie nižšej ako 10^6 W/cm^2 , pričom dochádza k minimálnemu odparovaniu obrobku. Používa sa v prípade potreby zabezpečenia estetických vlastností zvaru, vzhľadom k veľmi stabilnému priebehu procesu. Na obr. 12 je znázornený princíp kondukčného režimu.



Obr. 12 Kondukčný režim [8]

Tepelný výkon lúču je najprv rozložený na povrchu, čo pri jeho postupnom nahromadení smeruje k následnému prenášanju tepelným vedením do okolia obrobku. Preniknutie je teda v podstate riadené vedením tepla od počiatočného bodu kontaktu, to znamená povrchu obrobku, čo spôsobí zahriatie malej plochy povrchu nad bod tavenia. Prúdenie tiež zohráva úlohu pri vytvorení zvarového bazénu z roztaveného materiálu. Jeho tvar je ovplyvnený prietokom vo zvarovom bazéne a prítomnosťou povrchovo-aktívnych látok. Výsledná podoba zvaru je plytšia so širšou tepelne ovplyvnenou oblasťou v porovnaní s tou, ktorá sa vytvára pri hlbokom penetračnom režime.

1.5.3 Technika rozmiatania zväzku [3], [32], [33], [34]

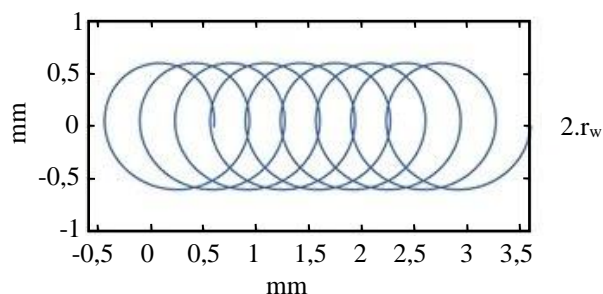
Laserové zváranie s rozmiatánim zväzku, ďalej označené ako wobbling (prevzaté označenie termínu z anglického jazyka) je jednou z najnovších pokročilých metód zvárania. Jednou z veľkých výhod je možnosť dosiahnutia vyšších rýchlostí zvárania v porovnaní s inými priemyselne využívanými metódami zvárania materiálov.

V prípade takéhoto typu zvárania sa spoj vytvára pomocou dvoch pohybov laserového lúču. Prvým je vlastná trajektória zvaru, druhým je mikropohyb lúču, vytvorený pomocou vychýľovacích zrkadiel, po triviálnej krivke (napr. priamke, kružnici a pod.). Takto vznikne napríklad hustá špirála vytvorená kombináciou kružnice a vlastného lineárneho pohybu. Tento spôsob umožňuje umelo zvyšovať šírku zvaru (zmenou priemeru rozmiatacej kružnice r_w) a taktiež meniť mikroštruktúru a ďalšie vlastnosti výsledného zvaru, pretože lúč laseru zvarový kúpeľ "mieša".

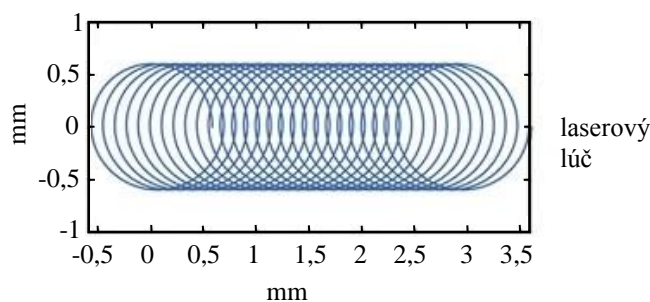
Optimalizácia pri wobbling-u je zložitejšia, vzhľadom k výskytu viacerých procesných parametrov. Jedným z hlavných je frekvencia rozmiatania f_w . Je označovaná ako faktor, ktorý najviac ovplyvňuje vlastnosti geometrie zvaru, avšak jej vplyv na mikrotvrdosť zvaru je nevýznamný. Obr. 13 zobrazuje rozdiel, ktorý spôsobí zmena frekvencie rozmiatania.

Veľmi významná je aj energia laseru, resp. jeho výkon, ktorý je nutné zvyšovať v prípade nutnosti použitia väčšieho priemeru rozmiatania r_w . Táto energia všeobecne vplyva pozitívne, avšak okrem vplyvu na mikrotvrdosť, na ktorú má naopak priaznivý vplyv počet rotácií lúču počas zvarového procesu. Množstvo otočení taktiež dobre vplyva aj na šírku zvaru a tepelne ovplyvnenú zónu. Bolo zistené, že na tieto dve vlastnosti má podstatne kladný účinok aj zaostrená poloha ohniska vzhľadom k povrchu materiálu.

$v = 10 \text{ mm/s}, r_w = 0,6 \text{ mm}, f_w = 30 \text{ Hz}$



$v = 10 \text{ mm/s}, r_w = 0,6 \text{ mm}, f_w = 90 \text{ Hz}$





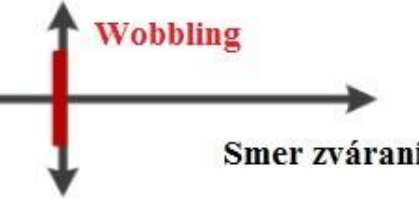


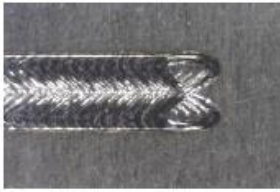
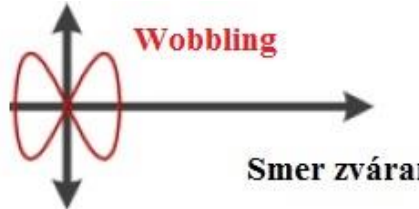
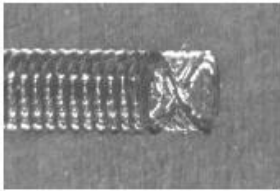
Obr. 13 Vplyv zmeny frekvencie rozmiatania [33]

Amplitúdu a frekvenciu je možné nezávisle riadiť prostredníctvom riadiaceho systému umožňujúceho väčšiu flexibilitu pri stabilizácii taveniny v keyhole počas procesu zvarania.

Tento typ riadenia je použitý v priemyselne dostupných zvaracích hlavách, ktoré poskytujú štyri základné programovateľné tvary wobblingu.

Podľa týchto tvarov sú nazvané jednotlivé režimy, ktoré je možné vidieť v tabuľke 2.

Tab. 2 Režimy zvarania metódou wobbling [34]

Režim wobblingu	Schematické znázornenie	Vzorka zvaru
Kruhový		
Lineárny		
Osem		
Nekonečno		

2 HLINÍK A JEHO ZLIATINY [9], [35], [36]

Hliník patrí medzi kovové prvky. Vyznačuje sa strieborným sfarbením a je tretím najrozšírenejším prvkom na Zemi. V prírode sa nachádza v 250 rôznych mineráloch, ako napríklad korund, kaolinit, andaluzit, nefelín, a najvýznamnejší pre výrobu je bauxit. Využitie tohto kovu je v takmer každej priemyselnej oblasti.

Pri zváraní sa delí hliník do dvoch skupín:

a) technický hliník (s minimálnym obsahom Al 99%)

b) zliatiny hliníku (s minimálnym obsahom legúr viac ako 1%)

Kvalita technického hliníku závisí najmä na jeho čistote, čím menej obsahuje nečistôt, tým je vyššia a aj jeho fyzikálne vlastnosti sú lepšie. Prehľad vybraných vlastností hliníku sú uvedené v tabuľke 3.

Zliatiny hliníku je možné rozdeliť na zlievarenské a zliatiny vhodné pre tvárnenie. Zlievarenské zliatiny sa vyznačujú vyšším obsahom legujúcich prvkov a sú vhodnejšie pre technológiu odlievania.

Tab. 3 Prehľad vlastností hliníku [35]

Vlastnosti	Hodnoty
Chemické značenie	Al
Atómové číslo	13
Farba	striebrobiela
Mriežka	K2 plošne centrovaná kubická
Parameter mriežky	$a = 0,404958 \text{ nm}$
Hustota	$2,6989 \text{ g.cm}^{-3}$ (pri 20 °C)
Objemová zmena pri kryštalizácii	6,5 %
Spalné teplo	31,05 MJ/kg
Teplota supravodivosti	1,2 K
Teplota tavenia	660,4 °C
Teplota varu	2494 °C
Tepelná vodivosť	247 W.m^{-1} (pri 25 °C)
Elektrická vodivosť	62 % IACS (Al 99,8) 65 – 66 % IACS (Al 99,999+)
Elektrický odpor	$26,55 \text{ n}\Omega.\text{m}$ (Al 99,8 pri 20 °C) $26,2 \text{ n}\Omega.\text{m}$ (Al 99,999+ pri 20 °C)

2.1 Vlastnosti hliníku a jeho zliatin [35], [37]

Hliník a aj jeho zliatiny majú dobré fyzikálne, mechanické, chemické a technologické vlastnosti. Sú odolné voči korózií a je možné ich tvárniť za tepla aj za studena, čím sa zvyšuje ich pevnosť. Niektoré zliatiny vhodné k tvárneniu sa nevytvrdzujú z dôvodov malého efektu vytvrdenia (napríklad zliatiny typu Al-Mn) a tiež preto, že malé zvýšenie pevnosti by bolo sprevádzané veľkým poklesom ťažnosti (napríklad zliatiny typu Al-Mg). Kvôli vysokej hodnote spálneho tepla sa používa pri zváraní.

Pri laserovom zváraní sú dôležité najmä:

- **Tepelná vodivosť hliníku**

Tepelná vodivosť, označovaná aj ako súčiniteľ tepelnej vodivosti λ vyjadruje schopnosť látky viesť teplo. V prípade hliníku je jej hodnota vysoká, t.j. $247 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ (pri $25 \text{ }^\circ\text{C}$). Tento údaj značí, že hliníkový materiál je dobre vodivý.

- **Odrazivosť (reflektivita)**

Odrazivosť patrí medzi optické vlastnosti materiálu. Od jej veľkosti závisí množstvo odrazených lúčov napr. laserového žiarenia. Reflektivita materiálu je závislá na frekvencií dopadajúceho žiarenia a elektrickej vodivosti materiálu. Neodrazené lúče sú materiálom absorbované a spôsobujú ohriatie povrchovej vrstvy a následné natavovanie a odparovanie materiálu z ohriatej oblasti. Zníženie odrazivosti je možné dosiahnuť zdrsnením povrchu, povrchovou úpravou látkou s vyššou hodnotou absorpcie alebo ohrevom povrchu.

2.2 Triedy hliníku [35], [38]

Pre zváranie sa používajú predovšetkým zliatiny hliníku vhodné pre tvárnenie. Sú charakteristické menším obsahom prísadových prvkov. Tieto zliatiny je možné zaradiť do tried podľa EN 573-1. Norma zaraďuje jednotlivé zliatiny podľa hlavného legujúceho prvku, ako je uvedené v tabuľke 4.

Tab. 4 Rozdelenie zliatin hliníku [35]

Hlavný legujúci prvok	Označenie série	Vlastnosti
Hliník (minimálna čistota 99%) – Al	1000	vysoká tepelná a elektrická vodivosť, vysoká korózna odolnosť
Meď – Cu	2000	malá korózna odolnosť, vysoká pevnosť po tepelnom spracovaní
Mangán – Mn	3000	tepelne nespracovateľné, vyššia pevnosť v porovnaní s čistým Al do obsahu 1,5% Mn
Kremík – Si	4000	vysoký obsah Si (do 12%), použitie v zväracích drôtoch
Horčík – Mg	5000	vyššia pevnosť, podobne ako 3000, pre spevnenie je potrebné menšie množstvo Mg (0,8%)
Horčík a kremík – Mg, Si	6000	Vhodná pre tepelné spracovanie, použitie na tvárnenie a zváranie, odolnosť voči korózií
Zinok – Zn	7000	po tepelnom spracovaní a pri prítomnosti Mg najvyššia pevnosť zo všetkých hliníkových zliatin, malá korózna odolnosť
Iné prvky	8000	Legujúce prvky najmä striebro (Ag) a lítium (Li)
Nepoužitá skupina	9000	-

2.3 Zliatiny hliníku a ich zvárateľnosť [37], [39], [40], [41]

Základnými metódami zvárania hliníku sú metódy MIG (Metal Inert Gas) a TIG (Tungsten Inert Gas). Tieto technológie využívajú pre vznik spoju prídavný materiál. U metódy MIG je prídavným materiálom priamo kovová elektróda a u metódy TIG sa prídavný materiál vkladá do elektrického oblúku medzi wolfrámovú elektródu a základný materiál. Ďalšími používanými metódami sú plazmové, laserové a zváranie elektrónovým lúčom. Pre laserové zváranie dosahujú najlepšiu zvárateľnosť čistý hliník a zliatiny typu AlMn a AlMg.

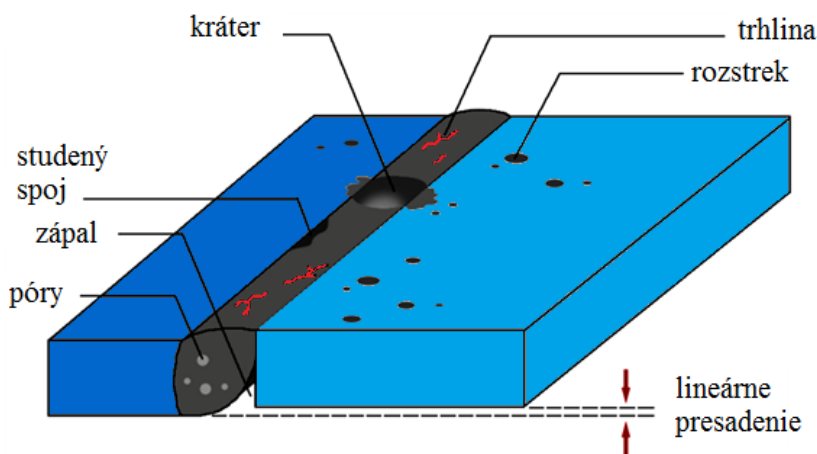
Zvárateľnosť hliníkových zliatin je ovplyvnená viacerými činiteľmi, ktoré vychádzajú z ich vlastností. K najdôležitejším patrí veľká afinita hliníku ku kyslíku, ktorá zapríčiňuje tvorbu oxidickej vrstvy (vzniká Al_2O_3 – oxid hlinitý) na povrchu materiálu, ktorá má vysokú teplotnú stabilitu (teplota tavenia $2\ 054\ ^\circ C$) a vyššiu hustotu ($3,96\ g.cm^{-3}$) oproti základnému materiálu ($2,7\ g.cm^{-3}$). Tieto zlúčeniny zabraňujú metalickému spojeniu základného a prídavného materiálu. Veľký koeficient lineárnej rozťažnosti spôsobuje veľké napätie a deformácie, ktoré sú častou príčinou vzniku trhlín. Ďalší faktor je veľká citlivosť niektorých zliatin na ohrev, čo vyvoláva v TOO precipitačné procesy, ktoré znižujú mechanické vlastnosti a odolnosť proti korózií. Prítomnosť nečistôt podmieňuje vznik nízkotavitelných eutektík, ktoré vytvárajú podmienky pre vznik trhlín za tepla. Stav materiálu pred zváraním výrazne ovplyvňuje mechanické vlastnosti v tepelne ovplyvnenej oblasti.

3 ZVAROVÉ VADY [28], [42], [43], [44], [45], [46], [47]

Rovnako ako iné technológie zvarovania, aj zvarovanie hliníkových zliatin laserovým lúčom má svoje vlastné nedostatky. Pórovitosť, praskanie v dôsledku zmršťovania a tepelného namáhania, zvarové inklúzie a odparovanie zliatinových prvkov, vid' obr. 14, sú podstatnými poruchami, ktoré pri tomto procese vznikajú.

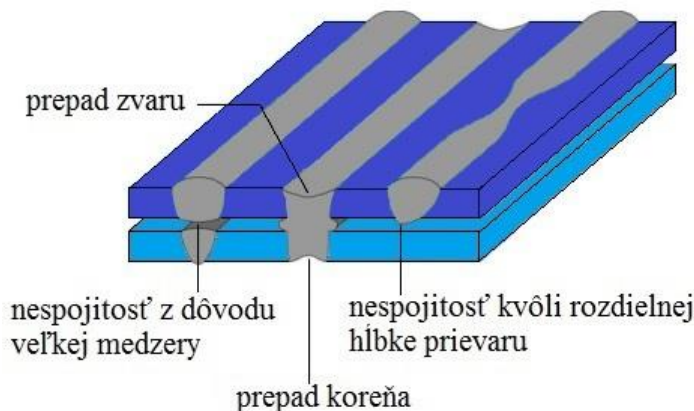
Taktiež aj geometrické chyby, ako sú napríklad nadmerné lineárne presadenie, prepady zvaru a koreňa, zápaly a rôzne nespojitosti, vid' obr. 15, by mohli zhoršiť kvalitu hliníkových zvarov. Presné spojenie a umiestnenie plniacich materiálov je nevyhnutné pri odstraňovaní týchto geometrických defektov. Okrem toho, rýchly a zložitý prietok v roztavenom kúpeli z hliníkových zliatin počas procesu zvarovania laserovým lúčom spojený s vysokou rýchlosťou chladenia hliníkoveho zvarového kovu, spôsobuje zachytenie plynu alebo pórovitosť.

Podobne aj nízky koeficient absorpcie energie laserom je negatívnym aspektom počas procesu zvarovania. U väčšiny kovových materiálov sa absorpcia laserových lúčov zvyšuje so skracovaním vlnovej dĺžky. Z tohto dôvodu laser s kratšou vlnovou dĺžkou, ako napríklad vysokovýkonný diódový laser vykazuje vyšší laserový absorpčný koeficient než iné lasery s vyššou vlnovou dĺžkou, ako je napríklad CO₂ laser.



Obr. 14 Povrchové a vnútorné vady [46]

Za hlavné nedostatky zvarovania hliníkových zliatin laserovým lúčom je možné označiť pórovitosť, ktorá je spôsobená rozpustením vodíku a ostatných legovacích prvkov, teplé a studené trhliny a odrazivosť povrchu. K ďalším vznikajúcim chybám patria napríklad napätovo korózne praskanie v niektorých druhoch zliatin, strata legujúcich prvkov, strata precipitačného vytvrdenia kvôli tepelným cyklom, zmäkčenie v dôsledku rastu zŕn a zlá geometria zvaru, predovšetkým prepady. Tieto defekty sa do istej miery vzťahujú ku koróznemu správaniu, mikroštruktúre a mechanickým vlastnostiam.



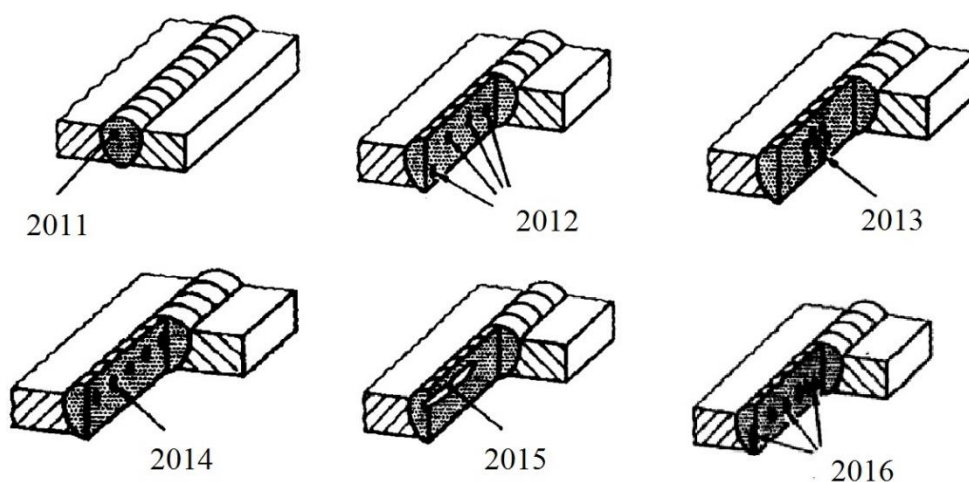
Obr. 15 Geometrické vady zvaru [47]

3.1 Pórovitosť [9], [28], [42], [48], [49], [50]

Pórovitosť je jedným z hlavných problémov súvisiacich s laserovým procesom zvárania. Je možné povedať, že v zvaroch hliníkových zliatin sa vytvára veľmi ľahko. Ako pórovitosť sa rozumejú vnútorné alebo vonkajšie malé póry, prípadne aj veľké nepravidelné dutiny vytvorené vo zvarových kovoch tavením počas procesu zvárania alebo počas fázy tuhnutia roztaveného zvarového kovu. Vyskytujú sa na rôznych miestach zvaru a môžu byť charakterizované odlišnými morfológiami. Na spodnej strane sa napríklad obvykle vytvárajú veľké dutiny, pričom na povrchu (hornej strane) zvaru sa objavujú malé dutiny.

Niektorými z dôvodov ich vzniku sú vonkajšie zdroje vodíka (z prídavných látok pre zváranie), nestabilita keyhole v dôsledku tvorby prietokových turbulencií, alebo jej kolapsu a kovové pary, ktoré vznikajú odparením prchavých legujúcich prvkov, ako napríklad horčíku. V priebehu procesu zvárania hliníkových zliatin laserom dochádza k zabráneniu šírenia alebo vznášania plynov ako je vodík z dôvodov vysokej rýchlosti chladnutia zvaru a úzkej zvarovej zóny. Preto je vodíkový plyn zachytený vo zvarovom kove tuhúceho hliníku. V dôsledku toho zostáva vo výslednom spoji veľa malých pórov rôznej veľkosti, ktoré sú buď zoskupené na jednom mieste, alebo rozptýlené vo zvaru. Zvarové vady typu pórov, sú definované českou štátnou normou ČSN EN ISO 5817 ako vnútorné vady a rozlišujú sa nasledovne:

- 201 – pór (plynová dutina) – dutina vytvorená uzatvoreným plynom
- 2011 – bublina – plynová dutina prevažne guľovitého tvaru
- 2012 – rovnomerná pórovitosť – niekoľko bublín rozmiestnených primerane rovnomerným spôsobom vo zvarovom kove
- 2013 – zhhluk pórov – skupina bublín s náhodným geometrickým rozmiestnením
- 2014 – riadok pórov – rad bublín orientovaných rovnobežne s osou zvaru
- 2015 – pretiahnutý pór – veľká neguľovitá dutina s najväčším rozmerom orientovaným približne rovnobežne s osou zvaru
- 2016 – červovitý pór – trubičková dutina v zvarovom kove spôsobená uvoľňovaním plynu



Obr. 16 Základné typy pórovitosti [50]

V prípade hliníkovo-horčíkových zliatin zvyčajne po skončení procesu zostáva na povrchu zvaranej oblasti šedý prášok, čo priamo poukazuje na stratu horčíka zo zliatiny. Odparovanie legovacích prvkov má však pri laserovom zváraní priaznivý prínos v procese hlbokého penetračného zvarania kvôli tlaku odparovania potrebnému na vytvorenie hlbokého penetračného zvaru. Toto silné a dynamické tlakové pôsobenie však spôsobuje nestabilitu keyhole a zvarových spojov počas procesu zvarania. Nestabilný stav nakoniec spôsobí zachytenie plynov vo zvarových kovoch a následne dochádza k vytvoreniu plynových pórov v roztavenej oblasti.

Potlačenie vzniku pórovitosti je možné napríklad optimalizáciou procesných parametrov zvarania, zváraním s plytkou a stabilnou keyhole, prípadne v kondukčnom režime, dopredným spôsobom so skoleným laserom, použitím vákuua alebo dvojitého laserového lúču, alebo výberom vhodného ochranného plynu. Všeobecne však platí, že množstvo vznikajúcich pórov je možné znížiť, zvýšením zvarovej rýchlosti a zlepšením kvality laserového lúču.

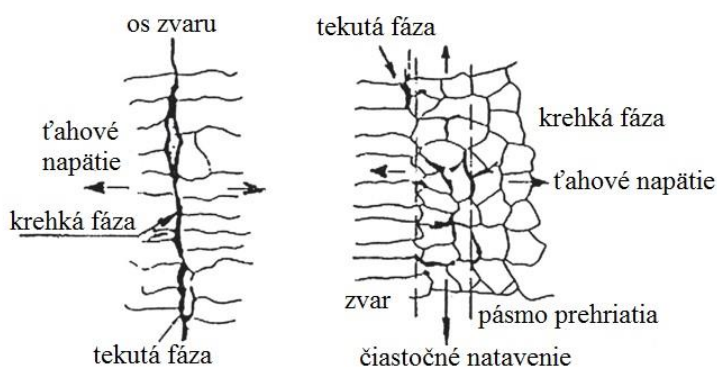
3.2 Trhliny za tepla [9], [28], [44], [51], [52]

Praskanie vo zvaraných konštrukciách je jednou z najzávažnejších porúch vznikajúcich pri laserovom zváraní. Trhliny sú oblasti s vysokou koncentráciou napätia a poškodenia zvaraných konštrukcií pochádzajú najčastejšie z nich.

Takzvané trhliny za tepla sa tvoria pri zmršťovaní počas tuhnutia kovu. Ich vznik je spojený s faktom, že tuhnutie zvarového kovu je sprevádzané objemovými zmenami, ktoré v spojení s vysokou tepelnou vodivosťou a taktiež rozťažnosťou spôsobujú vznik napätia v zvare. K trhlinám dochádza predovšetkým v poslednej zvarovej vrstve. Priebeh trhlín je medzi-kryštalický, vid' obr. 17.

Všeobecne platí, že k obmedzeniu tvorby trhlín za tepla je nutné:

- zníženie tepelného príkonu pri zváraní a tým aj množstva nataveného kovu, stupňu segregácie a rastu zrna
- obmedzenie deformácie a stavu napätosti vhodným tvarom zvarového spoja (úkosy malej šírky, dodržiavanie správneho pomeru šírky k výške zvarovej húsenice)
- použitie predohrevu



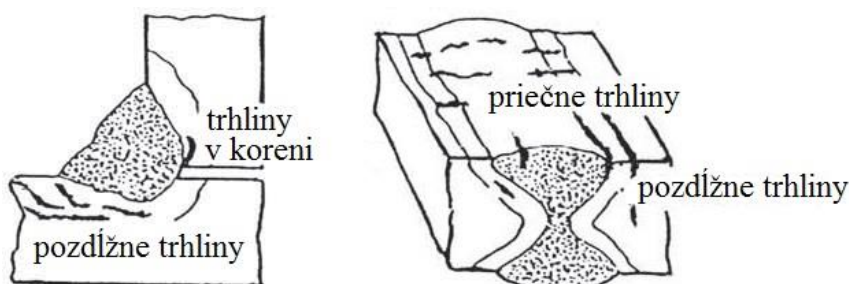
Obr. 17 Trhliny za tepla [52]

3.3 Trhliny za studena [42], [49], [53], [54], [55]

K vzniku trhlín za studena dochádza pri rozpúšťaní vodíku vo zváranom kove, ktorý sa následne rozptýli do tepelne ovplyvnenej zóny. Rozpustený vodík indukuje vznik trhlín v mikroštruktúre materiálu. V dôsledku toho dochádza k vytvoreniu vysokých stavov napätosti. Trhliny sa obvykle vytvárajú pri teplotách výrazne pod 300 °C a sú považované za veľmi vážnu vadu, avšak všeobecne sa vyskytujú vo zvaroch hliníkových zliatin v malom rozsahu. Podľa toho, v ktorom smere vzhľadom k zvaru sa delia a označujú podľa ČSN EN ISO 5817 na priečne (102 – trhliny prevažne kolmé na os zvaru) a pozdĺžne (101 – trhliny prevažne rovnobežné s osou zvaru). Príklady trhlín je možné vidieť na obr. 18.

K obmedzeniu vzniku trhlín za studena je nutné:

- použitie predohrevu a dohrevu po zváraní
- použitie prídavných materiálov s nízkym obsahom vodíku
- zváranie v prostredí s nízkou relatívnou vlhkosťou (do 60%)
- potlačenie vzniku zvyškových napätí a deformácií na minimum
- vylúčenie vrubov vo zvarových spojoch



Obr. 18 Trhliny za studena [55]

3.4 Prepady [44], [56], [57]

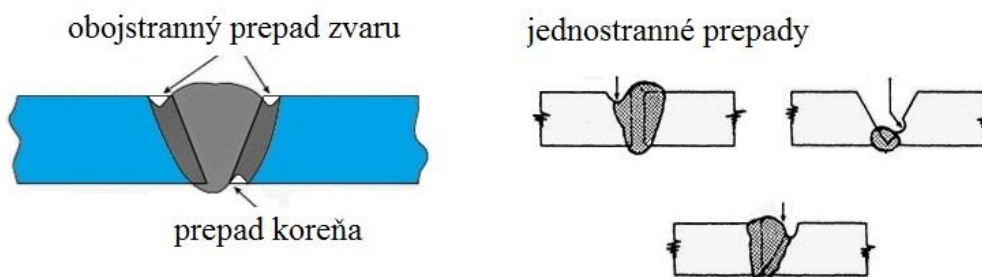
Tiež nazývané podrezanie sú nedokonalosti charakterizované tvorbou drážok na zvarovej špičke v dôsledku prehriatia na voľných okrajoch základného kovu alebo zváraného kovu, ako je viditeľné na obr. 19. Podrezanie je možné podľa ČSN EN ISO 5817 zaradiť všeobecne k vadám tvaru (číselné označenie - 500).

Vznikajú v dôsledku zvárania vysokým prúdom, alebo vysokou rýchlosťou pojazdu. Ďalším faktorom je použitie nesprávneho uhlu zvárania a tak lúč smeruje k tenkým okrajom, kde môže prehriať, kov spáliť. Rovnako aj použitie nesprávnej techniky zvárania a polohy sú zaradené k primárnym príčinám výskytu prepádov. Prepady zvarov boli vždy vážnym problémom v odvetviach zvárania ocele a je potrebné vynaložiť veľké úsilie na riešenie tohto problému.

Redukcia vzniku podrezania je možná:

- použitie správneho tepelného vstupu
- nastavenie vhodného uhlu zvárania
- menšia rýchlosť pohybu
- použitie správnej techniky zvárania
- korektná zvarová pozícia

Ďalšou príbuznou vadou k podrezaniu je tzv. proláklina, ktorá je spôsobená zosunutím zvarového kovu spôsobeného zemskou príťažlivosťou. V prípade zvarovania vo vodorovnej polohe zhora, alebo nad hlavou je normou ČSN EN ISO 5817 označená číslom 5092.



Obr. 19 Druhy prepádov [56]

3.5 Skúšky zvarových spojov [58], [59], [60], [61], [62], [63]

Najčastejšie používanými skúškami zvarov sú nedeštruktívne. Skrátene označované ako NDT, sú procesy kontroly, testovania alebo vyhodnocovania materiálov, súčiastok alebo zostáv z pohľadu diskontinuity alebo rozdielov v charakteristikách bez toho, aby došlo k narušeniu použiteľnosti časti kontrolovaného predmetu alebo celého systému. Inými slovami, po skončení kontroly alebo skúšky, súčiastka môže byť ešte použitá. V rámci hodnotenia sa vychádza z názoru, že pokiaľ sa vo zvarovom spoji nevyskytujú vady, prípadne len malé, alebo málo početné, prípadne málo závažné, tak zvarový spoj bude v prevádzke slúžiť dobre. Toto tvrdenie je však platné iba z časti a preto sa berie do úvahy, že NDT skúšky preukazujú len čiastočne dosiahnuté úžitkové vlastnosti zvarových spojov.

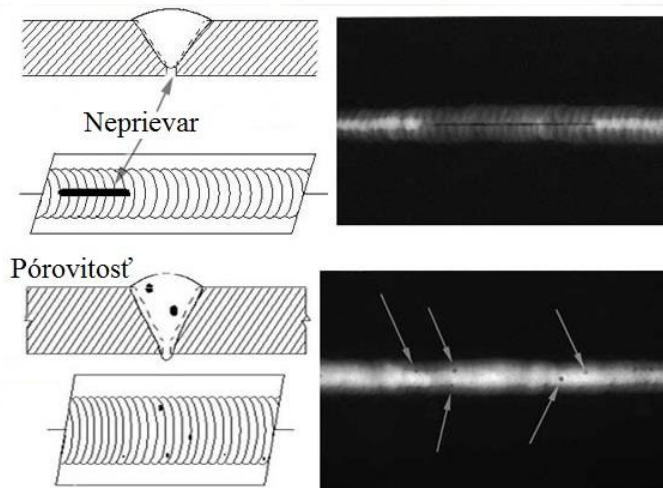
NDT sa bežne používa v oblasti forenzného, ropného a systémového inžinierstva, elektrotechniky, leteckej techniky, medicíny ale aj umenia.

Medzi základné metódy NDT patria:

- **Rádiografická skúška (RT)**

Rádiografia umožňuje získať trvalý obraz väd materiálu v jeho vnútri (predovšetkým objemových, plošných len v prípade vhodne zvolenej smerovej orientácie). Táto metóda sa obvykle používa na kontrolu zvarov a odliatkov. Vzhľadom k trvalému záznamu a jeho dôkaznosti patrí k najdôležitejším metódam pri kontrole zariadení, ktoré majú vysokú mieru nebezpečnosti, ako sú napríklad tlakové nádoby.

Princípom tejto skúšky je prechod ionizujúceho žiarenia materiálom, pričom dochádza k jeho zoslabovaniu. Vznikajúci útlm je závislý aj na hrúbke materiálu. V prípade, že sa v materiáli nachádza defekt s vhodnou orientáciou voči smeru



Obr. 20 RT skúška – indikácie [60]

prechádzajúceho žiarenia, tak v tomto mieste k jeho zoslabeniu nedôjde. V oblasti za predmetom sa vytvára neviditeľný reliéf primárneho žiarenia, ktorý je potrebné vhodným detektorom previesť na viditeľný obraz. V prípade klasickej filmovej RT metódy ním je rádiografický film. Každý takýto film má svoju charakteristickú krivku, určujúcu, aký sa dosiahne obrazový kontrast pri danej aplikácii. Z hľadiska praktickosti je účelné pracovať v lineárnej časti charakteristickej krivky, to znamená pracovať so sčernením (optickou hustotou) rádiogramu vyšších hodnôt.

Vady sa na filme znázornia ako viac exponované oblasti, teda tmavšie s väčším sčernením. Po presvietení vyvolaného filmu negatoskopom je možné rozpoznať vady a vyhodnotiť ich, ako je možné pozorovať na obr. 20.

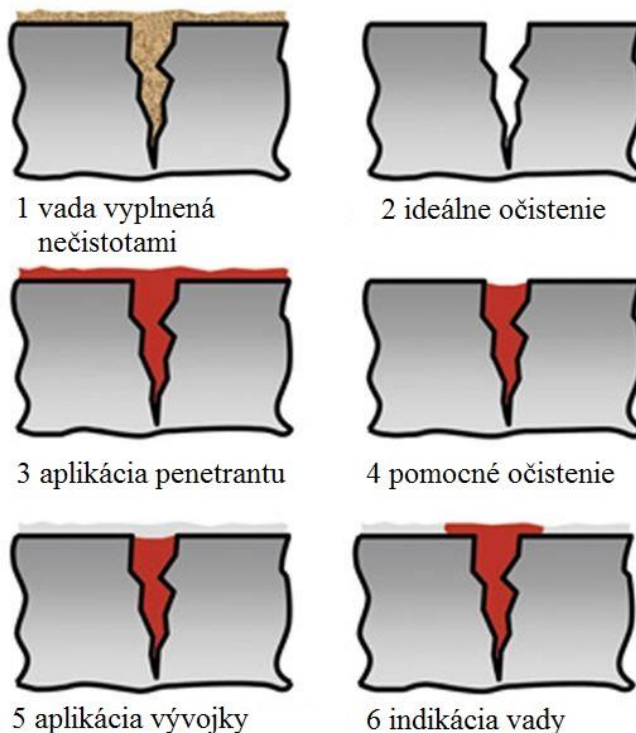
• Penetračná (kapilárna) skúška (PT)

Kapilárne testovanie je vhodné pre analýzu povrchových väd. Veľké využitie nachádza najmä v oblasti kontroly zvarových spojov. Metóda je nenáročná, jednoduchá a taktiež málo finančne nákladná v základných aplikáciách. Zisťujú sa povrchové vady typu trhlín, prasklín, pórov, prímieskov, preložiek a pod. Penetračná skúška sa používa takmer na všetky druhy nepórovitých materiálov, či už ocele, zliatiny hliníku, niklu, medi, titanu, sklo, keramiku ale aj plasty. U neferomagnetických materiálov, kde nie je možné využiť magnetickú metódu, je kapilárna skúška takmer nenahraditeľnou pre testovanie väd na povrchu.

Na pripravený (očistený, odmastený a vysušený) skúšaný povrch súčiastky sa nanesie penetrant – kvapalina s vhodnými vlastnosťami.

Po určitú dobu sa ponechá pôsobiť. Počas toho vniká do prípadných nečistôt v materiáli, vďaka jeho dobrej zmáčivosti a nízkemu povrchovému napätiu. Po dostatočnej dobe penetrácie sa prebytočná kvapalina zo skúšaného povrchu odstráni, napríklad poutieraním látkou, prípadne za použitia tzv. čističa. Následne sa nanesie na povrch tzv. vývojka (napríklad oxid zinočnatý, horečnatý, alebo uhličitan horečnatý), ktorá má absorpčný účinok, nasáva penetrant, preniknutý do väd a zároveň vytvára kontrastné pozadie, bielej farby. Najčastejšie používané prostriedky sú uvedené v prílohe 6.

Po tomto procese sa uskutočňuje inšpekcia, pri ktorej sa posudzujú dvojrozmerné indikácie zistených nečistôt. Postup skúšky je schematicky zobrazený na obr. 21. Kapilárnou skúškou sa identifikujú povrchové vady, ktoré sú čisto zrakom neviditeľné. Hodnotenie indikácií prebieha na základe vizuálneho vnemu farebného alebo jasového kontrastu.

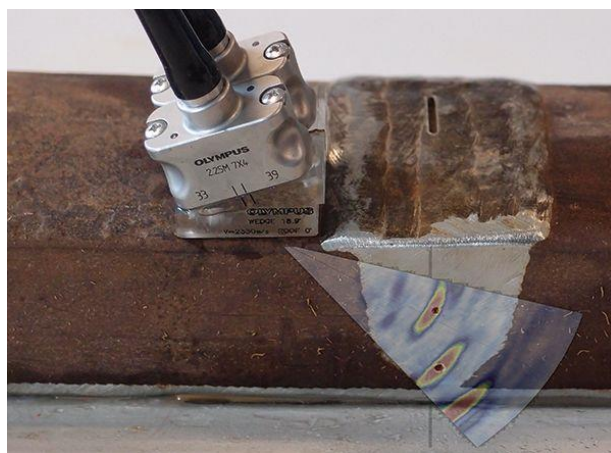


Obr. 21 Postup PT skúšky [61]

- **Ultrazvuková skúška (UT)**

Ďalšou zo základných nedeštruktívnych metód je skúšanie ultrazvukom. Táto metóda umožňuje zistiť výskyt vnútorných vád materiálu a to aj vo väčších hĺbkach pod povrchom. Zo všetkých NDT metód má najväčší dosah. Jej použitie je najmä u tvárnených polotovarov, zvarov a odliatkov. Okrem vnútorných vád, ako sú trhliny, dutiny, dvojitosť a podobne, zachytáva aj vady povrchové. Veľkú výhodu predstavuje okamžité zobrazovanie výsledkov skúšky.

Využíva sa skutočnosť, že pevné materiály (kovové aj nekovové) sú dobrými vodičmi zvukových vln. Ultrazvukové vlny vysielané do skúšaného predmetu sa od každého rozhrania odrážajú a teda aj od vnútorných vád (nehomogenít), vid' obr. 22. Platí že, čím je vyššia frekvencia vlnenia, tým menšie vady umožňuje detekovať. Pri skúšaní sa bežne využívajú frekvencie od 0,5 MHz do 25 MHz.



Obr. 22 Princíp UT skúšky [62]

- **Magnetická prášková skúška (MT)**

Magnetická skúška je najpoužívanejšou metódou nedeštruktívneho skúšania materiálu. Vzhľadom k jej relatívnej jednoduchosti a nenáročnosti na uskutočňovanie patrí k najdôležitejším metódam aj pri servisu zariadení v prevádzkach. Zisťujú sa ňou povrchové a podpovrchové vady, ako sú trhliny, praskliny, póry, inklúzie a pod. vo feromagnetických materiáloch. MT skúšku nie je možné použiť pre iné ako feromagnetické materiály, z dôvodu potreby magnetických vlastností.

Magnetické práškové metódy sú založené na zisťovaní rozptylového magnetického toku. V prípade, že sa v zmagnetizovanom predmete nachádza povrchová nečistota kolmá k magnetickým siločiarom, tieto vystúpia na povrch a vzniká tzv. rozptylový magnetický tok. Siločiar na skúšanom povrchu nad trhlinou sa zakrivia do oblúku a môžu byť zviditeľnené rozptýlenými železnými pilinami a vďaka tomu pozorovateľné. Častočky železa sa prichytia na siločiar magnetického poľa a nad trhlinou vytvoria magnetickú indikáciu. Zmagnetizovanie sa uskutočňuje na skúšanom predmete pólovým alebo prúdovým magnetizovaním, ako zobrazuje obr. 23. Podľa toho, aký detekčný prostriedok a spôsob hodnotenia vzniknutých indikácií, je použitý, sa rozdeľujú metódy na farebné a fluorescenčné. Druhé spomenuté majú vyššiu citlivosť.



Obr. 23 MT skúška zvaru [63]

- **Vizuálna kontrola (VT)**

Vizuálne testovanie je v rámci nedeštruktívneho skúšania najrozšírenejšie. Zameriava sa na zisťovanie a hodnotenie stavu povrchov výrobkov, alebo súčiastok len očami prípadne s pomocou špeciálnych prístrojov. Metoda je využívaná vtedy, keď sa kontrolujú vady typu trhlín, zápalov a povrchových pórov. Vyhodnocujú sa aj tvarové odchýlky ako napríklad lineárne presadenie, prevýšenie koreňa zvaru, presadenie foriem u odliatkov a stav povrchu. Všeobecne sa odporúča, aby vizuálna kontrola prebehla pred každou ďalšou NDT metódou.

Uskutočňuje sa na pripravenom (očistenom, odmastenom a vysušenom) skúšobnom povrchu súčiastky. Akosť prípravy výrazne ovplyvňuje dosiahnutelnú citlivosť skúšky, t.j. identifikovateľnosť vád.

Kontrolu je možné realizovať priamo zrakom bez pomôcok, prípadne s využitím pomôcok, akými sú zrkadlá, mierky, meradlá, lupy a podobne. Taktiež je možné použiť endoskopy, boroskopy, videoskopy a ďalšie zariadenia.

4 EXPERIMENT [64], [65], [67], [68], [69]

Cieľom experimentu je stanovenie najvhodnejších procesných parametrov metódy zvarovania wobbling, pre minimalizáciu vzniku zvarových vád, predovšetkým pórovitosti. Samotný experiment spočíva v uskutočnení viacerých zvarov, pri zmene rýchlosti zvarovania, výkonu laseru, priemeru a frekvencie rozmietania. Nastavenie rôznych parametrov prebieha pre tri metódy wobblingu a síce, kruhový, lineárny pozdĺžny a lineárny priečny. Pre porovnanie sa uskutočnení aj jeden zvar bez použitia tejto metódy. Po zvaraní sa vyhotovia metalografické výbrusy, na ktorých bude prebiehať analýza zvarov. Okrem toho prebehne aj vizuálne vyhodnotenie chýb zvarov, rádiografická skúška prežiarením a penetračná skúška.

Pri procese zvarovania sa použije nasledovné prístrojové vybavenie:

- vysoko-výkonový vláknový laser YLS-2000, od výrobcu IPG Photonics

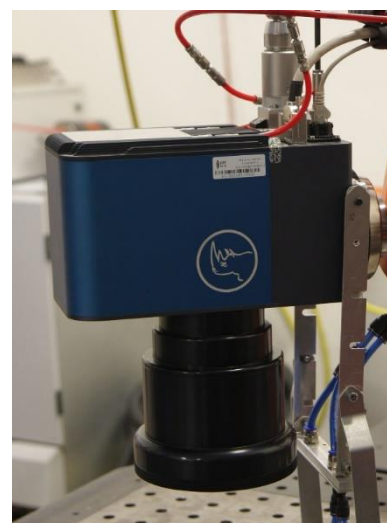
max. výkon:	2000 W
vlnová dĺžka:	1070 ± 5 nm
režimy:	pulzný, kontinuálny
trvanie impulzu:	0,2 – 10 ms
stabilita energie:	± 2 %



Obr. 24 Vláknový laser [64]

- skenovacia hlava Arges Rhino 31
- | | |
|--------------------------------|-------------------------|
| vlnová dĺžka: | 1020 – 1080 nm |
| apertúra (priezor): | 31 mm |
| ohnisková vzdialenosť: | 200 mm |
| rozsah sken. poľa: | 205 x 205 mm |
| poloha ohniska
pri zvaraní: | na hornej rovine plechu |

Ďalšie vlastnosti vid' príloha 8.



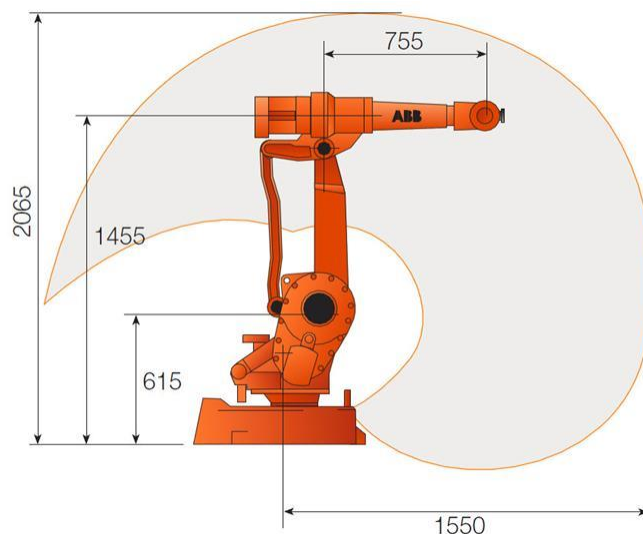
Obr. 25 Skenovacia hlava

- optické vlákno 100 μm

- robotické rameno ABB – IRB 2400/16

počet osí: 6
 max. výška: 1564 mm
 rozmer základne: 723x600 mm

Ďalšie vlastnosti vid' príloha 10.



Obr. 26 Robotické rameno ABB [65]

Celá zostava použitých zariadení pri zváraní je v prílohe 7.

Pre experimentálne zváranie je zvolený plech zo zliatiny hliníku AlMg3 v stave H22 (polotvrдый stav), podľa európskej normy označený EN AW 5754 a predošlého značenia českou technickou normou (ČSN) ako zliatina 424413. Hrúbka materiálu je 3 mm. Zliatiny hliníku s hlavným legujúcim prvkom – horčíkom sa vyznačujú dobrou zvárateľnosťou všetkými bežnými postupmi zvárania hliníku, ako bolo uvedené v kapitole 2.2. V procese zvárania je ale nutné zohľadňovať, že v prechodovom pásme sa znižuje pevnosť až na úroveň stavu mäkkého žihania.

Presné chemické zloženie uvedené v tab. 5, porov. príloha 1 - materiálový list zliatiny hliníku, kde sú uvedené aj mechanické vlastnosti tejto zliatiny.

Tab. 5 Chemické zloženie zvárannej zliatiny

Al	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti
95,903	3,147	0,205	0,346	0,029	0,246	0,036	0,034	0,018

Pre experiment sa vyhotovilo 14 skúšobných zvarov pomocou skenovacej hlavy bez pohybu robota vo vzdialenosti $x = -60$ mm od stredu pracovného poľa. Postupne sa uskutočnili zvary s využitím režimov wobblingu – kruhového a lineárnych pozdĺžnych a priečných. Pre porovnanie sa zhotovil jeden zvar bez použitia skúmanej metódy. V každom režime sú pre každý zvar nastavené rôzne hodnoty procesných parametrov, ktoré sú uvedené v kapitole 1.5.3. Jednotlivé hodnoty sú uvedené v tabuľke 6. Okrem týchto parametrov sú v tabuľke 6 zahrnuté aj hodnoty počtu a veľkosti vád. U každého zvaru v prípade výskytu vady je uvedená len najväčšia nameraná vada. Uvedené hodnoty vychádzajú z meraní na metalografických výbrusoch.

Tab. 6 Zváracie parametre a identifikované vady

číslo zvaru	v	P	r _w	f _w	režim wobblingu	veľkosť vady [μm]	počet väd
	[mm/s]	[W]	[mm]	[Hz]			
1	20	1900	1,2	90	kruhový	0	0
2	20	1900	0,6	90	kruhový	1037	1
3	10	2000	0,6	90	kruhový	556	1
4	10	2000	0,6	20	kruhový	0	0
5	10	2000	1,2	20	kruhový	593	6
6	10	2000	1,2	100	kruhový	0	0
7	10	2000	1,2	50	kruhový	1037	3
8	10	2000	1,2	70	kruhový	0	0
9	10	2000	1,2	80	kruhový	0	0
10	10	2000			bez wobblingu	685	2
11	10	2000	1,2	70	lineárny pozdĺžny	574	4
12	10	2000	1,2	80	lineárny pozdĺžny	648	4
13	10	2000	1,2	60	lineárny pozdĺžny	0	0
13a	10	2000	1,2	60	lineárny pozdĺžny	556	3
13b	10	2000	1,2	60	lineárny pozdĺžny	0	0
14	10	2000	1,2	60	lineárny priečny	0	0

Ako už bolo spomenuté vyššie zváracia zostava použitá pre experiment je uvedená aj s popisom v prílohe 7. Po procese zvárania boli skúšobné vzorky označené, tak ako je uvedené v tabuľke 6.

Na obr. 27 a 28 sú zobrazené vyhotovené zvary z pohľadu zhora aj zdola. Ako je viditeľné, začiatok, koniec a prostredná časť zvarov majú odlišný charakter, ktorý môže mať pôvod v meniacom sa dopadovom uhle zväzku, alebo meniacej sa teplote zváraného



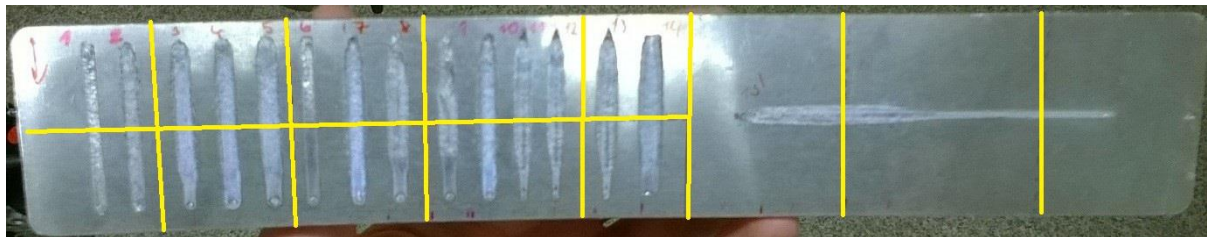
Obr. 27 Skúšobné zvary – pohľad zdola



Obr. 28 Skúšobné zvary – pohľad zhora

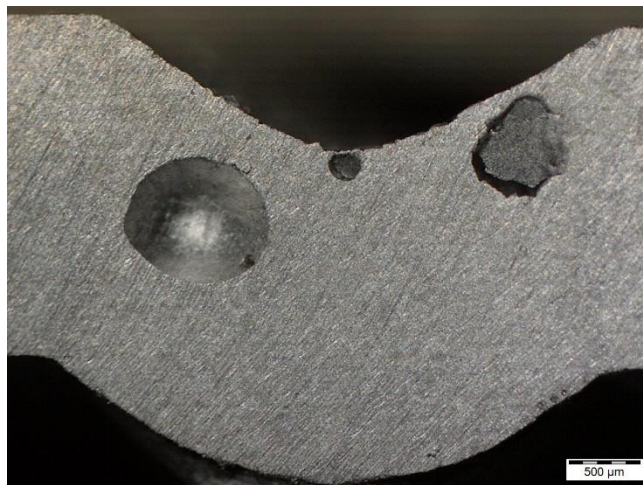
plechu. Preto bol uskutočnený zvar (13A/B) dĺžky 90 mm s koncovými bodmi $x = -45 - 45$ mm. Avšak obidvoje polovice zvaru sa tiež výrazne líšia.

Po procese zvárania sa vzorky pripravili na metalografické vyhodnotenie. Najskôr bol plech so zvarmi rozrezaný na pásovej pile na kov. Rez prebehol v kolmom smere na osi zvarov a vzorky boli rozrezané aj medzi zvarmi, ako je zobrazené na obr. 29 žltou farbou.



Obr. 29 Schéma miest rezov

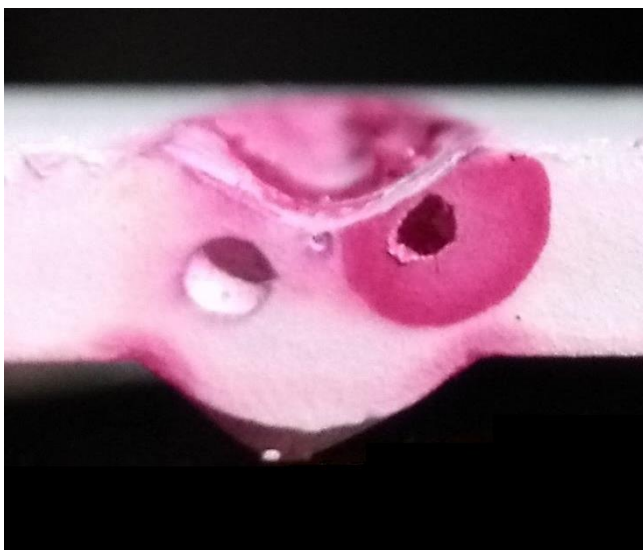
Po rozrezaní prebehlo brúsenie vzoriek brúsnyimi papiermi s hrubosťou 120, 240 a 500 zrn/cm². Hrubosť papierov sa zvolila vzhľadom k uskutočňovaniu len makroskopického hodnotenia, v prípade, že by sa hodnotilo aj mikroskopicky by musela byť hrubosť brúsnych papierov jemnejšia. Následne sa vzorky leptali, aby došlo k vyvolaniu mikroštruktúry. Pre tento proces bolo použité leptadlo Keller so zložením: 2 ml HF, 6ml HCl, 10 ml HNO₃, 60ml H₂O, po dobu troch minút. Po naleptaní nasledoval oplach vodou, aby sa zabránilo ďalšiemu naleptaniu. Potom ešte jeden oplach liehom, aby sa zamedzilo tvorbe mapy. Na záver sa vzorky vysušili priemyslovým fénom nastaveným na teplotu 180°C.



Ďalším procesom po príprave vzoriek je oskenovanie. Príklad oskenovanej vzorky je na obr. 30. Zvyšné vyhotovené snímky sú uvedené v prílohe 2. Snímky sa použili na vyhodnotenie zvarových vád.

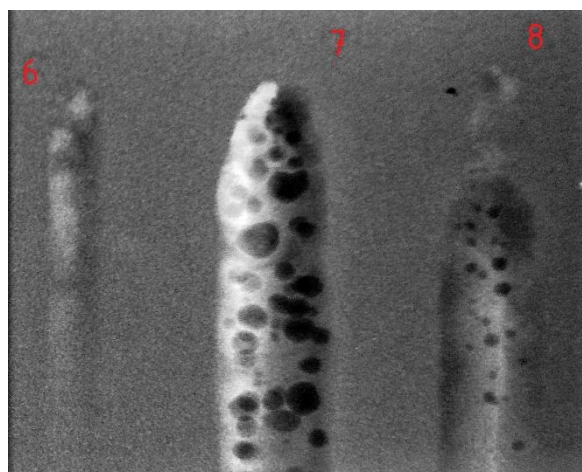
Obr. 30 Makroskopická snímka zvaru

Okrem vizuálneho hodnotenia zvarov z oskenovaných vzoriek a taktiež priamym pohľadom voľne okom, sa uskutočnili ďalšie testy. Prvým bolo skúšanie pomocou penetračnej metódy, popísanej v kapitole 3.5. Na obr. 31 je možné sledovať rôzne silné vyobrazenie zvarových vád. Toto je spôsobené predovšetkým rozdielnou hĺbkou vád a z toho vyplývajúcim väčším množstvom penetrantu, ktorý sa v nich nahromadil. Snímky ďalších zvarov sú uvedené v prílohe 3. Hodnotenie skúšky prebehlo podľa normy ČSN EN ISO 23277 (Nedestruktívni zkoušení svarů - Zkoušení svarů kapilární metodou - Stupně přípustnosti). Avšak podľa tejto normy vychádzali vady ako prípustné, s čím však vzhľadom k veľkosti zvaru nemožno súhlasiť.



Obr. 31 Snímka zvaru po PT skúške

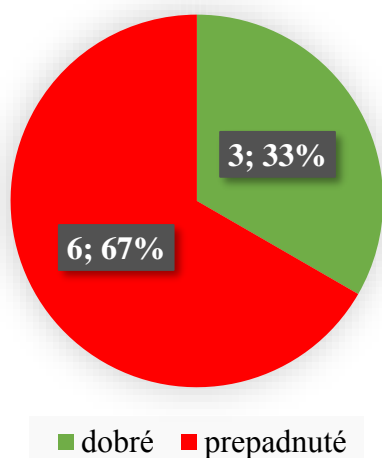
Vzhľadom k tomu prebehlo ešte skúšanie metódou prežiarenia (RT). Priebeh skúšky je popísaný v kapitole 3.5. Obr. 32 je príkladom jedného zo zosnímaných zvarov. Ďalšie snímky negatívov zo skúšky sú v prílohe 4. Hodnotenie v tomto prípade bolo uskutočnené podľa normy ČSN EN ISO 10675-2 (Nedestruktívni zkoušení svarů – Kritéria přípustnosti pro radiografické zkoušení - Část 2: Hliník a jeho slitiny). V prílohe 5 sú uvedené protokoly o uskutočnení tejto skúšky, ktoré preukazujú, u ktorých zvarov boli, resp. neboli detekované vady.



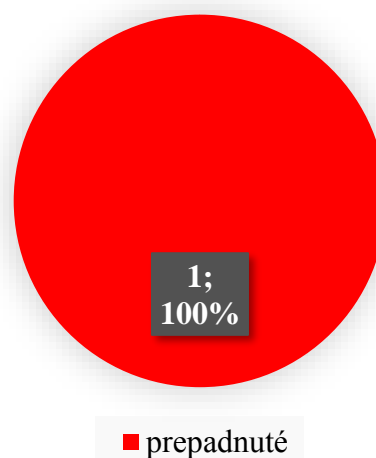
Obr. 32 Snímka negatívu z RT skúšky

Po dokončení meraní prebehla analýza nameraných hodnôt a celkové vyhodnotenie zvarových väd. Vyhodnotenú vady boli dvojitého druhu. Prvým boli vonkajšie vady, a to prepady (500 - podľa ČSN EN ISO 5817), resp. prolákliny (5092 – podľa ČSN EN ISO 5817), ktoré boli popísané vyššie v kapitole 3.4. Výskyt tohto druhu väd sa preukázal u zvarov č. 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 12 a 14. Nasledujúce grafy 1 a 2 zobrazujú počet zvarových väd vzhľadom k jednotlivým metódam wobblingu. Ako je z grafov viditeľné najväčší percentuálny výskyt bol v prípade bez použitia metódy wobbling a taktiež v prípade lineárneho priečného wobblingu. Tieto údaje sú ale menej relevantné, pretože v oboch prípadoch bol uskutočnený len jeden zvar týmito metódami. Viac vypovedajú teda hodnoty u kruhového a lineárneho pozdĺžneho wobblingu. Z nich vyplýva že najvýhodnejší z pohľadu najnižšieho množstva vznikajúcich vonkajších väd je lineárny pozdĺžny režim.

Počet dobrých a prepadnutých zvarov (kruhový wobbling)

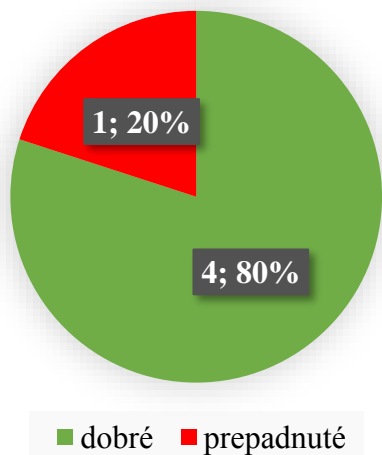


Počet dobrých a prepadnutých zvarov (bez wobblingu)

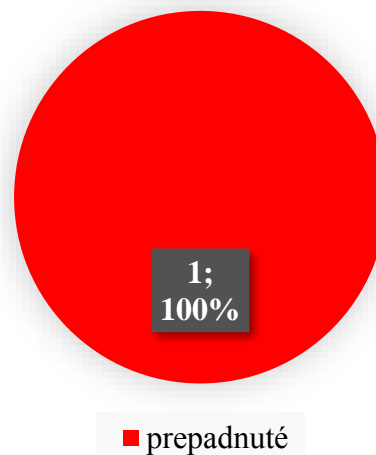


Graf 1 Počet dobrých a prepadnutých zvarov u kruhového wobblingu a bez wobblingu

Počet dobrých a prepadnutých zvarov (lineárny pozdĺžny wobbling)



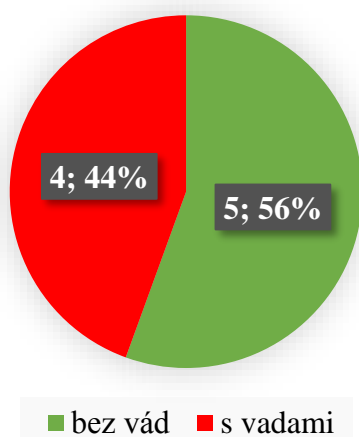
Počet dobrých a prepadnutých zvarov (lineárny priečny wobbling)



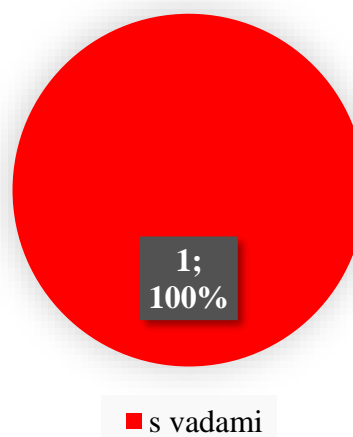
Graf 2 Počet dobrých a prepadnutých zvarov u pozdĺžneho a priečneho lineárneho wobblingu

Druhým druhom hodnotených vád boli vady vnútorné. Meranie ukázalo, že vo zvaroch sa nachádza rovnomerná pórovitosť (2012 – podľa ČSN EN ISO 5817), o ktorej pojednáva kapitola 3.1. V nasledujúcich grafoch 3 a 4 sú vyobrazené počty zvarov, ktoré obsahovali vady. Opäť ako v predošlom prípade, majú väčšiu výpovednú hodnotu údaje týkajúce sa kruhového a lineárneho pozdĺžneho režimu wobblingu. Z týchto hodnôt je možné určiť, že najmenší počet vnútorných vád vznikol u kruhového režimu.

Počet zvarov s vadami a bez vád (kruhový wobbling)

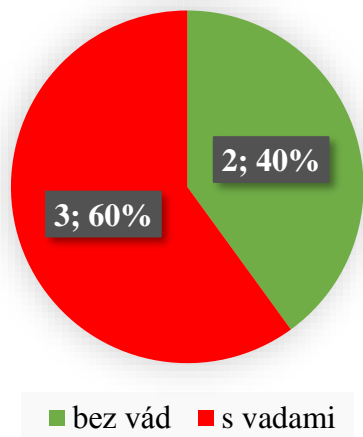


Počet zvarov s vadami a bez vád (bez wobblingu)

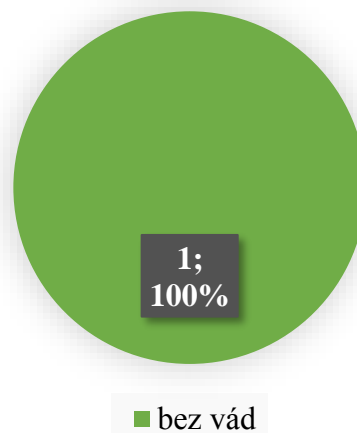


Graf 3 Počet zvarov s výskytom vád u kruhového wobblingu a bez wobblingu

Počet zvarov s vadami a bez väd
(lineárny pozdĺžny wobbling)



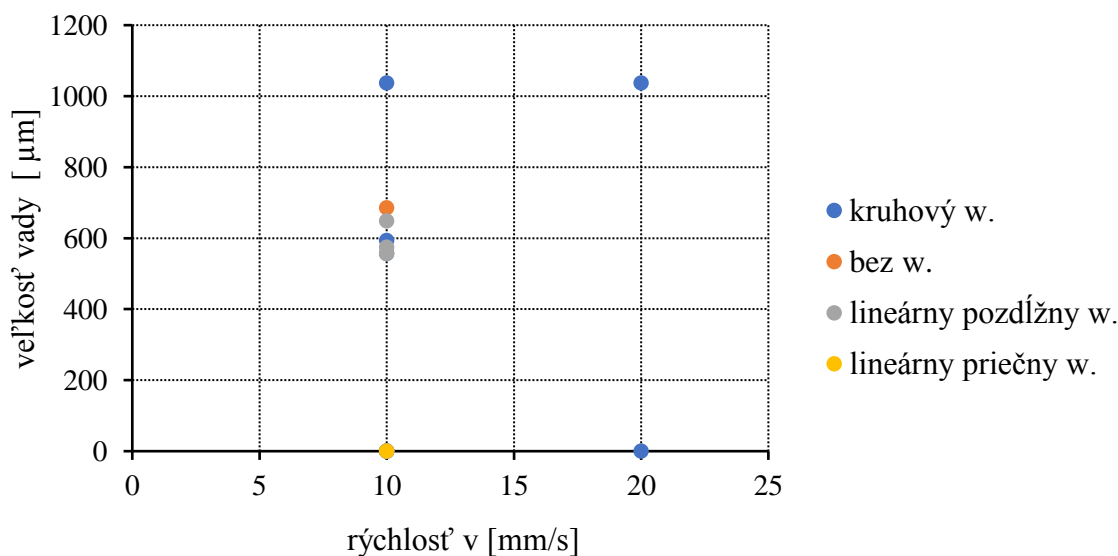
Počet zvarov s vadami a bez väd
(lineárny priečny wobbling)



Graf 4 Počet zvarov s výskytom väd u pozdĺžneho a priečneho lineárneho wobblingu

Pre presnejšie zobrazenie množstva a veľkosti vzniknutých väd slúžia grafy rozložení. Údaje pre tieto grafy pochádzajú z meraní na metalografických výbrusoch. Množstvo vnesených väd – pórov v grafoch je teda závislý na množstve pórov, ktoré sa vyskytovali v mieste rezu zvaru. Avšak pre vyhodnotenie najvhodnejších parametrov zvárania sú tieto údaje dostatočné.

Rozloženie veľkosti väd v závislosti na rýchlosti

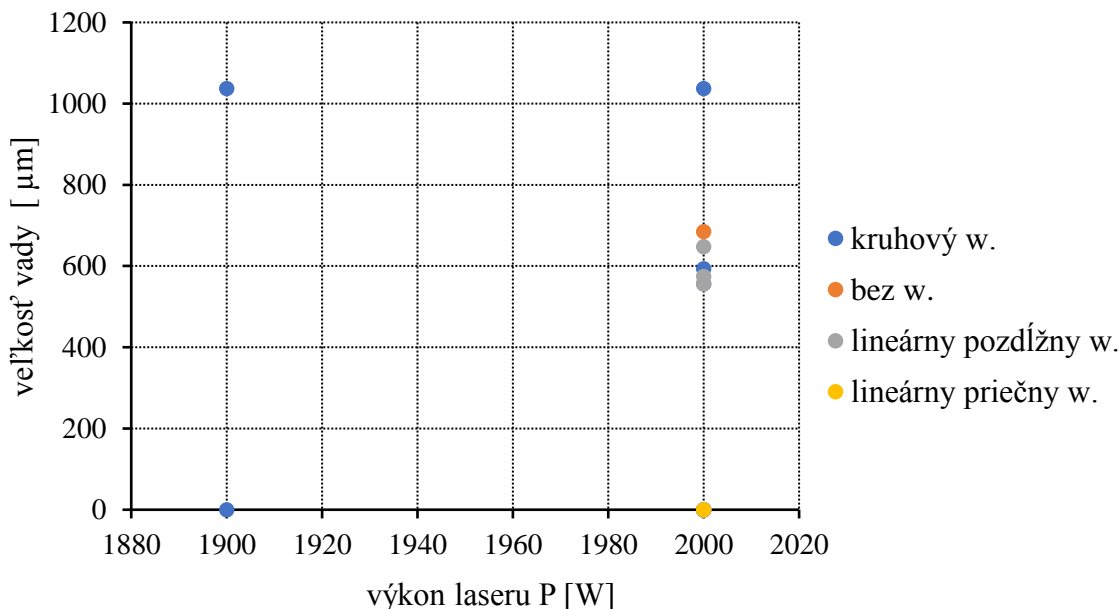


Graf 5 Rozloženie veľkosti väd v závislosti na rýchlosti zvárania

Z grafu 5 vyplýva že najväčšie vady v závislosti na rýchlosti zvárania vznikali u kruhového režimu wobblingu a v podstate nezáviseli na veľkosti rýchlosti. Naopak u lineárneho priečneho režimu žiadna vada nebola indikovaná.

Graf 6 je vyobrazením závislosti na výkone laseru a vyplýva z neho, že najväčšie vady opäť vznikali u kruhového režimu pričom nezáviseli na veľkosti výkonu. V prípade lineárneho priečného režimu je možné prehlásiť, že výkon laseru 2000 W nespôsobuje vznik väd.

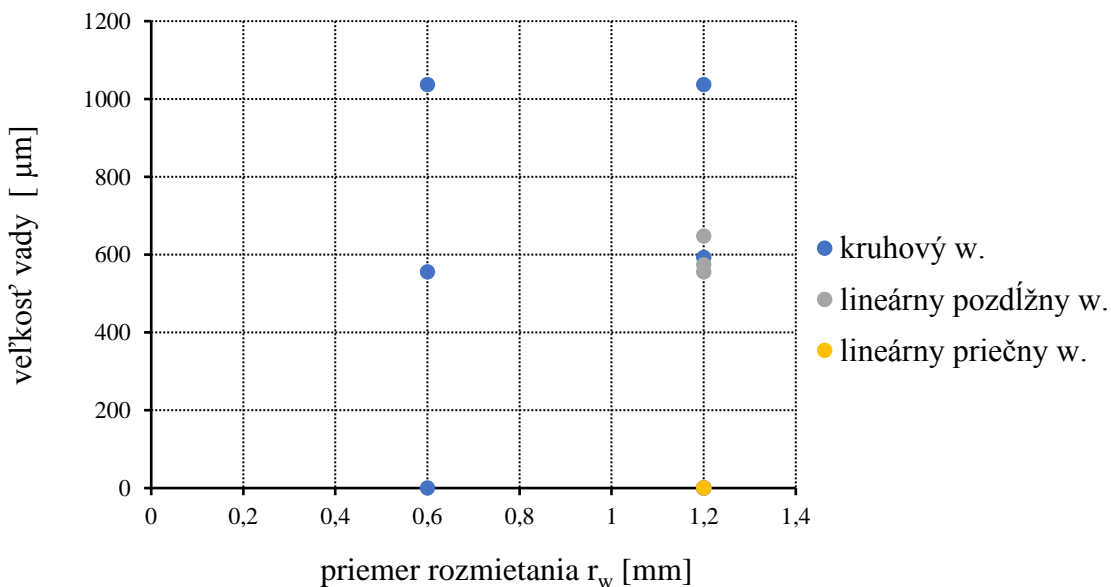
Rozloženie veľkosti väd v závislosti na výkone laseru



Graf 6 Rozloženie veľkosti väd v závislosti na výkone laseru

Ďalšie rozloženie je v závislosti na priemere rozmietaťia, vid' graf 7. Rovnako, ako v predošlom prípade, veľkosť vznikajúcich väd je u kruhového režimu wobblingu najväčšia, ale nie je závislá na nastavenom priemere, pretože veľkosť väd bola pri rôznych

Rozloženie veľkosti väd v závislosti na priemere rozmietaťia

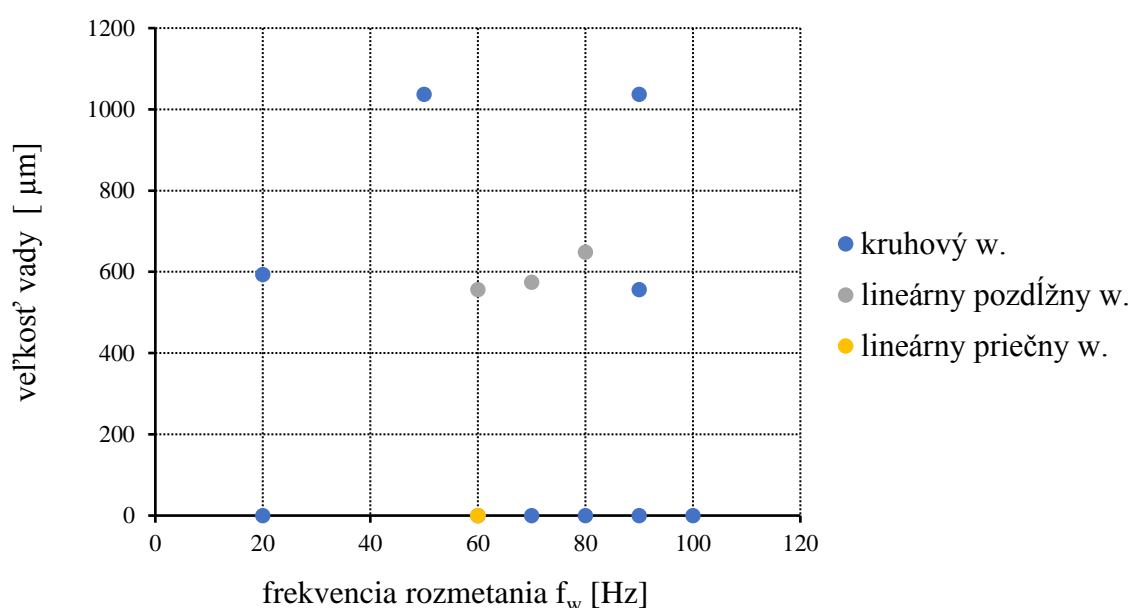


Graf 7 Rozloženie veľkosti väd v závislosti na priemere rozmietaťia

nastaveniach podobná. Vzhľadom k tomu, že v lineárnom priečnom režime nebola na výbruse indikovaná žiadna vada, javí sa tento režim ako najvhodnejší v spojení s priemerom rozmietať $r_w = 1,2$ mm. V tomto prípade sa v grafe ale už nevyskytujú hodnoty “bez w.” keďže zváranie bez wobblingu nemá priemer rozmietať.

Posledným skúmaným parametrom je frekvencia rozmietať. Opäť ako v predošlom prípade nie je zahrnuté zváranie bez wobblingu. Rozloženie na grafe 8 ukazuje, že väčšina zvarov vytvorených vyššími frekvenciami v kruhovom režime bola bez väd, avšak najväčšie vzniknuté vady vznikali práve v tomto režime. U lineárneho priečného režimu s nastavenou frekvenciou $f_w = 60$ Hz sa nevyskytol vznik vnútorných väd.

Rozloženie veľkosti väd v závislosti na frekvencií rozmietať

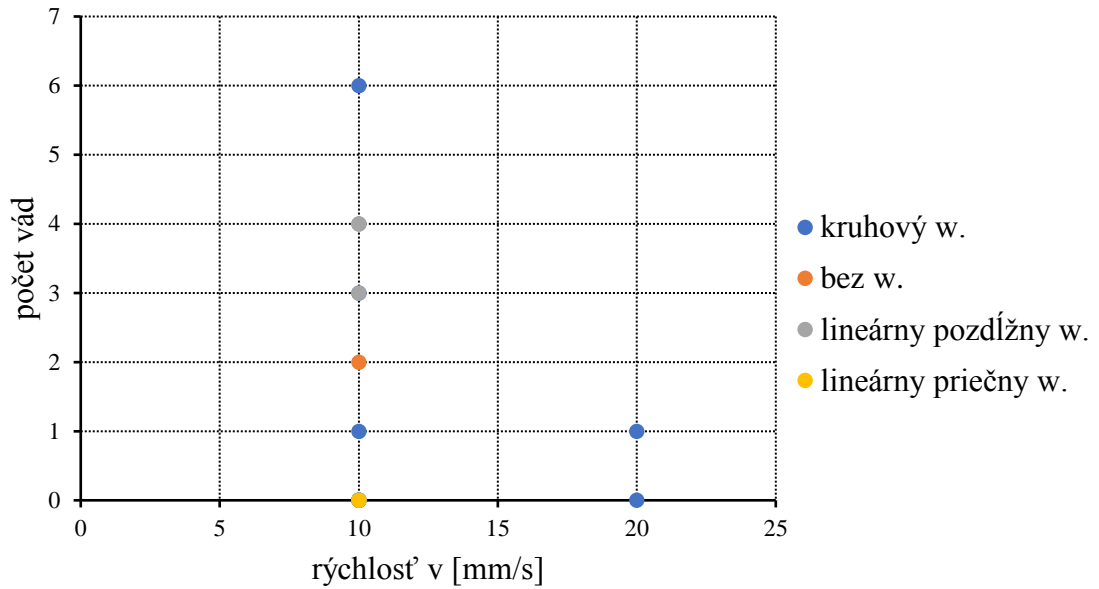


Graf 8 Rozloženie veľkosti väd v závislosti na frekvencií rozmietať

Okrem veľkosti vznikajúcich vnútorných väd je veľmi dôležité aj ich množstvo. Z tohto dôvodu sú nasledujúce grafy zobrazením rozloženia počtu väd v závislosti na skúmaných parametroch uskutočneného laserového zvárania. Prvé rozloženie na grafe 9 vyjadruje závislosť na rýchlosti zvárania. Ako je možné pozorovať z grafu a tabuľky 6, rýchlosť 10 mm/s spôsobila v prípade kruhového wobblingu buď vznik rôzne veľkých väd, prípadne nevedla k ich vzniku. U lineárneho priečného wobblingu výskyt väd nebol zistený.

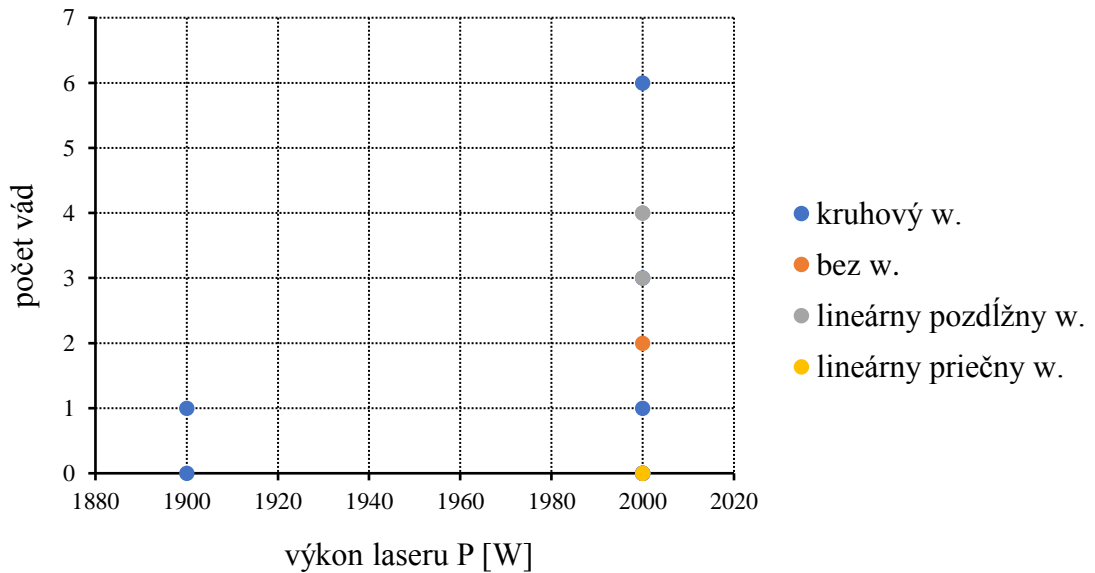
Nasledujúce rozloženie v závislosti na výkone laseru preukázalo, že menší počet väd u kruhového wobblingu vznikal v oblasti nižších výkonov, viď graf 10. Najväčšie vady vznikli v tomto režime v prípade nastavenia laseru na výkon 2000 W. U lineárneho priečného wobblingu nebola identifikovaná vada, a preto sa nastavenie 2000 W považuje za optimálnu hodnotu.

Rozloženie počtu vád v závislosti na rýchlosti



Graf 9 Rozloženie počtu vád v závislosti na rýchlosti zvarovania

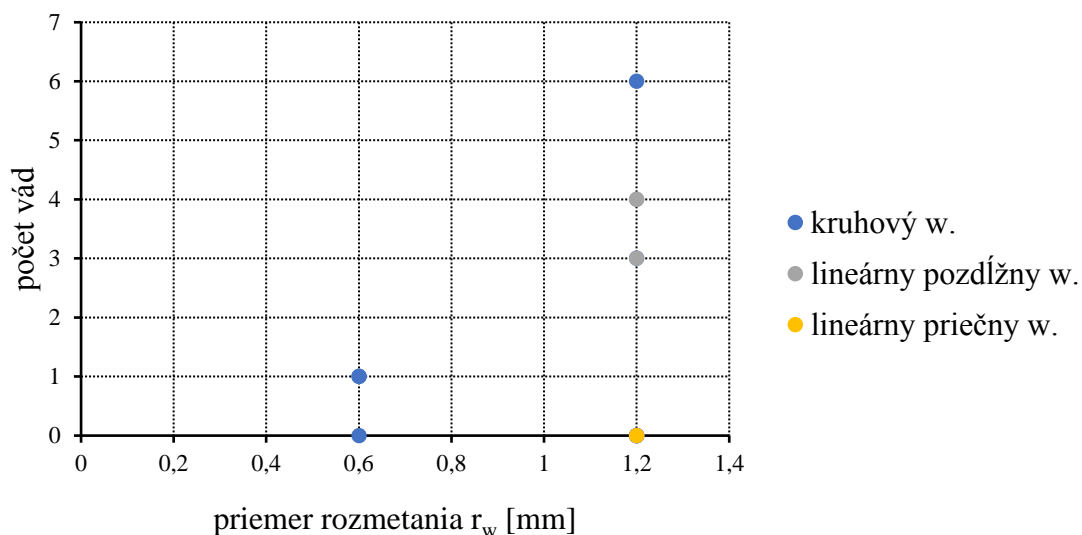
Rozloženie počtu vád v závislosti na výkone laseru



Graf 10 Rozloženie počtu vád v závislosti na výkone laseru

Graf 11 je zobrazením závislosti počtu vád na priemere rozmetania. Ako je viditeľné u kruhového wobblingu došlo k vzniku menšieho počtu vád pri nastavení menšieho priemeru. U lineárneho priečného wobblingu bol nastavený väčší priemer, pri ktorom k tvorbe vád nedošlo.

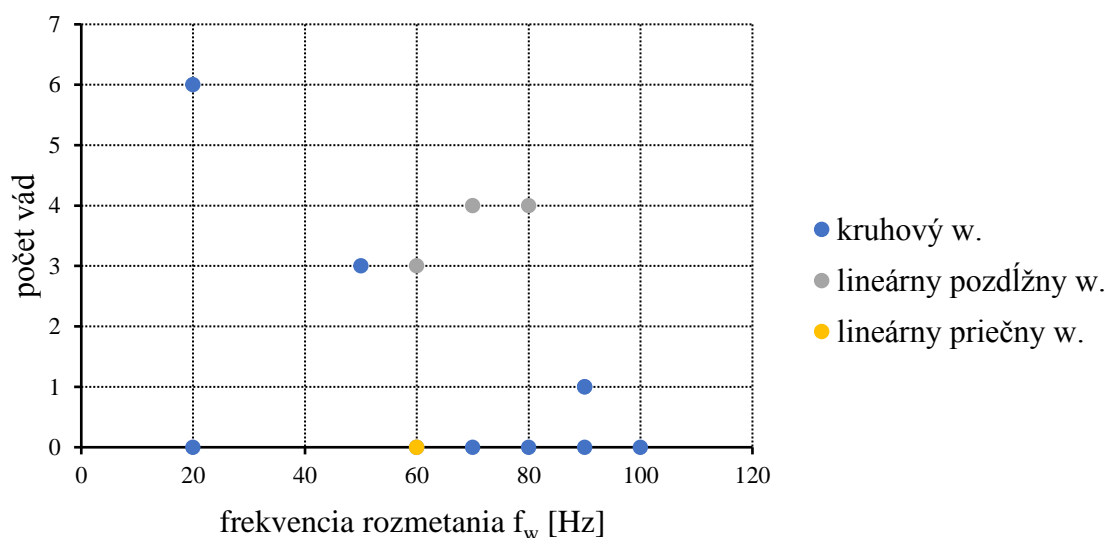
Rozloženie počtu vád v závislosti na priemere rozmetania



Graf 11 Rozloženie počtu vád v závislosti na priemere rozmetania

V prípade rozloženia počtu vád v závislosti na frekvencii rozmetania je možné na grafe 12 sledovať, že s narastajúcou frekvenciou dochádza k poklesu množstva zvarových vád u kruhového wobblingu. V prípade lineárneho priečného wobblingu sa hodnota 60 Hz javí ako optimálne, keďže pri nej neboli zistené vady.

Rozloženie počtu vád v závislosti na frekvencii rozmetania



Graf 12 Rozloženie počtu vád v závislosti na frekvencii rozmetania

5 ZÁVERY

Cieľom tejto bakalárskej práce bolo osvojenie si problematiky laserového zvarovania materiálu, ale predovšetkým tzv. metódy wobbling, použitej na zváranie hliníkovej zliatiny. Okrem toho bolo ďalším cieľom uskutočniť experiment zameraný na stanovenie súvislosti medzi zvarovými vadami a procesnými parametrami wobblingu.

Experimentálna časť pozostávala z vytvorenia skúšobných zvarov na 3 mm hrubom plechu zo zliatiny hliníku a horčíku AlMg3 (EN AW 5754 H22), na ktorých bol skúmaný vplyv procesných parametrov laseru. Pri experimente bola použitá skenovacia hlava, ktorú je možné použiť pre wobbling, aj keď v súčasnosti už existujú aj špeciálne hlavy konštruované priamo pre túto metódu. Výsledkom experimentu sú preto parametre, pri ktorých vzniká najmenší výskyt väd zvarov pri použití skenovacej hlavy.

Na detekciu zvarových väd bola použitá vizuálna skúška, u niektorých zvarov doplnená penetračnou skúškou a pre overenie vnútorných väd bola uskutočnená skúška prežiarením.

Z uskutočnených meraní vyplýva, že najvhodnejším režimom wobblingu pre tento prípad je lineárny pozdĺžny, s nasledujúcimi nastavenými parametrami – rýchlosť zvarovania $v = 10$ mm/s, výkon laseru $P = 2000$ W, polomer rozmietania $r_w = 1,2$ mm a frekvencia rozmietania $f_w = 60$ Hz. Tieto nastavenia boli použité u vzorky zvaru 13. U tejto vzorky došlo k plnému prievaru a po vizuálnom vyhodnotení neboli detekované žiadne vonkajšie vady. Po uskutočnení skúšky prežiarením bola identifikovaná rovnomerná pórovitosť, avšak na hranici prípustnosti. Z toho vyplýva predpoklad, že pri opakovaní tohto nastavenia, by mohlo dochádzať iba k malej a teda prípustnej tvorbe pórov vnútri zvarového kovu.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV [70]

1. DULEY, Walter.W. *Laser welding*. New York: A.Wiley-Interscience publication, 1999. ISBN ISBN 0-471-24679-4.
2. BENKO, Bernard, Peter FODREK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technológie*. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2000. ISBN ISBN 80-227-1425-9.
3. KURYNTSEV, Sergey V. a A. Kh. GILMUTDINOV. The effect of laser beam wobbling mode in welding process for structural steels. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015, **81**(9), 1683-1691. DOI: 10.1007/s00170-015-7312-y. ISSN 1433-3015. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7312-y>
4. YANG, Jason. New technology -- Laser direct-identification of Aluminum profile. In: *Linkedin* [online]. Fuzhou City: Linkedin, 2017 [cit. 2018-03-14]. Dostupné z: https://media.licdn.com/dms/image/C4E12AQFpcFBIOcWdtA/article-inline_image-shrink_1000_1488/0?e=2124277200&v=beta&t=sj40UdWgV1gqPK2fdySrA3e0VksN0cogDf6JV2cWcjE
5. Welding with wobbling technique. In: *Metal Working World Magazine* [online]. Milano: Metal Working World Magazine, 2016, 9 March 2016 [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <http://www.metalworkingworldmagazine.com/files/2016/03/apertura-gigante.jpg>
6. PARKER, Keith. Welding with high power diode lasers. In: *Shop Metalworking Technology* [online]. Santa Clara: Shop Metalworking Technology, 2012, 13 February 2012 [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: <http://shopmetaltech.com/images/article/1329234193.jpg>
7. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení*. Ostrava: Zeross, 2001. ISBN ISBN 80-85771-81-0.
8. KANNATEY-ASIBU, Elijah. *Principles of laser materials processing*. Hoboken, N.J.: Wiley, 2009. Wiley series on processing of engineering materials. ISBN ISBN978-0-470-17798-3.
9. OLADIMEJI, Ojo Olatunji a Emel TABAN. Trend and innovations in laser beam welding of wrought aluminum alloys. *Welding in the World*. 2016, **60**(3), 415-457. DOI: 10.1007/s40194-016-0317-9. ISSN 1878-6669. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1007/s40194-016-0317-9>
10. DUŠEK, Jiří. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *Mega blog* [online]. Praha: Megaflex, 2013, 28.2.2013 [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
11. KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery - hlavní typy laserů používaných v průmyslu. *Lao - Lasery a Optika* [online]. Praha: OptiXs, 2013 [cit. 2018-03-27]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>
12. KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery - základní princip laseru a jejich dělení. *Lao - Lasery a Optika* [online]. Praha: OptiXs, 2013 [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princip-laseru-a-jejich-deleni-127>
13. HIROSE, Akio, Kojiro F. KOBAYASHI a Hirotaka TODAKA. CO2 laser beam welding of 6061-T6 aluminum alloy thin plate. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1997, **28**(12), 2657-2662. DOI: 10.1007/s11661-997-0022-9. ISSN 1543-1940. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1007/s11661-997-0022-9>

14. The laser excellence. In: *Prima Power* [online]. Jihlava: Prima Power Central Europe, 2017 [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <https://www.primapower.com/wp-content/uploads/2015/12/5e217ff75b8e59e7b8e1391d0f488c28-627x470.jpg>
15. NOVÁK, Miroslav. Průmyslové lasery (4) - Hlavní typy laserů v průmyslové praxi. *MM spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2012 [cit. 2018-03-30]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prumyslove-lasery-4-hlavni-typy-laseru-v-prumyslove-praxi.html>
16. LÖFFLER, Klaus. Developments in disk laser welding. KATAYAMA, Seiji. *Handbook of Laser Welding Technologies* [online]. Cambridge: Woodhead, 2013, s. 73–102 [cit. 2018-04-02]. ISBN 978-0-85709-264-9. Dostupné z: <https://www.sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/book/9780857092649>
17. MANN, Kurt a Timothy MORRIS. Disk Lasers Enable Application Advancements. *Photonics* [online]. Pittsfield: Photonics Media, 2004 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: https://www.photonics.com/a17863/Disk_Lasers_Enable_Application_Advancements
18. Disk lasers. In: *Trumpf* [online]. Ditzingen: TRUMPF, 2018 [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/filestorage/TRUMPF_Master/_processed_/9/0/csm_TruDisk-resonator_34daa0c09f.jpg
19. HECHT, Jeff. Fiber lasers: The state of the art. *LaserFocusWorld* [online]. Tulsa: PennWell Corporation, 2012 [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: <https://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-48/issue-04/features/the-state-of-the-art.html>
20. ŠEBESTOVÁ, Hana. Průmyslové lasery pro svařování. *Portál moderní fyziky* [online]. Olomouc: Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého, 2009 [cit. 2018-04-06]. Dostupné z: https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/granty/sebestova_prumyslove_lasery_pro_svarovani.pdf
21. KASHIWAGI, Masahiro, Masakuni MIMURO, Katsuaki IZOE, Kentaro ICHII, Rintaro MOROHASHI, Kensuke SHIMA a Kuniharu HIMENO. High-Efficiency Linearly Polarized Fiber Laser. *Fujikura* [online]. Tokyo: Fujikura, 2010 [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: http://www.fujikura.co.jp/eng/rd/gihou/backnumber/pages/_icsFiles/afieldfile/2010/04/19/39e_01.pdf
22. SVELTO, Orazio. a D. C. HANNA. *Principles of lasers*. 5th ed. New York: Springer, 2010. ISBN ISBN978-1-4419-1301-2.
23. HOUL, Tony, Jens DIETRICH, Ingomar KELBASSA a Klaus KRASTEL. Fiber Lasers Technical Digest. *IPG photonics* [online]. Tulsa: Pennwell, 2015 [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: https://www.ipgphotonics.com/en_uploads/widget/widget_item_pdf_704.pdf?_=751132596
24. RATH, Wolfram. Fiber Laser Welding Cuts Costs and Improves Results. In: *Photonics Media* [online]. Pittsfield: Photonics Media, 2017 [cit. 2018-04-12]. Dostupné z: https://www.photonics.com/images/Web/Articles/2017/4/12/Fiber_Laser.jpg
25. Fiber Laser. In: *Fujikura* [online]. Tokyo: Fujikura, 2013 [cit. 2018-04-14]. Dostupné z: http://www.fujikura.com/img/solutions/fiberlaser/main_ph1.jpg

26. Laser Welding Fundamentals. *Amada Miyachi* [online]. Monrovia: Amada Miyachi, 2018 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: http://www.amadamiyachi.com/servlet/servlet.FileDownload?retURL=%2Fapex%2Feducationalresources_articles&file=01580000001Jz8A
27. SPROVIERI, John. Diode Lasers for Welding Aluminum. In: *Assembly* [online]. Troy: BNP Media, 2013 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <https://www.assemblymag.com/ext/resources/Issues/February2013/asb0213weld11.jpg>
28. DAHOTRE, Narendra B. a Sandip P. HARIMKAR. *Laser fabrication and machining of materials*. New York, N.Y.: Springer, 2008. ISBN ISBN978-0-387-72343-3.
29. BUNAZIV, Ivan, Odd AKSELSÉN, Antti SALMINEN a Anna UNT. Fiber laser-MIG hybrid welding of 5 mm 5083 aluminum alloy. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. New York: Elsevier, 2016, **2016**(233), 107 - 114 [cit. 2018-05-05]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.02.018>. ISSN 0924-0136. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924013616300528>
30. HINDUJA, Srichand. *Proceedings of the 34th international matador conference*. S.l.: Springer, 2012. ISBN 978-144-7111-696.
31. XIAO, Rongshi a Xinyi ZHANG. Problems and issues in laser beam welding of aluminum–lithium alloys. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. New York: Elsevier, 2014, **16**(2), 166-175 [cit. 2018-05-01]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2013.10.005>. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1526612513001229>
32. VAKILI-FARAHANI, Farzad, Juliane LUNGERSHAUSEN a Kilian WASMER. Process Parameter Optimization for Wobbling Laser Spot Welding of Ti6Al4V Alloy. *Physics Procedia* [online]. New York: Elsevier, 2016, **2016**(83), 483-493 [cit. 2018-05-01]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2016.08.050>. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1875389216301572>
33. MRŇA, Libor. Princip svařování v režimu rozmitání s různými parametry. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2017 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/content/image/gallery/000003_2017_134_1488205965/mrna_obr_04.jpg
34. SAMSON, Bryce, Tony HOULT a Mustafa COSKUN. Fiber laser welding technique joins challenging metals. *Industrial Laser Solutions for Manufacturing* [online]. Tulsa: PennWell, 2017 [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/articles/print/volume-32/issue-2/features/fiber-laser-welding-technique-joins-challenging-metals.html>
35. MICHNA, Štefan, Ivan LUKÁČ, Vladivoj OČENÁŠEK, Rudolf KOŘENÝ, Jaromír DRÁPALA, Heinz SCHNEIDER a Andrea MIŠKUFOVÁ. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005. ISBN 80-890-4188-4.
36. Hliník a jeho slitiny. *Alfun - Metal Service Center* [online]. Bruntál: ALFUN, 2012 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/o-hliniku>
37. MAŇKOVÁ, Ildikó. *Progresívne technológie: Advanced methods of material removal*. Košice: Vienala, 2000. ISBN 80-709-9430-4.

38. PODRÁBSKÝ, Tomáš, Martin JULIŠ a Karel NĚMEC. Neželezné kovy a jejich slitiny I. *Ústav materiálových věd a inženýrství* [online]. Brno: ÚMVI, 2016 [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/prednasky/09%20-%20Nezelezne%20kovy%20A.pdf
39. KOUTNÝ, Jiří. Hliníkové materiály a možnosti jejich svařování. *Svarinfo* [online]. Mělník: Svarbazar, 2006 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/storage/hlinik.pdf>
40. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.
41. KOLAŘÍK, Ladislav a Karel KOVANDA. Svařitelnost hliníkových slitin. *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2011 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-hlinikovych-slitin.html>
42. BARTÁK, Jiří. Typy vad , příčiny jejich vzniku a hodnocení. *Česká svářečská společnost ANB* [online]. Praha: CWS ANB, 2012 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=384>
43. WANG, Xiaojie, Hui-Ping WANG, Fenggui LU, Blair E. CARLSON a Yixiong WU. Analysis of solidification cracking susceptibility in side-by-side dual-beam laser welding of aluminum alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. London: Springer London, 2014, **73**(1), 73-85. DOI: 10.1007/s00170-014-5810-y. ISSN 1433-3015. Dostupné také z: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-5810-y>
44. KATAYAMA, Seiji. Defect formation mechanisms and preventive procedures in laser welding. KATAYAMA, Seiji. *Handbook of laser welding technologies* [online]. Cambridge: Woodhead Publishing, 2013, s. 332-373 [cit. 2018-04-11]. Woodhead Publishing series in electronic and optical materials. ISBN 978-0-85709-264-9. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/book/9780857092649>
45. Trhliny vznikající během výroby svařovaných konstrukcí. *Verlag Dashöfer* [online]. Praha: Verlag Dashöfer, 2013 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: https://www.dashofer.cz/download/ukazky/svk_svke/svk_ukazka2.pdf
46. SOKOLOV, Mikhail a Antti SALMINEN. Improving Laser Beam Welding Efficiency. In: *Scientific Research* [online]. Wuhan: Scientific Research Publishing, 2014 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <http://html.scirp.org/file/7-8102210x29.png>
47. Technical information: Laser processing: CO2. *TRUMPF* [online]. Ditzingen: TRUMPF Werkzeugmaschinen, 2007 [cit. 2018-05-07]. Dostupné z: http://iconmachinetool.com/education/Library_Laser_CO2_Laser.pdf
48. REMENOVÁ, Petra, Milan TURNA a Luboš KVASNA. Zváranie neželezných kovov laserovým lúčom. *Tanger* [online]. Hradec nad Moravicí: Tanger, 2004 [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <http://konference.tanger.cz/data/metal2004/sbornik/papers/35.pdf>
49. Aluminum Welding Procedure: Best Practices to Prevent Defects. *Aquasol Corporation* [online]. North Tonawanda: Aquasol, 2015 [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: <http://www.aquasolwelding.com/aluminum-welding-procedure>
50. BUREŠ, Jan. *Vady svarů*. Česká Třebová: DOM-ZO 13, 2007.

51. BARTÁK, Jiří. Trhliny za horka – teplé trhliny. *Techportal* [online]. Praha: Verlag Dashöfer, 2014 [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCydq8BIR5tUGocmyw2859YWQ
52. BARTÁK, Jiří. Omezení vzniku trhlin za horka. *Techportal* [online]. Praha: Verlag Dashöfer, 2012 [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCydqBP7--afGG7m6JsATycfA
53. ROZKOŠ, Milan. Modul Svářeč ve strojírenské výrobě. *Okresní hospodářská komora Přerov* [online]. Přerov: Okresní hospodářská komora Přerov, 2015 [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: www.hkprerov.cz/upload/image/příručka_ssp_svařeč.pdf
54. Svařování hliníku. *Techportal* [online]. Praha: Verlag Dashöfer, 2013 [cit. 2018-05-02]. Dostupné z: https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCydqpopAihMFO2Xoz27aFII0BA
55. BARTÁK, Jiří. Omezení vzniku trhlin za studena. *Techportal* [online]. Praha: Verlag Dashöfer, 2012 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: https://www.techportal.cz/searchcontent.phtml?getFile=2AXR_TUAMiBFGAgUc6BzY5pKR4a_RmSdJyeRJhvvhWt6GT3USXlrOHEn2FFltCydqBP7--afGH-KPLJjYwEI2wWZsatCpG
56. RAFIQUE, Adeel. 7 Effective Ways to Prevent Weld Undercutting. *Weldpedia* [online]. Lahore: Weldpedia, 2015 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.weldpedia.com/2015/05/7-effective-ways-to-prevent-weld-undercutting.html>
57. FROSTEVARG, Jan a Alexander F.H. KAPLAN. Undercuts in Laser Arc Hybrid Welding. *Physics Procedia* [online]. New York: Elsevier, 2014, **56**(1), 663-672 [cit. 2018-05-03]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2014.08.071>. Dostupné z: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1875389214002168>
58. Používané metody. *Gamalux - defektoskopie* [online]. Plzeň: Gamalux, 2017 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.gamalux.cz/pouzivane-metody/>
59. *ATG - Advanced Technology Group* [online]. Praha: ATG, 2012 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://www.atg.cz/>
60. Radiografická zkouška. In: *Gamalux - defektoskopie* [online]. Plzeň: Gamalux, 2017 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.gamalux.cz/wp-content/uploads/2017/01/motivSekce04.jpg>
61. LIQUID PENETRANT TESTING. In: *INTREX - International Inspection Centre* [online]. Al Ahmadi: Intrex, 2016 [cit. 2018-05-14]. Dostupné z: <http://www.intrexkw.com/media/cd587b56-767b-4d82-9f97-1e8ec9ba3be0/nd2iOA/SERVICES/Non%20Destructive%20Testing/Dye%20Penetrati on%20Testing/dpi%201.JPG?mw=1000&mh=600>

62. COUTURIER, Thierry. Olympus' Handheld Vanta XRF Analyzer. In: *Olympus* [online]. Hamburg: Olympus Europa, 2017 [cit. 2018-05-16]. Dostupné z: <https://static3.olympus-ims.com/modules/imageresizer/c6a/34e/c70e837a90/600x438p300x219.jpg>
63. Magnetic testing. In: *Welding & NDT Institute* [online]. Athens: Welding & NDT Institute, 2014 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <http://www.wndti.gr/wp-content/uploads/2013/05/%CE%9C%CE%91%CE%93%CE%9D%CE%97%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%91-%CE%A3%CE%A9%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%99%CE%94%CE%99%CE%91-1.jpg>
64. KAPUR, Raghav. YLS-2000/20000-QCW. In: *GoPhotonics* [online]. New Delhi: GoPhotonics, 2015 [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: https://cdn.specpick.com/images/photronics/c9cdf140-1-29_152_yls_2000_20000_qcw_big.jpg
65. Technická data pro IRB 2400: Pracovní rozsah. In: *ABB* [online]. Praha: ABB, 2017 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www07.abb.com/images/default-source/robotics/irb-2400-wr.jpg?sfvrsn=0>
66. Penetrační prostředky. *Testima* [online]. Praha: Testima, 2018 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://www.testima.eu/penetracni-prostredky>
67. Scan heads data sheet. *ARGES GmbH* [online]. Wackersdorf: ARGES, 2017 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: https://www.arges.de/fileadmin/downloads/scanheads/en/scan_head_data_sheet_en.pdf
68. YLS-2000/20000-QCW. *IPG Photonics* [online]. Oxford: IPG Photonics, 2015 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: https://www.ipgphotonics.com/en/86/FileAttachment/YLS-2000_20000-QCW+Datasheet.pdf
69. IRB 2400 Industrial Robot. *ABB* [online]. Västerås: ABB AB Robotics, 2018 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: http://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=PR10034EN_R7&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch
70. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2018-05-17]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

Označenie	Legenda	Jednotka
f_w	Frekvencia rozmietaia	[Hz]
P	Výkon laseru	[W]
r_w	Polomer rozmietaia	[mm]
v	Rýchlosť zvarania	[mm/s]
ČSN	Česká technická norma	
efekt.	Efektívnosť	[%]
HR-FBG	High reflector Fiber Bragg Grating	
IACS	International Annealed Copper Standard	
LR-FBG	Low reflector Fiber Bragg Grating	
MIG	Metal Inert Gas	
NDT	Nondestructive testing	
TIG	Tungsten Inert Gas	

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obr. 1 Zváranie polovodičovým laserom a wobbling [4], [5], [6]	7
Obr. 2 Schematické znázornenie CO ₂ doskového laseru [8]	7
Obr. 3 CO ₂ laser v priebehu činnosti [14]	7
Obr. 4 Schematické zobrazenie diskového laseru [8]	7
Obr. 5 3D model diskového laseru [18]	7
Obr. 6 Základné časti vláknového laseru [24]	7
Obr. 7 Reálna aplikácia vláknového laseru [25]	7
Obr. 8 Schéma diodového laseru [8]	7
Obr. 9 Vysokovýkonný diodový laser [27]	7
Obr. 10 Penetračný režim zvárania [8]	7
Obr. 11 Vznik zrútenia keyhole v procese zvárania [29]	7
Obr. 12 Kondukčný režim [8]	7
Obr. 13 Vplyv zmeny frekvencie rozmietania [33]	7
Obr. 14 Povrchové a vnútorné vady [46]	7
Obr. 15 Geometrické vady zvaru [47]	7
Obr. 16 Základné typy pórovitosti [50]	7
Obr. 17 Trhliny za tepla [52]	7
Obr. 18 Trhliny za studena [55]	7
Obr. 19 Druhy prepádov [56]	7
Obr. 20 RT skúška – indikácie [60]	7
Obr. 21 Postup PT skúšky [61]	7
Obr. 22 Princíp UT skúšky [62]	7
Obr. 23 MT skúška zvaru [63]	7
Obr. 24 Vláknový laser [64]	7
Obr. 25 Skenovacia hlava	7
Obr. 26 Robotické rameno ABB [65]	7
Obr. 27 Skúšobné zvary – pohľad zdola	7
Obr. 28 Skúšobné zvary – pohľad zhora	7
Obr. 29 Schéma miest rezov	7
Obr. 30 Makroskopická snímka zvaru	7
Obr. 31 Snímka zvaru po PT skúške	7
Obr. 32 Snímka negatívu z RT skúšky	7

ZOZNAM TABULIEK

Tab. 1 Typy laserov používaných v priemysle [10], [11].....	10
Tab. 2 Režimy zvarovania metódou wobbling [34]	18
Tab. 3 Prehľad vlastností hliníku [35]	19
Tab. 4 Rozdelenie zliatin hliníku [35]	20
Tab. 5 Chemické zloženie zvarovanie zliatiny	31
Tab. 6 Zváracie parametre a identifikované vady.....	32

ZOZNAM GRAFOV

Graf 1 Počet dobrých a prepadnutých zvarov u kruhového wobblingu a bez wobblingu	34
Graf 2 Počet dobrých a prepadnutých zvarov u pozdĺžneho a priečného lineárneho wobblingu	35
Graf 3 Počet zvarov s výskytom vád u kruhového wobblingu a bez wobblingu.....	35
Graf 4 Počet zvarov s výskytom vád u pozdĺžneho a priečného lineárneho wobblingu	36
Graf 5 Rozloženie veľkosti vád v závislosti na rýchlosti zvarovania.....	36
Graf 6 Rozloženie veľkosti vád v závislosti na výkone laseru	37
Graf 7 Rozloženie veľkosti vád v závislosti na priemere rozmietaťnia	37
Graf 8 Rozloženie veľkosti vád v závislosti na frekvencií rozmietaťnia	38
Graf 9 Rozloženie počtu vád v závislosti na rýchlosti zvarovania	39
Graf 10 Rozloženie počtu vád v závislosti na výkone laseru	39
Graf 11 Rozloženie počtu vád v závislosti na priemere rozmietaťnia	40
Graf 12 Rozloženie počtu vád v závislosti na frekvencií rozmietaťnia	40

ZOZNAM PRÍLOH

- Príloha 1 Materiálový list zliatiny hliníku AlMg3H22 (EN AW-5754)
- Príloha 2 Makrosnímky uskutočnených zvarov
- Príloha 3 Snímky vybraných zvarov z penetračnej skúšky
- Príloha 4 Snímky zvarov zo skúšky prežiarením
- Príloha 5 Protokoly RT skúšky
- Príloha 6 Penetračné prostriedky [66]
- Príloha 7 Použitá zvaracia zostava
- Príloha 8 Skenovacia hlava Arges Fiber Rhino 31 [67]
- Príloha 9 Vláknový laser IPG Photonics [68]
- Príloha 10 Robotické rameno ABB [69]




Profilglass S.p.A.

Via Meda, 28 - 61030 Bellocchi di Fano (PU) - Italy

0002908484
0002908520
0002908522

EN 15088

14
1035-CPR-E5054800for "DoP-DECLARATION OF PERFORMANCE"
see official Profilglass site www.profilglass.it
DoP R.2

Delivery Address		Business Partner		INSPECTION CERTIFICATE N°		CRP723235		
ALUMECO CZ S.R.O. Lidická 316/28 66451 SLAPANICE Czech Republic		ALUMECO CZ S.R.O.		EN 10204 3.1				
				Sales Document		Sales Invoice		
				VXP702107 2017-03-10		VFC 21701703		
Description of the product BASF3000H221000020000MNA				BAND, 5754 s.3 H22 1000x2000 MF T-0,10 carta				
Alloy	Thick.	Temper	Width	Length	Fin.	Tol.	Prot.	
5754	3	H22	1000	x2000	MF	neg.	Paper	
Mechanical Properties								
Rp0,2 MPa	Rm MPa	A50mm %	A5mm %					
137,84	220,96	13,64	15,60					
Chemical Composition (%) (EN-573-3)								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0,205	0,346	0,029	0,246	3,147	0,036	0,034	0,018	95,903
Handling Unit								
PPP7093750903705		PPP7093750903765		PPP7093750903760				
KG 1.117		KG 1.119		KG 1.120				
Approvato da: (Approved by)								
 Ing. Francesco Bilancioni Quality Manager								
Lot : 7706/171								
Detail Orders		VEL700700						
Customer Code		Ref. Customer Specifications		Customer Order		Order Date		
				120350992		2017-01-30		

Norm EN-573-3, EN-485, EN 1386, EN 683, EN 546, EN 851 according to the product.
We hereby certify, that the material described above has been tested and complies with the order.
Dichiariamo che i prodotti forniti sono stati testati e sono conformi ai requisiti dell'ordine.
We hereby certify, that the material described above has been tested and complies with the order.
Es wird bestätigt, dass die gelieferte Ware geprüft wurde und den Vereinbarungen der Bestellung entspricht.

Profilglass S.p.A. Via Meda, 28 Zona Ind.le Bellocchi - 61030 Bellocchi di Fano (PU) - Italy

Tel. +39 0721 856711 r.a Fax +39 0721 855520 - e-mail: info@profilglass.it - www.profilglass.it

Registro Imprese: Pesaro Urbino n. 00706270410 Capitale Sociale euro 5.700.000 i.v. Codice Fiscale P.IVA VAT IT00706270410

Skúšobný zvar č. 1

- *kruhový wobbling, malá plošná hustota, natavený len povrch*



Skúšobný zvar č. 2

- *kruhový wobbling, dobrá hĺbka, pórovitosť*



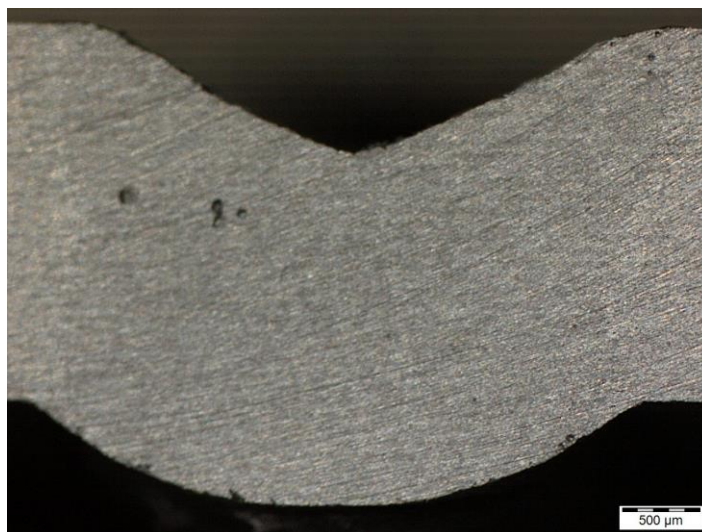
Skúšobný zvar č. 3

- *kruhový wobbling, pretavená celá hrúbka, prepadnutý zvar, pórovitosť*



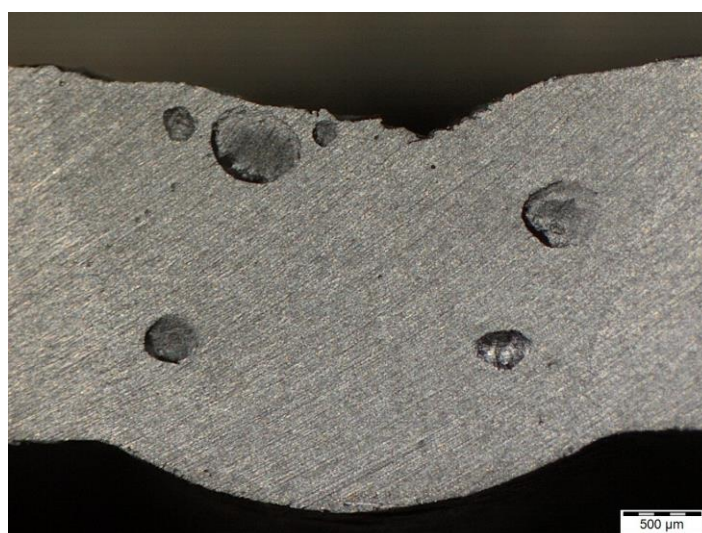
Skúšobný zvar č. 4

- *kruhový wobbling, pretavená celá hrúbka, silno prepadnutý zvar, bez pórov*



Skúšobný zvar č. 5

- *kruhový wobbling, pretavená celá hrúbka, mierne prepadnutý zvar, veľké množstvo pórov. Šírka zvaru podobná ako u skúšobného zvaru č. 4 s polovičným r_w*



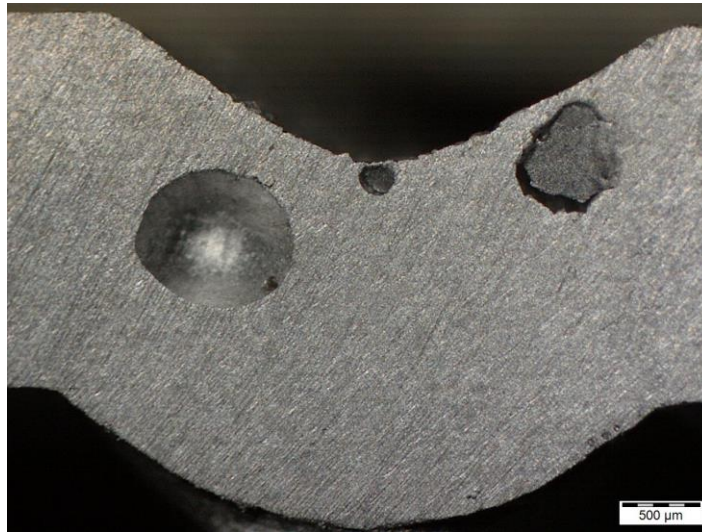
Skúšobný zvar č. 6

- *kruhový wobbling, natavená len povrchová vrstva*



Skúšobný zvar č. 7

- *kruhový wobbling, silno prepadnutý zvar, veľké póry*



Skúšobný zvar č. 8

- *kruhový wobbling, menšia hĺbka, prepadnuté okraje zvaru*



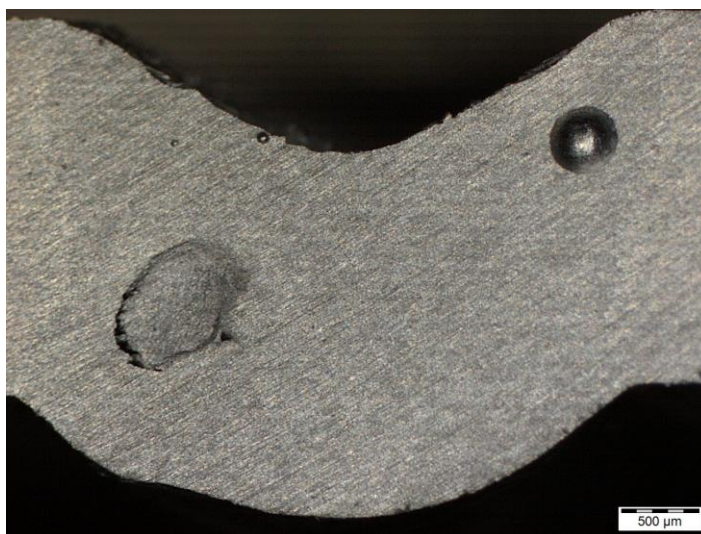
Skúšobný zvar č. 9

- *kruhový wobbling, malá hĺbka, jedna strana zvaru prepadnutá, bez pórov*



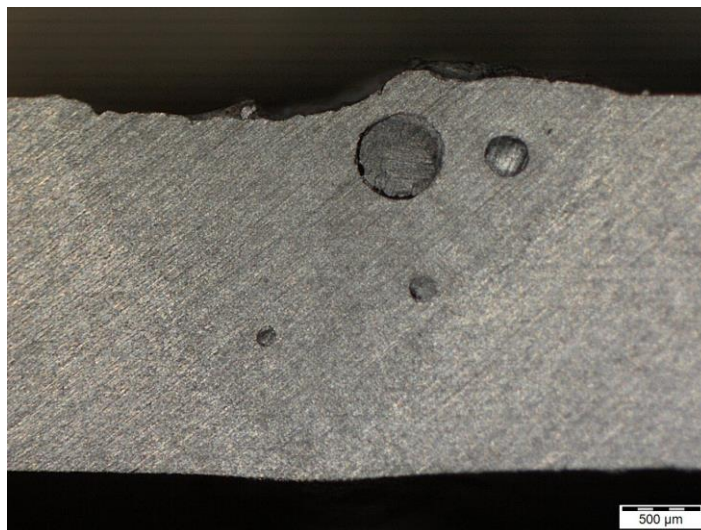
Skúšobný zvar č. 10

- *bez wobblingu, silno propadnutý zvar, veľké póry*



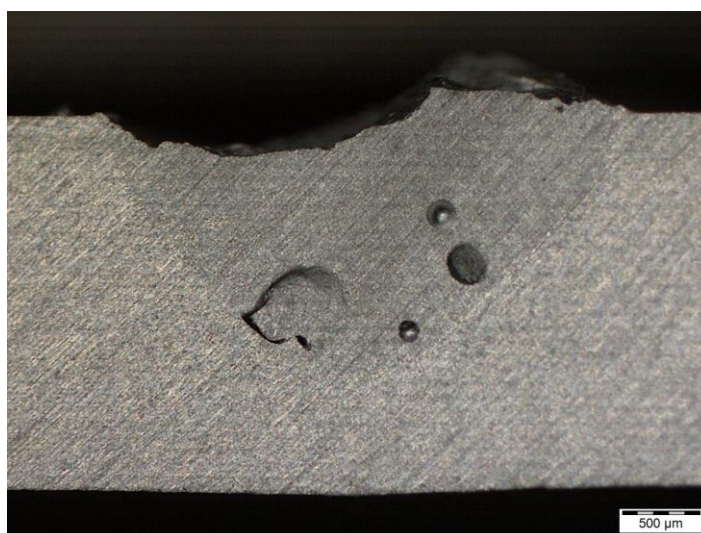
Skúšobný zvar č. 11

- *lineárny wobbling – pozdĺžny, dobrá hĺbka, nadmerná pórovitosť*



Skúšobný zvar č. 12

- *lineárny wobbling – pozdĺžny, menšia hĺbka, na jednej strane prepadnutý zvar, nadmerná pórovitosť*



Skúšobný zvar č. 13

- *lineárny wobbling – pozdĺžny, plný prievar, dobrý zvar, bez pórov*



Skúšobný zvar č. 13A

- *lineárni wobbling – pozdĺžny, menší prievar, výskyt pórovitosti, rez v 1/4 zvaru.*



Skúšobný zvar č. 13B

- lineárny wobbling – pozdĺžny, veľmi malý závar, bez pórov, rez v $\frac{3}{4}$ zvaru.

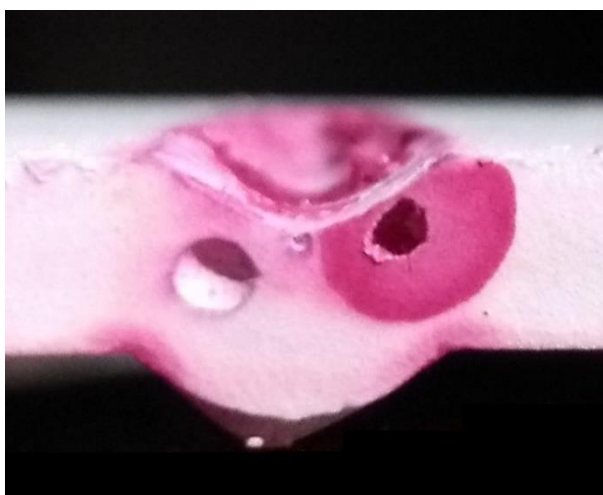


Skúšobný zvar č. 14

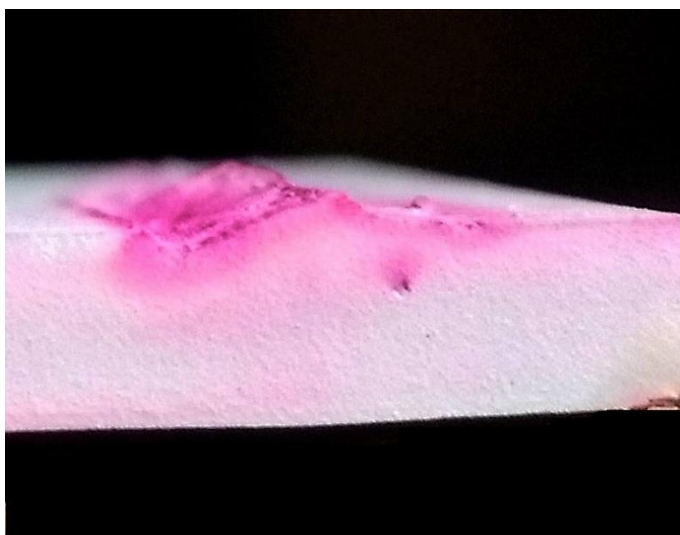
- lineárny wobbling - priečny. širší závar, silno prepadnuté boky zvaru, bez pórov.



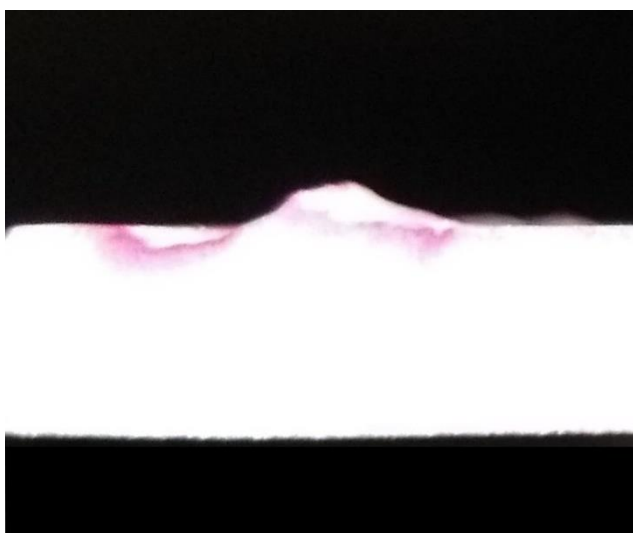
Skúšobný zvar č. 7



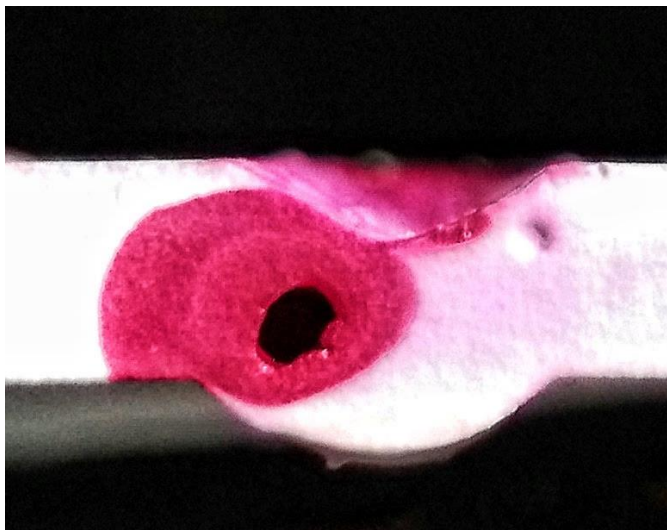
Skúšobný zvar č. 8



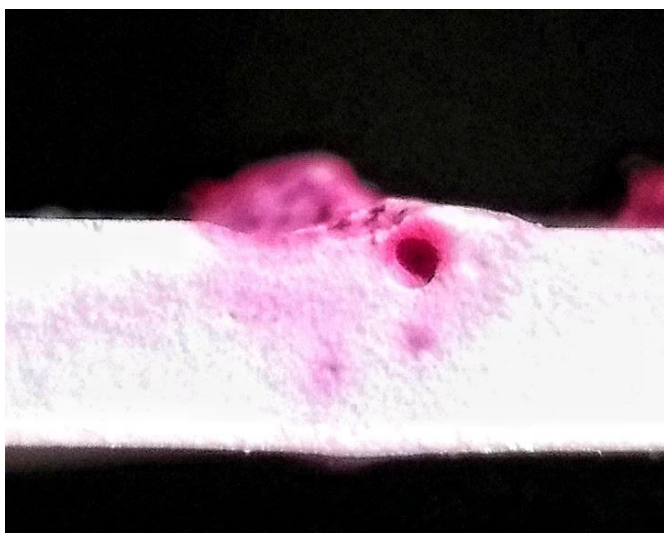
Skúšobný zvar č. 9



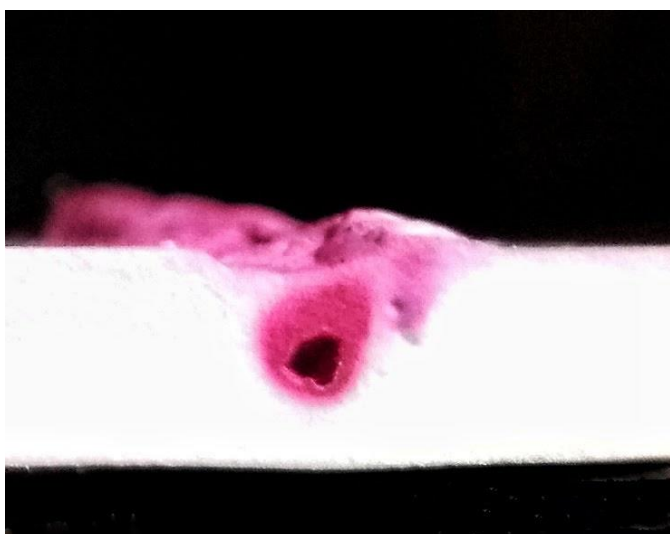
Skúšobný zvar č. 10



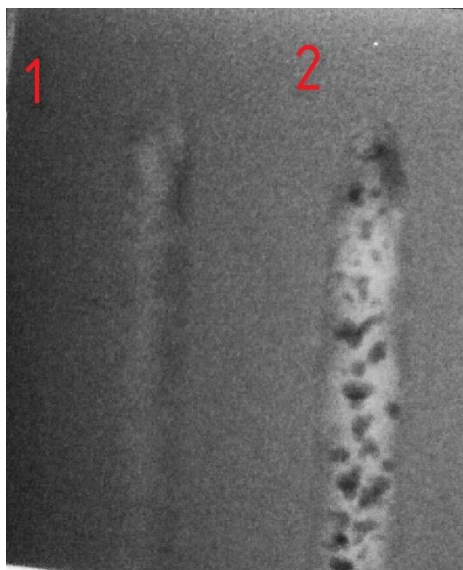
Skúšobný zvar č. 11



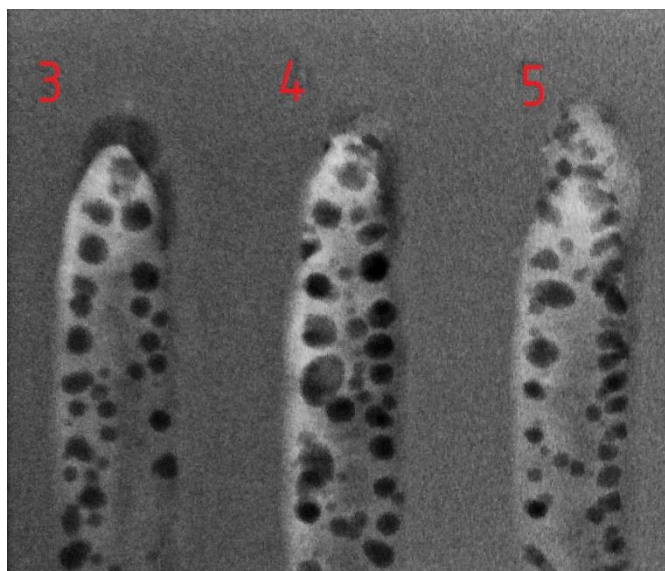
Skúšobný zvar č. 12



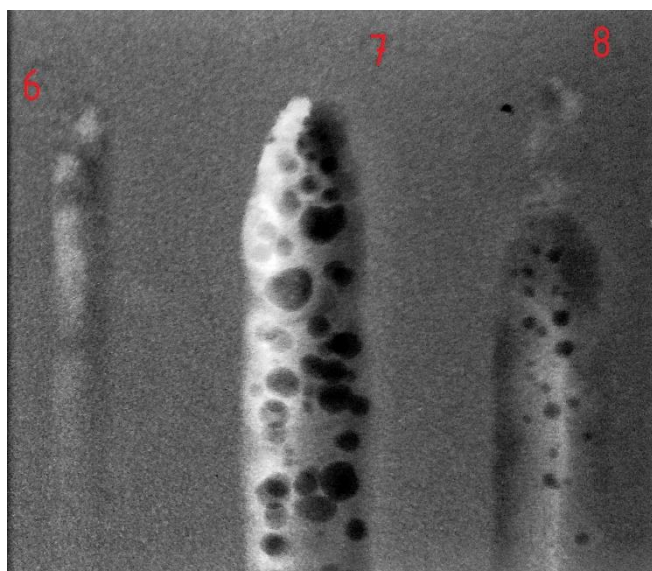
Skúšobné zvary č. 1 a 2



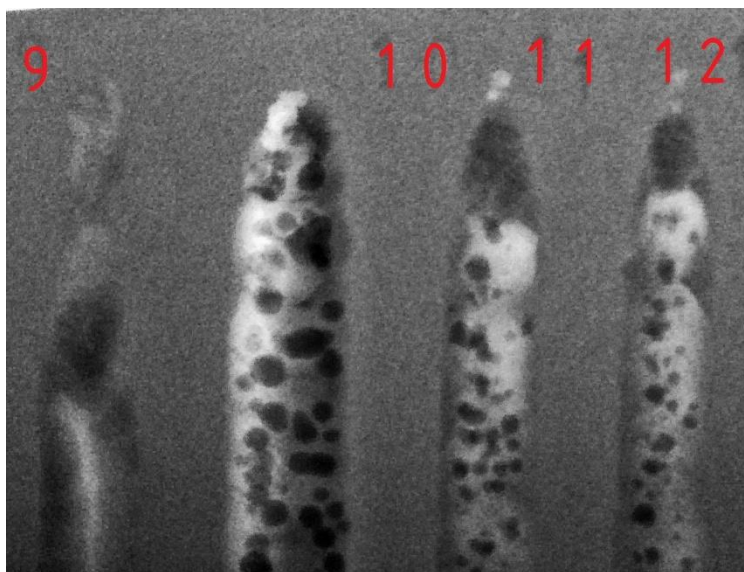
Skúšobné zvary č. 3, 4 a 5



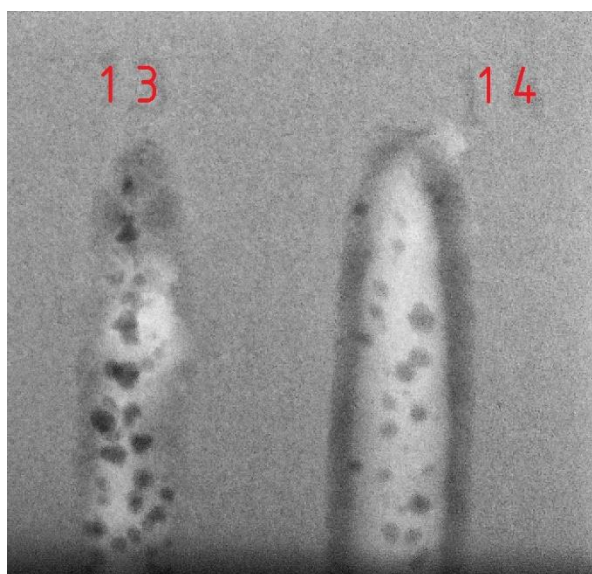
Skúšobné zvary č. 6, 7 a 8



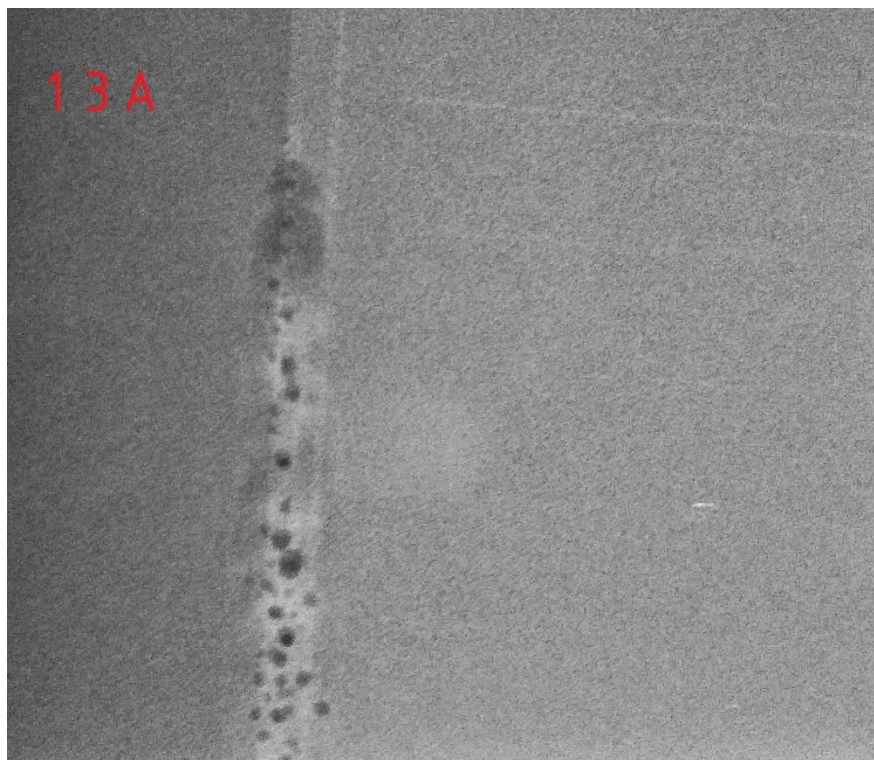
Skúšobné zvary č. 9, 10, 11 a 12



Skúšobné zvary č. 13 a 14



Skúšobný zvar č. 13A



Skúšobný zvar č. 13B



RT	PROTOKOL O ZKOUŠCE PROZAŘOVÁNÍM RADIOGRAPHIC EXAMINATION REPORT PROTOKOLL DURCHSTRAHLUNGSPRÜFUNG		Číslo / No. / Nr. 3-200/18
			Strana / Page / Seite 1 z / of / von 2
	Dokument kontroly podle / Inspection document according to / Prüfbescheinigung gemäß ČSN EN 10 204		3.1 <input checked="" type="checkbox"/>

Součást: / Component: / Bestandteil: Zkušební vzorky Al plech	Ks: / Pcs.: / St.: 4	Zakázkové číslo: / Mfr's Job No.: / Bestellung Nr.:
Výrobní číslo: / Mfr's seriál No.: / Fabrik Nr.:	Materiál: / Material: / Material: AlMg3	
Plán NDE č.: / NDE Plan No.: / NDE Plan Nr.:	Číslo výkresu: / Drawing No.: / Zeichnung Nr.:	
Pozice-č. svaru / Rozsah zkoušky: / Position weld / range of examin. / Position - Schwshnt. Nr. / Prüber.: 100%	Postup č.: / Procedure No.: / Vorschrift Nr.: IQ 8.2.4-02.01 r.2	
Specifikace: / Specification: / Spezifikation: EN ISO 17636- 1	Hodnocení dle: / Evaluation acc. to: / Auswertung nach: EN ISO 10675-2	
Zkoušený předmět / Subject of examination / Prüfobjekt	<input checked="" type="checkbox"/> Bez tepelného zpracování / No P.W.H.T. / Ohne Wärmebehandlung	Povrch / Surface / Oberfläche
<input checked="" type="checkbox"/> Dokončený svar / Completed weld / Fertige Schweissnaht	<input type="checkbox"/> Před tepelným zpracováním / Before P.W.H.T. / Vor Wärmebehandlung	<input type="checkbox"/> Kartáčované / Brushine / Bürsten
<input type="checkbox"/> Kořen svaru / Root laver / Schweissnahtwurzel	<input type="checkbox"/> Po tepelném zpracování / After P.W.H.T. / Nach Wärmebehandlung	<input type="checkbox"/> Broušený / Grindine / Geschärften
<input type="checkbox"/> Odlietek / Zákl. materiál / Část / Base material / Abguss / Grundmaterial	<input type="checkbox"/> Po tlakové zkoušce / After Pressure test / Nach Druckprobe	<input type="checkbox"/> Pískovaný / Sand blasting / Besandet

Technické údaje / Technical data / Technische prüfdaten

Zdroj záření / Radiat. source / Strahlenquelle	<input checked="" type="checkbox"/> Rentgenový přístroj / X-ray unit / Röntgen Gerät	<input type="checkbox"/> ¹⁹² Ir	<input type="checkbox"/> ⁶⁰ Co
	<input type="checkbox"/> Izotop / Isotope / Isotop	Aktivita / Activity / Aktivität Ci / Bq	
	Typ / Type / Type Seifert Isovolt 420	Rozměr zdroje / Source size / Quellgröße 4,5 x4,5 mm	
Expoziční uspořádání / Exposure arrangement / Expositionanordnung	Označení / Marking / Markierung A		
	<input checked="" type="checkbox"/> Přes jednu stěnu / Single wall / Einwandige Durchstr. Pozice - č. svaru / Position - Weld No. / Position - Schwsn. Nr. 13B,1,6,9		
	<input type="checkbox"/> Přes dvě stěny / Double wall / Doppelwanddurchstr. Pozice - č. svaru / Position - Weld No. / Position - Schwsn. Nr.		
Měrka / Penetrameter / Penetrameter.	Označení / Marking / Markierung EN A13	<input checked="" type="checkbox"/> Strana zdroje / Source side / Quelleseite	Pozice - č. svaru / Position - Weld No. / Position - Schwsn. Nr. 13B,1,6,9
	Označení / Marking / Markierung	<input type="checkbox"/> Strana filmu / Film side / Filmseite	Pozice - č. svaru / Position - Weld No. / Position - Schwsn. Nr.
Ragiograf. film / RT - film / RT - film	Výrobce / Producer / Erzeuger	Pozice - č. svaru / Position - Weld No. / Position - Schwsn. Nr. 13B,1,6,9	
	<input checked="" type="checkbox"/> Kodak	Folie / Screen / Folien <input type="checkbox"/> Pb <input type="checkbox"/>	Přední / Front / Vordere mm
			Zadní / Back / Hintere 1,0 mm
	Výrobce / Producer / Erzeuger	Pozice - č. svaru / Position - Weld No. / Position - Schwsn. Nr.	
	Folie / Screen / Folien <input type="checkbox"/> Pb <input type="checkbox"/>	Přední / Front / Vordere mm	Zadní / Back / Hintere mm
	Negativní zpracování / Film processing / Filmarbeitung	<input checked="" type="checkbox"/> Automatem / Automat / Automat	<input type="checkbox"/> Ruční / Hand / Hand
Značení / Marking / Markierung	<input type="checkbox"/> Ražením / Stamp / Prägung	<input checked="" type="checkbox"/> Popis barvou / Colour description / Farbenbeschreibung	<input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Na zákl. materiál / On base material / An Grundmaterial	<input type="checkbox"/> Na štítek / On rating plate / An Blechschild	<input type="checkbox"/>

RT	PROTOKOL O ZKOUŠCE PROZAŘOVÁNÍM RADIOGRAPHIC EXAMINATION REPORT PROTOKOLL DURCHSTRAHLUNGSPRÜFUNG				Číslo / No. / Nr. 3-200/18														
	Dokument kontroly podle Inspection document according to		ČSN EN 10 204	3.1 <input checked="" type="checkbox"/>	3.2 <input type="checkbox"/>	Strana Page Seite													
Druh vady Kind of defect Fehlerart (ISO 6520)		Vyhodnocení Evaluation Auswertung		Vyhodnocení Evaluation Auswertung															
Pozice - č. svaru / Position - Weld No. Position - Schweiß-Nr.	Číslo / No. / Nr.	Typ filmu / Film type Film type	Formát / Format (cm) Format	Zčernání / Density Schwarzung	Rozesratelnost / Image quality Bildgüte	Uspořádání Arrangement Anordnung	Expozice Exposure Exposition	Expoz. čas / Exposure time Bestrahlungszeit	Typ svaru / Weld type / Schweißnaht-Typ	Číslo svařece / Welder No. Schweißer-Nr.	Druh vady Kind of defect Fehlerart (ISO 6520)	Vyhovuje / Accepted Angenommen	Nevyhovuje / Not accepted Unannehmbar	Vyhovuje po opr. / Accept after rep. / Angenommen nach Verbesserung	Poznámka / Note Bemerkung				
13B	1	MX125	10x12	3.4	17	2	600	2	50	0.5	8'				2012	X			*1
1	1	MX125	10x12	3.5	17	2	600	2	50	0.5	8'					X			*1
6	1	MX125	10x12	3.0	17	2	600	2	50	0.5	8'					X			*1
9	1	MX125	10x12	3.2	17	2	600	2	50	0.5	8'					X			*1
101	-	Podélná trhлина	101	Longitudinal crack	101	-	Langriss												
102	-	Příčná trhлина	102	Transverse crack	102	-	Querriß												
106	-	Rozvětvená trhлина	106	Branching crack	106	-	Verastetriss												
2011	-	Bublina	2011	Gas pore	2011	-	Gaspore												
2013	-	Shluk bublin	2013	Localised (clustered) porosity	2013	-	Porennest												
2014	-	Radka bublin	2014	Linear porosity	2014	-	Porenzelle												
2015	-	Pór	2015	Elongated porosity	2015	-	Gaskanal												
3011	-	Rádkový strusk. vměstek	3011	Slag inclusion lines	3011	-	Schlackeneinschlusszelle												*1 -
3012	-	Jednotl. strusk. vměstek	3012	Slag inclusion	3012	-	Schlackeneinschluss												
304	-	Kovový vměstek	304	Metallic inclusion	304	-	Metallischer Einschluss												
401	-	Studený spoj	401	Lack of (incompl.) fusion	401	-	Bindefehler												
402	-	Neprovařený koreň	402	Lack of (incompl.) penetration	402	-	Ungenügende durchschweißung												*2 -
5011	-	Zápal (průběžný)	5011	Undercut (continuous)	5011	-	Einbrandkerbe (durchgehend)												
5012	-	Zápal (přerušovaný)	5012	Undercut (interrupted)	5012	-	Einbrandkerbe (intermittierend)												
504	-	Nadměrná propadlá kofen	504	Excessive penetration	504	-	Zu grosse wurzeibehohung												
514	-	Nerovná povrch	514	Irregular surface	514	-	Unregelmäßige Nahtzeichnung												
FD	-	Vada filmu	FD	Film defected	FD	-	Film fehler												

Zkoušel / Číslo certifikátu Operator / Certificate No. Prüfer / Zertifikat Nr.	POHLODEK M 301-04004	Inspekční organizace Inspection agency Übernahmegesellschaft
Vyhodnotil / Číslo certifikátu Evaluated / Certificate No. Auswertung / Zertifikat Nr.	OLŠANSKÝ V 3197- CERT- NDT - 0341 - 15	
Datum / Podpis Date / Signature Datum / Unterschrift	26.4.2018	

KRÁLOVOPOLSKÁ, a.s.
NOE zkusebna ①

RT	PROTOKOL O ZKOUŠCE PROZAŘOVÁNÍM RADIOGRAPHIC EXAMINATION REPORT PROTOKOLL DURCHSTRAHLUNGSPRÜFUNG		Číslo / No. / Nr. 3-201/18	
			Strana Page Seite 1 of von 2	
Dokument kontroly podle Inspection document according to Prüfbescheinigung gemäß		ČSN EN 10 204	3.1 <input checked="" type="checkbox"/>	3.2 <input type="checkbox"/>

Součást: Component: Bestandteil:	Zkušební vzorky Al plech	Ks: Pcs.: St.:	12	Zakázkové číslo: Mfr's Job No.: Bestellung Nr.:	
Výrobní číslo: Mfr's seriál No.: Fabrik Nr.:		Materiál: Material: Material:		AlMg3	
Plán NDE č.: NDE Plan No.: NDE Plan Nr.:		Číslo výkresu: Drawing No.: Zeichnung Nr.:			
Pozice-č. svaru / Rozsah zkoušky: Position weld/range of examin. Position – Schwshnt. Nr. / Prüber.:	100%	Postup č.: Procedure No.: Forschrift Nr.:		IQ 8.2.4-02.01 r.2	
Specifikace: Specification: Spekifikation:	EN ISO 17636- 1	Hodnocení dle: Evaluation acc. to: Auswertung nach:		EN ISO 10675-2	
Zkoušený předmět Subject of examination Prüfobjekt	<input checked="" type="checkbox"/>	Bez tepelného zpracování No P.W.H.T. Ohne Wärmebehandlung	<input type="checkbox"/>	Povrch Surface Oberfläche	
<input checked="" type="checkbox"/> Dokončený svar Completed weld Fertige Schweissnaht	<input type="checkbox"/>	Před tepelným zpracováním Before P.W.H.T. Vor Wärmebehandlung	<input type="checkbox"/>	Kartáčovaný Brushine Bürsten	
<input type="checkbox"/> Kořen svaru Root laver Schweissnahtwurzel	<input type="checkbox"/>	Po tepelném zpracování After P.W.H.T. Nach Wärmebehandlung	<input type="checkbox"/>	Broušený Grindine Geschärft	
<input type="checkbox"/> Odlítek / Zákl. materiál Část / Base material Abguss / Grundmaterial	<input type="checkbox"/>	Po tlakové zkoušce After Pressure test Nach Druckprobe	<input type="checkbox"/>	Pískovaný Sand blasting Besandet	

Technické údaje / Technical data / Technische prüfdaten

Zdroj záření Radiat. source Strahlenquelle	<input checked="" type="checkbox"/> Rentgenový přístroj X-ray unit Röntgen Gerät	<input type="checkbox"/> ¹⁹² Ir	<input type="checkbox"/> ⁶⁰ Co
	<input type="checkbox"/> Izotop Isotope Isotop	Aktivita Activity Aktivität	Ci / Bq
	Typ Type Type	Seifert Isovolt 420	Rozměr zdroje Source size Quellegrosse
Expoziční uspořádání Exposure arrangement Expositionanordnung	Označení Marking Markierung	A	
	<input checked="" type="checkbox"/> Přes jednu stěnu Single wall Einwandige Durchstr.	Pozice - č. svaru Position - Weld No. Position – Schwsn. Nr.	13A,2-5,7,8,10-14,
	<input type="checkbox"/> Přes dvě stěny Double wall Doppelwanddurchstr.	Pozice - č. svaru Position - Weld No. Position – Schwsn. Nr.	
Měrka Penetrameter Penetrameter.	Označení Marking Markierung	EN Al13	<input checked="" type="checkbox"/> Strana zdroje Source side Quelleseite
	Označení Marking Markierung		<input type="checkbox"/> Strana filmu Film side Filmseite
			Pozice - č. svaru Position - Weld No. Position – Schwsn. Nr.
Ragiograf. film RT - film RT - film	Výrobce Producer Erzeuger	Pozice - č. svaru Position - Weld No. Position – Schwsn. Nr.	13A,2-5,7,8,10-14
	<input checked="" type="checkbox"/> Kodak	Folie Screen Folien	<input type="checkbox"/> Pb <input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>	Přední Front Vordere	mm
	<input type="checkbox"/>	Zadní Back Hintere	1,0 mm
	Výrobce Producer Erzeuger	Pozice - č. svaru Position - Weld No. Position – Schwsn. Nr.	
	<input type="checkbox"/>	Folie Screen Folien	<input type="checkbox"/> Pb <input type="checkbox"/>
	<input type="checkbox"/>	Přední Front Vordere	mm
	<input type="checkbox"/>	Zadní Back Hintere	mm
	Negativní zpracování Film processing Filmarbeitung	<input checked="" type="checkbox"/> Automatem Automat Automat	<input type="checkbox"/> Ruční Hand Hand
Značení Marking Markierung	<input type="checkbox"/> Ražením Stamp Prägung	<input checked="" type="checkbox"/> Popis barvou Colour description Farbenbeschreibung	<input type="checkbox"/>
	<input checked="" type="checkbox"/> Na zákl. materiál On base material An Grundmaterial	<input type="checkbox"/> Na štítek On rating plate An Blechschild	<input type="checkbox"/>

RT	PROTOKOL O ZKOUŠCE PROZAŘOVÁNÍM RADIOGRAPHIC EXAMINATION REPORT PROTOKOLL DURCHSTRAHLUNGSPRÜFUNG										Číslo / No. / Nr. 3-201/18					
											Strana Page Seite	z of von				
Dokument kontroly podle Inspection document according to Prüfbescheinigung gemäß										ČSN EN 10 204	3.1	X	3.2			
Pozice - č. svaru / Position - Weld No. Position - Schwrsn. Nr.	Radiogram Radiogram Radiogramm				Uspořádání Arrangement Anordnung			Expozice Exposure Exposition			Druh vady Kind of defect Fehlerart (ISO 6520)	Vyhodnocení Evaluation Auswertung				
	Číslo / No. / Nr.	Typ filmu / Film type Film type	Formát / Format (cm) Format	Změrnění / Density Schwartzung	Rozeznatelnost / Image quality Bildgüte	t (mm)	D (f) (mm)	d (b) (mm)	kV	mA		Expoziční čas / Exposure time Bestrahlungszeit	Typ svaru / Weld type / Schweißnaht-Typ	Číslo svářeče / Welder No. Schweißer Nr.	Vyhovuje/Accepted Angenommen	Nevyhovuje / Not accepted Unannehmbar
13A	1	MX125	10x12	3,4	17	2	600	2	50	0,5	8'		2012	X		*1
2	1	MX125	10x12	3,5	17	2	600	2	50	0,5	8'		2012	X		*1
3	1	MX125	10x12	3,4	17	2	600	2	50	0,5	8'		2012	X		*1
4	1	MX125	10x12	3,3	17	2	600	2	50	0,5	8'		2012	X		*1
5	1	MX125	10x12	3,3	17	2	600	2	50	0,5	8'		2012	X		*1
7	1	MX125	10x12	3,2	17	2	600	2	50	0,5	8'		2012	X		*1
8	1	MX125	10x12	3,4	17	2	600	2	50	0,5	8'		2012	X		*1
10	1	MX125	10x12	3,2	17	2	600	2	50	0,5	8'		2012	X		*1
11	1	MX125	10x12	3,3	17	2	600	2	50	0,5	8'		2012	X		*1
12	1	MX125	10x12	3,2	17	2	600	2	50	0,5	8'		2012	X		*1
13	1	MX125	10x12	3,3	17	2	600	2	50	0,5	8'		2012	X		*1
14	1	MX125	10x12	3,2	17	2	600	2	50	0,5	8'		2012	X		*1
101	-	Podélná trhлина				101	Longitudinal crack					101	-	Langriss		
102	-	Příčná trhлина				102	Transverse crack					102	-	Querriß		
106	-	Rozvětvená trhлина				106	Branching crack					106	-	Verastriß		
2011	-	Bublina				2011	Gas pore					2011	-	Gaspore		
2013	-	Síhlik bublin				2013	Localised (clustered) porosity					2013	-	Porennest		
2014	-	Rádka bublin				2014	Linear porosity					2014	-	Porenzelle		
2015	-	Por				2015	Elongated porosity					2015	-	Gaskanal		
3011	-	Rádkový strusk. vměstek				3011	Slag inclusion lines					3011	-	Schlackeneinschlussschle	*1	Hodnocení jedné stěny Single-wall viewing
3012	-	Jednotl. strusk. vměstek				3012	Slag inclusion					3012	-	Schlackeneinschluss		
304	-	Kovový vměstek				304	Metalle inclusion					304	-	Metallischer Einschluss		
401	-	Studený spoj				401	Lack of (incompl.) fusion					401	-	Bindefehler		
402	-	Nerovnosti kořen				402	Lack of (incompl.) penetration					402	-	Ungenügende durchschweißung		
5011	-	Zápal (průběžný)				5011	Undercut (continuous)					5011	-	Einbrandkerbe (durchgehend)	*2	Hodnocení dvou stěn Double-wall viewing
5012	-	Zápal (přerušovaný)				5012	Undercut (interrupted)					5012	-	Einbrandkerbe (intermittierend)		
504	-	Nadměrné propadlý kořen				504	Excessive penetration					504	-	Zu grosse wurzelbehohung		
514	-	Nepřavidelný povrch				514	Irregular surface					514	-	Unregelmäßige Nahtzeichnung		
FD	-	Vada filmu				FD	Film defected					FD	-	Film fehler		

Zkoušel / Číslo certifikátu Operator / Certificate No. Prüfer/ Zertifikat Nr.	POHLODEK M 301- 04004	Inspekční organizace Inspection agency Übernahmegesellschaft
Vyhodnotil/Číslo certifikátu Evaluated/Certificate No. Auswertung/Zertifikat Nr.	OLŠANSKÝ V 3197- CERT- NDT 0341 - 15	
Datum / Podpis Date / Signature Datum / Unterschrift	26.4.2018	

KRÁLOVOPOLSKÁ, a.s.
NDE zkušebna

Penetrační prostředky



- ◆ ČSN EN 571-1:1997
- ◆ Certifikované dle ASME
- ◆ Bezpečnostní listy dle „Nařízení ES č. 1907/2006“ (REACH)

Penetrant	Poznámka	Čistič	Vývojka	Použití
Barevné kontrastní penetranty – pro denní světlo				
BDR červený	vodou smytelný	BRE, BRE-2, BRE-3, BRE-S, voda	BEA BEA-N BEA-W BEW	pro běžné použití v průmyslu – kovy, svary, odlitky, strojní součásti apod.
USR červený	vodou smytelný, bez minerálních olejů	voda		vhodné na plasty, keramiku, hliník pro běžné použití v průmyslu – kovy, svary, odlitky, strojní součásti apod., při vysokých teplotách (100+200°C)
CDR červený		CRE	CEA	
Fluorescenční pentranty – pro UV světlo				
UVF-4	emulgační, vodou smytelný	BRE, BRE-2, BRE-3, voda	UVP UVE UVE-W	pro běžné použití v průmyslu – kovy, svary, odlitky, strojní součásti apod.
UVF-5	postemulgační	UEM-H		vhodné do kapilárních linek
USF	vodou smytelný, bez minerálních olejů	voda		vhodné na plasty, keramiku, hliník
Fluorescenční barevné pentranty – pro denní i UV světlo				
BDR-L červený	vodou smytelný	BRE, BRE-2, BRE-3, BRE-S, voda	BEA BEA-N BEA-W BEW	pro běžné použití v průmyslu – kovy, svary, odlitky, strojní součásti apod.
BDR-GL červený	vodou smytelný, mění barvu dle teploty		BEA-N BEA-W BEW	

Čističe

BRE	základní
BRE-2	s pomalým odparem
BRE-3	se středně pomalým odparem
BRE-S	s rychlým odparem, bez zápachu
CRE	základní (100+200°C)

Vývojky

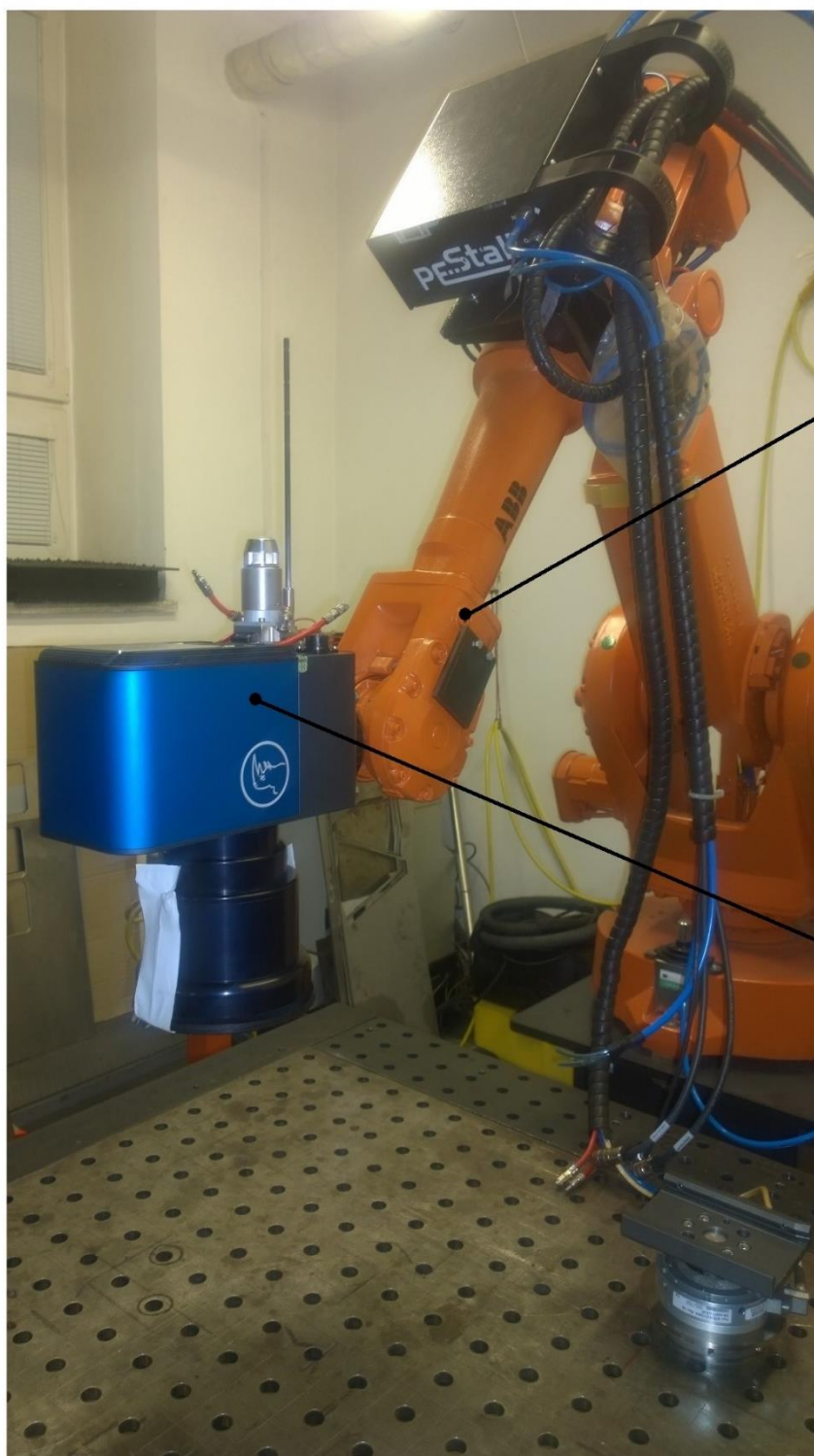
BEA	na bázi rozpouštědla
BEA-N	na bázi rozpouštědla
BEA-W	na vodní bázi
BEW	pro trvalý záznam
CEA	pro vysoké teploty (100+200°C)
UVE	na bázi rozpouštědla
UVE-W	na vodní bázi
UVP	suchá

Emulgátory

UEM-H	hydrofilní
-------	------------



Balení: sprej 500 (400) ml, kanystr 5 l



robotické rameno ABB

skenovacia hlava



FIBER RHINO

- 2D heavy duty scan head for fiber lasers
- suitable for vision and measurement systems, multi-kW applications and gas lasers
- fiber coupling: Optoskand QBH, Type D, clamp for collimated fiber output $\varnothing 30$ mm or $\varnothing 35$ mm, or others on request
- fiber collimator with 80, 100, 120, 150, 170 or 200 mm focal length
- aperture 16, 21, 31/28 or 31 mm
- for wavelength 1020–1080 nm

TYPICAL CONFIGURATIONS; more on request

laser power mode	(kW)	1 SM			3 SM			4–6 MM		
for wavelength	(nm)	1020–1080								
collimator	(mm)	120	120	200	80	80	100	100	100	120
aperture	(mm)	21	21	31	21	21	31	21	21	31
scan field size \square	(mm)	180	260	500	180	260	500	180	260	500
focal length	(mm)	254	420	800	254	420	800	254	420	800
approx. focus \varnothing	(μ m)	35	55	70	35	55	70	250	420	660
protective glass		yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes



SPECIFICATION; more on page 3 et seqq.

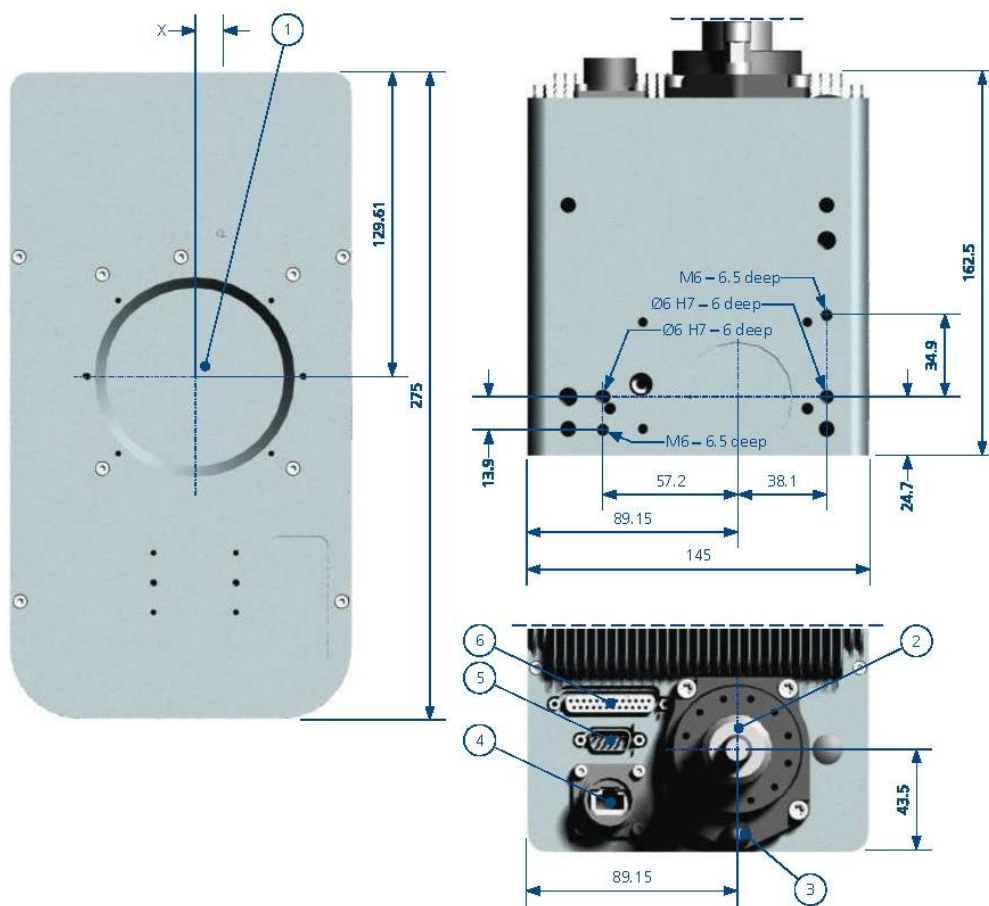
aperture	(mm)	16	21	31/28	31
beam entry/-exit displacement X	(mm)	18.4	24.2	35.8	35.8
weight without objective and options; approx.	(kg)	3.7	3.7	3.7	3.7

options

water cooling; thermal stabilization; vision module with camera; easily detachable robot flange (available for robots of all major manufacturers)

dimensions in mm; without objective and options

① laser beam exit; ② fiber coupling ③ strain relief; ④ DATA I/O; ⑤ DC INPUT; ⑥ XY4-100 / SLAVE LINK





YLS-2000/20000-QCW

Quasi-CW High Power Ytterbium Fiber Laser

 Applications

- ▶ 2D/ 3D Thin & Thick Cutting
- ▶ Processing Copper, Brass & Aluminum
- ▶ Welding
- ▶ Surface Treatment
- ▶ Drilling

 Features

- ▶ CW Output Power 2 kW @ Workpiece
- ▶ Peak Power: 20 kW
- ▶ Pulse Duration: 0.2-10 ms
- ▶ Modulation up to 2 kHz
- ▶ Maintenance-free Operation
- ▶ Cost-effective Cutting System
- ▶ Record Reliability
- ▶ Compact, Rugged Design



IPG Photonics has expanded its QCW fiber laser series with new higher power models, including the **new YLS-2000/20000-QCW laser**. With a peak power of 20 kW, pulse durations of 0.2-10 ms and a maximum pulse energy of 200 J, the newest offering is IPG's QCW product family is well suited to drilling and cutting applications within the aerospace industry, where percussion drilling, trepanning and fine cut features are often required.

Available in compact form factor, with very low price per watt, IPG's QCW fiber lasers are substantially more cost-effective than conventional YAG lasers due to >30% wall-plug efficiency and maintenance-free operation. The QCW lasers are available for requalifying existing lamp-pumped processes.



YLS-2000/20000-QCW

Quasi-CW High Power Ytterbium Fiber Laser

Optical Characteristics

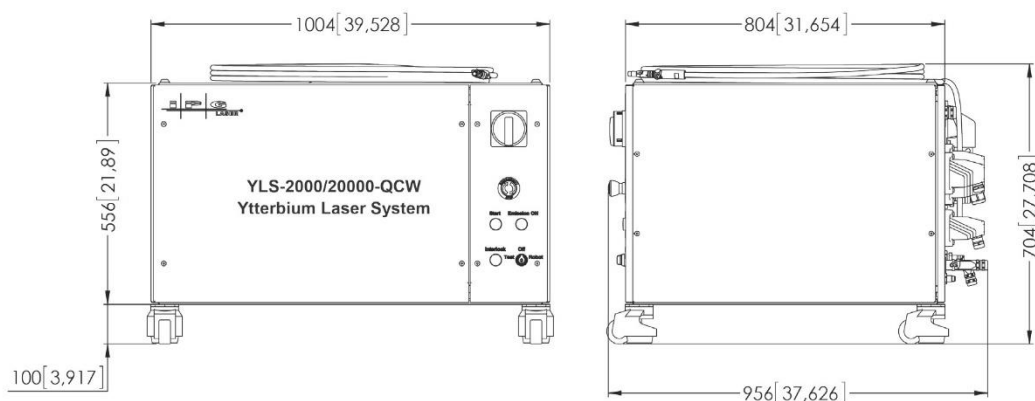
Wavelength, nm	1070 ± 5
Mode of Operation	Pulsed/ CW
Repetition Rate, kHz	2
Average Power, W	2000
Power Tunability, %	10-100
Peak Power, W	20000
Max. Pulse Energy, J	200
Pulse Duration, ms	0.2-10
Power Stability, %	± 2

Beam Parameter Product, mm x mrad

15 @ 300 μm feeding fiber
4.2 @ 100 μm feeding fiber

General Characteristics

Cabinet Dimensions, mm	1004 x 804 x 556
Weight, kg	380
Cooling	Water-cooled
Supply Voltage, VAC	400-480 3-phase, 50/60 Hz
Power Consumption, kW	<8

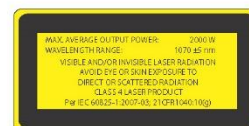


+1 (508) 373-1100; sales.us@ipgphotonics.com

+49 2736 44200; sales.europe@ipgphotonics.com (all European Inquiries)

www.ipgphotonics.com

Legal notices: All product information is believed to be accurate and is subject to change without notice. Information contained herein shall legally bind IPG only if it is specifically incorporated into the terms and conditions of a sales agreement. Some specific combinations of options may not be available. The user assumes all risks and liability whatsoever in connection with use of a product or its application. IPG, IPG Photonics, The Power to Transform and IPG Photonics' logo are trademarks of IPG Photonics Corporation. © 2015 IPG Photonics Corporation. All rights reserved.



The Power to Transform®
06/15



ROBOTICS

IRB 2400

Industrial Robot



IRB 2400 comprises a complete family of application optimized robots that maximize the efficiency of your arc welding, process and tending applications.

IRB 2400 is a dedicated high performance robot for process applications where the required accuracies are very demanding.

All models offer you inverted mounting capability. The compact design of the IRB 2400 ensures ease of installation.

The robust construction and use of minimum parts contribute to high reliability and long intervals between maintenance.

The Foundry Plus version is washable with high pressure steam and it's supplied with increased environment protection meeting IP 67 standard.

Global service and support

For worry-free operation, ABB also offers Remote-Service, which gives remote access to equipment for monitoring and support. Moreover, ABB customers can take advantage of the company's service organization; with more than 35 years of experience in the arc welding sector, ABB provides service support in over 100 locations in 53 countries.

Main applications

- Arc Welding
- Cutting/Deburring
- Grinding/Polishing

Specification

Robot version IRB	Reach (m)	Payloads (kg)
IRB 2400-10	1.55	12
IRB 2400-16	1.55	20
Number of axes	6	
Protection	FoundryPlus, IP54	
Mounting	Floor mounted and inverted mounted for all versions. Wall mounted for IRB 2400-10.	

Controller

Performance (according to ISO 9283)

	Position repeatability RP (mm)	Path repeatability RT (mm)
IRB 2400-10	0.05	0.35
IRB 2400-16	0.05	0.35

Technical information

Electrical Connections

Supply voltage	200–600 V, 50/60 Hz
Power consumption	ISO-Cube at max speed 0.67 kW

Physical

Dimensions robot base	723x600 mm
Total height	1564 mm
Robot weight	380 kg

Environment

Ambient temperature for mechanical unit	
During operation	+5°C (41°F) to +45°C (113°F)
Relative humidity	Max 95 %
Degree of protection	IP54
Foundry Plus	IP67
Noise level	Max. 70 dB (A)
Emission	EMC/EMI-shielded

Data and dimensions may be changed without notice.

ABB AB Robotics
Hydrovägen 10 SE-721 36
Västerås, Sweden
Phone: +46 21325000

ABB Engineering (Shanghai) Ltd.
No. 4528, Kangxin Highway,
Pudong New District,
Shanghai, 201319, China
Phone: +86 21 6105 6666

abb.com/robotics

We reserve the right to make technical changes or modify the contents of this document without prior notice. With regard to purchase orders, the agreed particulars shall prevail. ABB does not accept any responsibility whatsoever for potential errors or possible lack of information in this document.

We reserve all rights in this document and in the subject matter and illustrations contained therein. Any reproduction, disclosure to third parties or utilization of its contents – in whole or in parts – is forbidden without prior written consent of ABB.
Copyright © 2018 ABB
All rights reserved

IRB 2400-16

Axis movement	Working range	Axis max speed
Axis 1	360°*	150°/s
Axis 2	210°	150°/s
Axis 3	125°	150°/s
Axis 4	400°	360°/s
Axis 4, Option	Unlimited	
Axis 5	240°	360°/s
Axis 6	800°	450°/s
Axis 6, Option	Unlimited	

*) $\pm 30^\circ$ for wall mounted robot

**) For wall mounted version

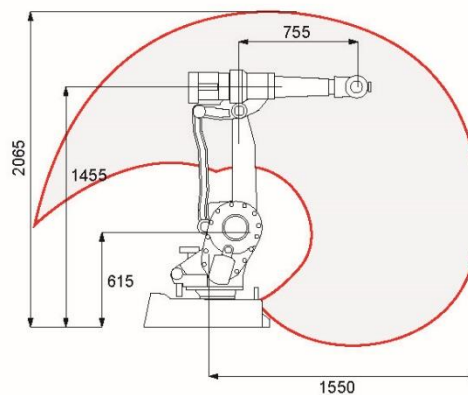
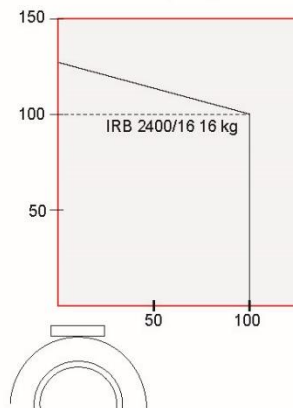
IRB 2400-16, working range

IRB 2400-16, working range


ABB AB Robotics
Hydrovägen 10 SE-721 36
Västerås, Sweden
Phone: +46 21 325000

ABB Engineering (Shanghai) Ltd.
No. 452B, Kangxin Highway,
Pudong New District,
Shanghai, 201319, China
Phone: +86 21 6105 6666

abb.com/robotics

We reserve the right to make technical changes or modify the contents of this document without prior notice. With regard to purchase orders, the agreed particulars shall prevail. ABB does not accept any responsibility whatsoever for potential errors or possible lack of information in this document.

We reserve all rights in this document and in the subject matter and illustrations contained therein. Any reproduction, disclosure to third parties or utilization of its contents – in whole or in parts – is forbidden without prior written consent of ABB.
Copyright © 2018 ABB
All rights reserved