



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

SVAŘOVÁNÍ HETEROGENNÍCH SPOJŮ LASEREM

WELDING OF HETEROGENEOUS JOINTS BY LASER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Eliška Charvátová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Studentka:	Ing. Eliška Charvátová
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie
Vedoucí práce:	Ing. Jaroslav Kubíček
Akademický rok:	2020/21

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

Svařování heterogenních spojů laserem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V oblasti jaderné a klasické energetiky je velké množství svarových spojů na potrubních systémech. Mezi velmi důležité a na proces svařování náročné spoje jsou heterogenní kombinace korozivzdorné austenitické oceli a uhlíkové oceli. Diplomová práce řeší netradiční využití laserového svařování pro realizaci těchto heterogenních spojů. Laserové spoje minimálně degradují základní materiály a je předpoklad provedení svarů s velmi dobrými mechanickými vlastnostmi.

Cíle diplomové práce:

Literární studie technologie laserového svařování včetně metod s oscilací svazku.

Návrh experimentu zaměřený na aplikaci laserového svařování pro heterogenní spoje typu austenitická korozivzdorná ocel – uhlíková ocel využívané v energetice.

Optimalizace procesních svařovacích parametrů s ohledem na dosažení požadovaných vlastností svarového spoje.

Diskuse výsledků.

Seznam doporučené literatury:

ASM handbook Welding, brazing, and soldering Volume 6. 10th editon. Materials Park, Ohio: ASM International, 2016. ISBN 978-0871703828.

DVOŘÁK, Milan. a kolektiv. Technologie II, 2. vyd. CERM Brno, 7/2004, 237s. ISBN 80-214-2683-7.

BENKO, Bernard. a kol. Laserové technológie, Technická universita, Bratislava 2000, ISBN 80-22-1425-9.

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

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

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

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

ONDREJČEK, Peter. Zváranie ocelí v ochrane plynov taviacou sa elektródou, 1vyd. ETERNA PRESS s.r.o. Bratislava 2003, ISBN 80-968359-5-5.

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

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

CHARVÁTOVÁ Eliška: Svařování heterogenních spojů laserem

Diplomová práce se zabývá svařováním dvou rozdílných materiálů laserem. Vzorby byly svařeny přímým vedením svazku i wobblingem, bez přídavného materiálu i s použitím vysokolegovaného drátu i s použitím difúzní bariéry ve formě niklu. Svařování probíhalo v různých ochranných atmosférách. Byly provedeny nedestruktivní (VT, PT, UT-PA, RT) a destruktivní kontroly (zkouška tahem za pokojové a zvýšené teploty, mikrotvrdost). Metalografie byla doplněna EDX analýzou vybraných prvků.

Klíčová slova: Heterogenní svarový spoj, laserové svařování bez a s přídavným materiálem, nedestruktivní a destruktivní zkoušení, skenovací elektronová mikroskopie

ABSTRACT

CHARVÁTOVÁ Eliška: Welding of heterogenous joints by laser

This diploma thesis deals with welding of two dissimilar materials by laser. The samples were welded by direct beam guidance and wobbling, with and without using high alloy filler material and with the use of a diffusion barrier in the form of nickel. Welding was done with different shielding atmospheres. Nondestructive (VT, PT, UT-PA, RT) and destructive tests were performed (tensile test at room and elevated temperatures, microhardness). Metalography was supplemented by EDX analysis of selected elements.

Keywords: Dissimilar weld joint, laser welding without and with filler material, nondestructive and destructive testing, scanning electron microscopy

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CHARVÁTOVÁ, Eliška. Svařování heterogenních spojů laserem [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/133310>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 21.5.2021

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji panu Jaroslavovi Kubíčkovvi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování diplomové práce.

Chtěla bych poděkovat především Standovi Galatíkovi a Tomášovi Kramárovi. Bez vás by nic z tohoto následujícího nebylo. A rozhodně ne v takovém rozsahu (necht' čtenář zhodnotí sám, zda se k poděkování připojí). Děkuji pánům z ÚPT AV ČR v Brně, panu Karlovi Bromovi z LaserTherm v Plzni a bratrům Miroslavovi a Martinovi Sahulovým (jeden svařoval, druhý pozeral) z MTF STU v Trnavě. Děkuji všem, kteří se jakkoli podíleli na této práci. Děkuji mým nejbližším, že se mnou překonali nádherně (hlavně pro mě) náročné (spíše pro ně) období. Mám zatracené štěstí, že mám kolem sebe lidi, jako jste vy.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

	Str.
ÚVOD	10
1 ROZBOR ZADÁNÍ [1],	11
2 Laserové svařování a materiálová problematika	12
2.1 Laser [6 až 10]	12
2.1.1 Základy laseru [10 až 15]	13
2.1.2 Typy laserů [9, 10, 16 až 22]	14
2.1.3 Laserové svařování [7, 10, 11, 13, 23 až 39]	16
2.1.4 Svařování s rozmitáním svazku [6, 9, 11, 40 až 44]	19
2.1.5 Svarové defekty [23, 32, 45 až 52]	20
2.2 Materiály a jejich svařitelnost [53 až 58]	22
2.2.1 Svařitelnost uhlíkových ocelí [53, 56, 59]	22
2.2.2 Svařitelnost austenitických ocelí [1, 53, 56, 58, 60, 61]	23
2.2.3 Svařitelnost heterogenních materiálů [40, 58, 62 až 66]	24
3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST [67, 68]	26
3.1 Svařované materiály [1, 9, 56, 69 až 91]	27
3.2 Příprava svarových hran a sestavení vzorků [92 až 94]	30
3.3 Svařování [95 až 97]	32
3.4 Nedestruktivní kontroly [1, 68, 75, 98 až 101]	34
4.4.1 VT (vizuální kontrola) [99, 102, 103]	35
4.4.2 PT (kapilární zkouška) [99, 104 až 106]	35
4.4.3 RT (prozařovací zkouška) [1, 68, 105, 107 až 109]	36
4.4.4 UT-PA (ultrazvuková zkouška – Phased Array) [1, 108, 110 až 112]	37
3.5 Destruktivní kontroly [93, 99]	38
4.5.1 Tahová zkouška (za pokojové teploty) [113 až 117]	39
4.5.2 Tahová zkouška (za zvýšené teploty) [73, 74, 117, 118]	41
4.5.3 Metalografie [58, 88, 93, 119 až 122]	43
4.5.4 Rastrovací (skenovací) elektronová mikroskopie (SEM) [113, 123, 124]	51
4.5.5 Mikrotvrdost [59, 86, 113, 125 až 127]	55
4 VYHODNOCENÍ [14, 63, 122, 126, 128]	57
5 ZÁVĚRY	60

Seznam použitých zdrojů
Seznam použitých symbolů a zkratk
Seznam obrázků
Seznam tabulek a grafů
Seznam příloh

ÚVOD [2 až 5]

Heterogenní svarové spoje jsou nedílnou součástí zařízení na jaderných elektrárnách. Takovéto spoje lze najít od impulsních tras měření, přes navazující potrubí nátrubků na kompenzátoru objemu, parogenerátoru a reaktoru. Svařují se trubičky 18×1,5 mm, ale i kolektor parogenerátoru s vnitřním průměrem 1100 mm.

Pro zajištění bezpečnosti se zařízení provozují a udržují v co nejlepším stavu. Zdokonalují se jak metody kontrol, tak i způsoby provádění prací. A svařování je „velmi“ zvláštní proces.

Ruční svařování je nahrazováno automatizovanými způsoby. Například při výrobě parogenerátorů používá ruská korporace pro atomovou energii Rosatom robotické svařovací centrum, které přivařuje nátrubek k nádobě. Tento robot zavařuje velmi složitě tvarovaný spoj obou dílů, zvyšuje kvalitu svaru, zkracuje dobu svařování a snižuje množství použitého materiálu. Dále se robot používá pro laserové navařování antikorozií vrstvy nebo vrstvy z tvrdé slitiny na potrubí a armatury. Lze navařovat tenčí vrstvu kovu a vyžaduje o polovinu menší přehřev materiálu než svařování plazmou.

Svařování laserem je charakterizováno vysokou svařovací rychlostí, štíhlými svary a malým vneseným teplem bez nutnosti použití přídavného materiálu. Laserem lze svařovat všechny typy svařitelných ocelí, včetně vysokolegovaných a vysokotavitelných kovů a jejich slitin (Cr, Ti, Ta, Mo) včetně kombinací kovů jako W – Mo, W – Ta, Ti – Mo, Ni – Pt, Au – Pt. Vyznačuje se vysokou hustotou výkonu a nízkým vneseným teplem, nabízí řešení problémů, se kterými se lze setkat u svařování heterogenních spojů za použití obvyklých metod.

1 ROZBOR ZADÁNÍ [1],

Na českých jaderných elektrárnách je předepsáno, že veškeré heterogenní spoje mají být provedeny mezikusem. Spoj je proveden v dílenských podmínkách, podroben veškerým předepsaným kontrolám. Na bloku již proběhne svaření homogenních částí a zapojení trasy (zařízení) do provozu. Pro výrobu mezikusu se v současné době používá mechanizované orbitální TIG svařování.

V bakalářské práci Automatizace procesu svařování HSS v prostředí JE byly nastíněny možnosti použití metod svařování heterogenních materiálů. Experiment porovnával ruční a automatizované svařování metodou TIG. Použití laseru, popř. paprsku elektronů, bylo zmíněno jako další vhodný způsob pro svařování materiálů rozdílných struktur. Premisu má potvrdit (vyvrátit) práce diplomová.

Práce má za úkol najít optimální parametry pro svařování potrubí pomocí laserového svazku. Svařovanými materiály jsou ocel austenitická chromniklová a uhlíková pro tlakové účely. Jde o dvojici materiálů odlišnou svým chemickým složením, mechanickými, fyzikálními vlastnostmi, rozdílnými teplotami tání, pevnosti, teplotní roztažnosti, vodivosti.

První část je zaměřena na svařování bez přídavného materiálu. Použito je přímé vedení svazku s různými výkony a rychlostmi svařování. Vyzkoušeno je i svařování s rozmitáním svazku.

Druhá část naznačuje možnosti použití austenitického přídavného materiálu s teplotní roztažností mezi základními materiály a vložení difuzní bariéry ve formě niklového kroužku a niklové fólie. Tyto vzorky jsou svařeny přímým vedením laserového svazku.

Další proměnou veličinou jsou ochranné, případně formovací plyny. Ochrana krycí vrstvy argonem, dále argon v kombinaci s foukáním helia do kořenové oblasti a použití dusíku.

Vyhodnocení parametrů proběhlo pomocí nedestruktivních – VT, PT, RT, UT-PA a destruktivních metod – tahové zkoušky za pokojové i zvýšené teploty, měření mikrotvrdosti. Celkový vzhled svarového spoje včetně mikrostruktury je hodnocen na metalografických vzorcích. Rastrovací elektronová mikroskopie poskytuje podklady pro mapu distribuce prvků od základního materiálu, přes TOO a svarový kov.

2 Laserové svařování a materiálová problematika

Následující kapitola shrnuje teoretické základy k laserové technologii a její aplikaci v oboru svařování. Druhá část se věnuje svařitelnosti materiálů.

2.1 Laser [6 až 10]

Light amplification by stimulated emission of radiation (laser) je prostorově a časově koherentní (fáze a amplituda jsou unikátní), konvergentní a monochromatický paprsek elektromagnetického záření s rozsahem vlnové délky od ultrafialového po infračervené. Může vytvořit velmi nízkou (řádově mW), ale i extrémně vysokou (1÷100 kW) kontinuální nebo pulzní hodnotu výkonu s přesným rozměrem (velikostí bodu) a dobou interakce (pulsu) na nejrůznější druhy materiálů různým prostředím. Laser se vyznačuje spektrální čistotou a schopností vytvořit přímý svazek. Výsledkem je, že získává uplatnění v široké škále odvětví – v metrologii (měření délky, rychlosti, drsnosti povrchu), komunikaci (např. optická vlákna), zdravotnictví (diagnostika, chirurgie), vojenství i strojírenství (tváření, obrábění, rapid prototyping, nanášení povlaků, svařování).

Volbu laseru pro konkrétní aplikaci ovlivňuje kvalita jeho svazku, tedy schopnost svazku být fokusován. Pro kruhově symetrické svazky ji definuje veličina Beam Parameter Product (BPP), kterou je možné vyjádřit:

$$BPP = w_0 \cdot \Theta \text{ [mm} \cdot \text{mrad]}, \quad (2.1)$$

kde: w_0 [mm] ... poloměr pasu svazku

Θ [mrad] ... polovina divergence svazku

Divergence svazku je úměrná jeho vlnové délce λ [mm]:

$$\Theta = M^2 \cdot \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0}, \quad (2.2)$$

kde: M^2 [-] ... faktor kvality svazku

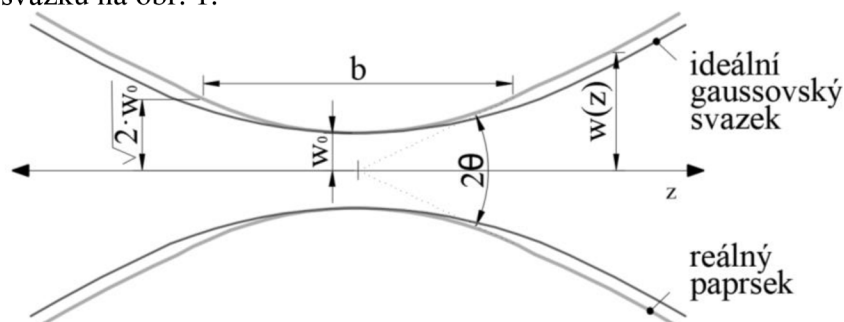
Pološířka (poloměr pasu) svazku je závislá na vzdálenosti 'z'. Minimální hodnotu nabývá v souřadnicích $z = 0$; v této rovině dosahuje nejlepšího zaostření. Svazek se v obou směrech postupně rozšiřuje a „rozostřuje“. V rovině $z = \pm z_R$, v tzv. Rayleighově vzdálenosti, dosahuje hodnoty:

$$\sqrt{2} \cdot w_0 \text{ [mm]}. \quad (2.3)$$

Dvojnásobek Rayleighovy vzdálenosti se nazývá konfokální parametr či ohnisková hloubka („depth of focus“). Značí se 'b' a lze ji vyjádřit:

$$b = 2 \cdot z_R = 2 \cdot \pi \cdot \frac{w_0^2}{\lambda} \text{ [mm]}. \quad (2.4)$$

Konfokální parametr je přímo úměrný ploše průřezu svazku v místě pasu a nepřímo úměrný vlnové délce. Je-li svazek fokusován do menší stopy, ohnisková hloubka je kratší a ohnisková rovina musí být nastavena s větší přesností. Pološířka stále postupně lineárně vzrůstá. Vytváří kužel s vrcholovým úhlem 2Θ . Kuželem se šíří přibližně 86 % celkového výkonu svazku. Schéma pasu svazku na obr. 1.



Obr. 1 Schéma pasu svazku [9, 10]

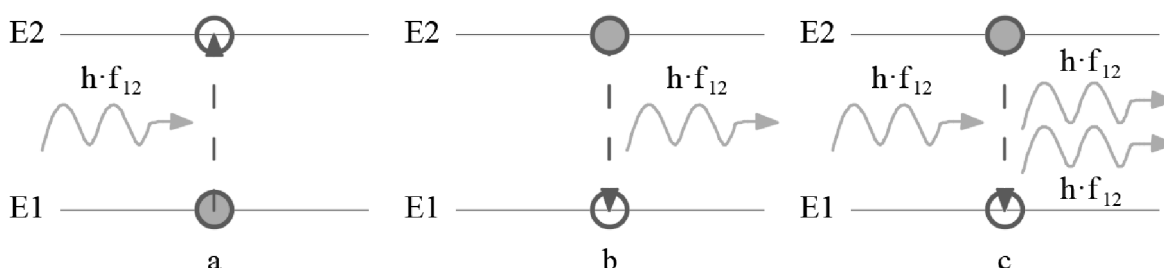
Čím větší je vlnová délka záření, tím obtížněji se fokusuje, dosahuje vyššího BPP a nižší kvality. Pokud je pas úzký, svazek hodně diverguje. Pro získání dobře kolimovaného svazku je žádoucí použít kratší vlnovou délku, širší pas svazku.

Poměr geometrických vlastností reálného a ideálního gaussovského svazku o stejné vlnové délce vyjadřuje M^2 „beam quality factor“; pro ideální podmínky je $M^2 = 1$. Faktor ale nelze považovat za kompletní charakteristiku kvality svazku.

2.1.1 Základy laseru [10 až 15]

Všechny lasery jsou optické zesilovače, které pracují čerpáním aktivního media umístěného mezi dvě zrcadla, z nichž jedno je částečně propustné. Aktivní prostředí je soubor speciálně vybraných atomů, molekul nebo iontů, které se mohou vyskytovat v plynné, kapalně nebo pevné formě.

Medium je schopné zesilovat jím procházející záření díky stimulované emisi – jev, který může nastat při interakci fotonu s atomem, molekulou nebo iontem. Jsou možné tři základní typy interakcí, viz obr. 2.



Obr. 2 Znárodnění absorpce (a), spontánní (b) a stimulované (c) emise [10, 11]

Podle Bohrovy teorie elektronového obalu při absorpci fotonu přejde elektron ze základní hladiny ‘E1‘ (tj. kvantový stav s minimální energií) na vyšší kvantovou dráhu ‘E2‘ na níž má energii větší o energii pohlceného fotonu – excitovaný stav. Naopak při samovolném přechodu zpět na základní dráhu vyzáří tuto energii ve formě fotonu tzv. spontánní emise záření.

Einstein popsal vybuzení atomů aktivního prostředí ozářením vlnou s příslušnou frekvencí kmitání. Kvant vnějšího elektromagnetického záření (foton) s energií rovnající se rozdílu energetických hladin dopadá na částici ve vybuzeném (excitovaném) stavu na hladině ‘E2‘. Částice se vrací na základní hladinu, přičemž emituje nový foton se stejnou energií, jakou má iniciační foton. Dopadající a emitované vlnění mají stejný směr, jsou ve fázi, skládají se a dochází tím k zesílení původního vlnění. Tento proces se nazývá stimulovaná (vynucená) emise záření a je využitelný pro zesílení záření jedné vlnové délky (u spontánní emise je vyzářená energie ve formě fotonů různých vlnových délek nevyužitelná; ztratí se ve formě uvolněného tepla).

Spontánní emise je charakterizována vyzářením fotonů s energií:

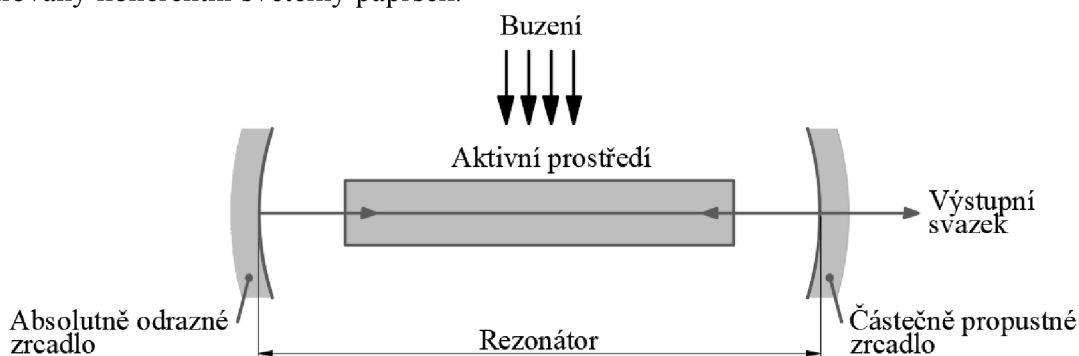
$$h \cdot f_{1,2} = E_2 - E_1, \tag{2.5}$$

kde: h [J·s] ... Planckova konstanta ($h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J·s)

$f_{1,2}$ [Hz] ... frekvence uvolněného vlnění přechodu z hladiny ‘E2‘ na ‘E1‘

Fotony, které necestují rovnoběžně s optickými osami laseru, jsou rychle ze systému ztraceny. Ty, které cestují paralelně, mají svou dráhu prodlouženou optickou zpětným odrazem za pomoci zrcadel, jejichž vzdálenost odpovídá násobku vlnové délky emitovaného záření. Zrcadlo se 100% odrazivostí vrací fotony do aktivního prostředí. Polopropustné s 80 až 90% odrazivostí propustí fotony až po dosažení kritického množství. Tento systém má charakter řetězové reakce; je zesilován průchodem optickým rezonátorem, viz obr. 3). Předpokladem stimulované emise je přítomnost populační inverze, tedy přebytku částic na vyšších

energetických hladinách vůči nižším. Jinak by došlo k opětovné absorpci. Také zajišťuje vysoce kolimovaný koherentní světelný paprsek.



Obr. 3 Schéma optického rezonátoru [10]

Tvar laserového paprsku – mód (TEM) – závisí na nastavení zrcadel. Základní tvar je dán geometrickou konstrukcí rezonátoru. Dokonalá symetrie módu je klíčová pro mnoho aplikací.

Vystupující svazek je veden do pracovní hlavy laseru, případně do optického vlákna. Materiál, ze kterého jsou optické komponenty vyrobeny, závisí na vlnové délce generovaného záření a nesmí toto záření pohlcovat. Nejvíce se používá dielektrické sklo nebo leštěné kovy.

Pro přesný pohyb svazku se využívá robotů a manipulátorů. K ovládání laserového systému se využívá řídicí počítač.

Vzhledem k velkým energetickým ztrátám při buzení aktivního prostředí, dalším ztrátám v rezonátoru i na optických prvcích, kterými svazek prochází, dochází k významnému ohřevu mnoha součástí během činnosti laseru. Každý výkonový laserový systém proto musí být vybaven chladícím zařízením.

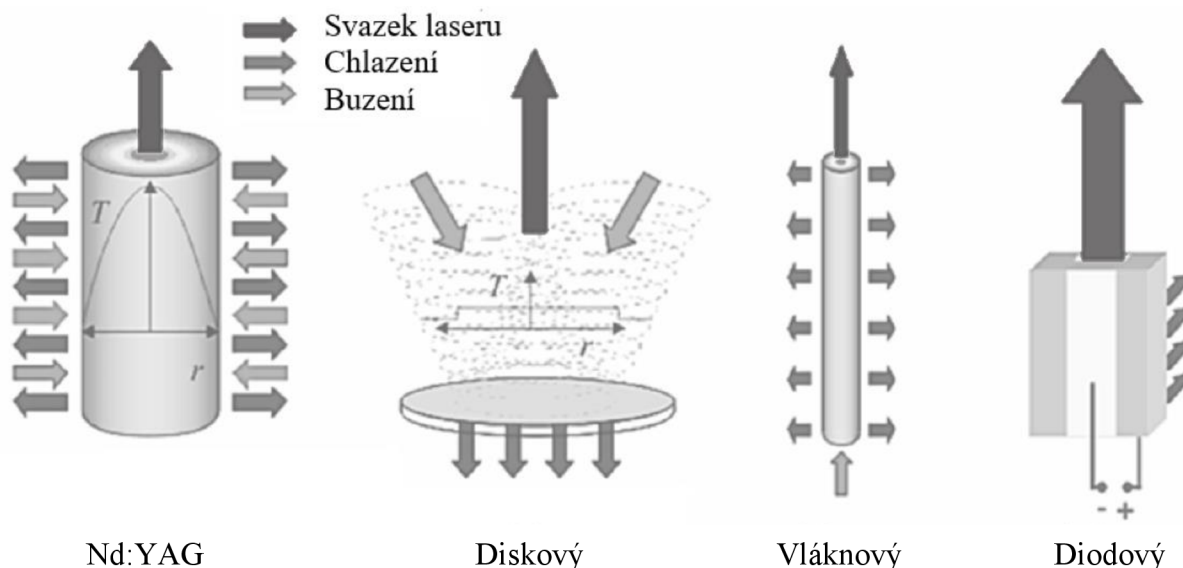
2.1.2 Typy laserů [9, 10, 16 až 22]

Lasery se dají dělit podle materiálu aktivního prostředí, nebo podle toho, zda pracují nepřetržitě, stálou emisí záření (kontinuálně), nebo v impulsním režimu, pulsní emisí záření. Podle aktivního prostředí je lze rozdělit na pevnolátkové (krystaly např. rubínu), kapalinové (barvivové) a plynové (např. CO₂ lasery). Podle typu čerpání, tedy druhu energie dodané do aktivního prostředí pro spuštění laserového paprsku, se používá elektrický výboj, ke kterému dochází v plynové náplni laseru, optické čerpání (forma světelného záblesku), chemickou excitací (např. exotermická reakce vodíku s fluorem).

Pro svařování kovových materiálů se doporučuje použití pevnolátkových laserů, popř. diodových, s vlnovou délkou v blízké infračervené oblasti (cca 0,80÷1,07 μm). Jedním ze základních argumentů je malá tepelně ovlivněná zóna a vysoká účinnost především u vláknových laserů. Vlnovou délku přibližně 1 μm mají lasery Nd:YAG, diskový a vláknový. Aktivní prostředí tvoří matrice umělého YAG krystalu (ytrium aluminium granát) dopovaného ionty neodymu (Nd) nebo yterbia (Yb). Hlavní rozdíl mezi těmito typy laserů je v geometrii aktivního prostředí. U diodového laseru je aktivním prostředím silně dopovaný polovodič. Srovnání nabízí obr. 4.

Nejstarší typ nasazený v průmyslu je Nd:YAG laser buzený buď výbojkami nebo laserovými diodami. Aktivním prostředím je tyčinka (délka 15÷20 cm, průměr řádově v milimetrech). Tyčinkový krystal i výbojka jsou umístěny ve skleněných trubcích v jejich ohniskových přímkách. Kolem trubice proudí chladicí deionizovaná voda, která předává teplo vodě nebo vzduchu ve vnějším chladícím okruhu. Celková účinnost Nd:YAG laserů čerpaných kryptonovou, případně xenonovou výbojkou dosahuje pouze 1 až 3 % z důvodu nízké účinnosti čerpání aktivního prostředí, která dosahuje méně než 10 %. Parametr M² se pohybuje od 1 do 132 při výkonech 1÷40 kW. Podstatně vyšší účinnosti čerpání 40 % až 50 %, a tím i celkové

účinnosti až 20 % se dosahuje nahrazením výbojky polem laserových diod. Má také lepší zaostření ($M^2 < 4$), průměrný výkon 100 W.



Obr. 4 Aktivní prostředí vybraných typů laserů [19]

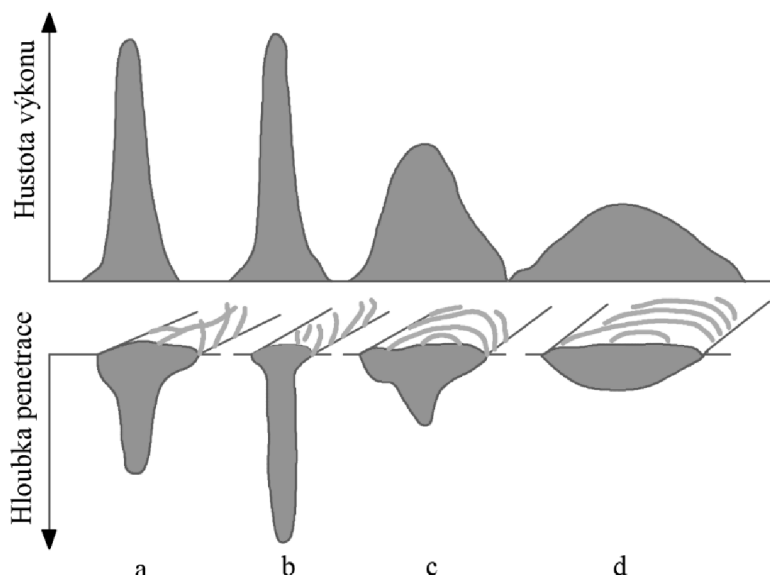
Diskové lasery mají aktivní prostředí formováno do tenkého disku (průměr 10 mm, tloušťka 0,25 mm). Budící záření je absorbováno celou tloušťkou aktivního prostředí a účinnost čerpání dosahuje 90 %. Celková účinnost diskových laserů je až 20 %. Zadní strana disku je napojena na celoplošný kontaktní chladič; i při vyšších výkonech je dostatečné chlazení vzduchem. Chlazení je intenzivní a rovnoměrné a vede k homogennímu rozdělení intenzity ve svazku. Svazek má vysokou kvalitu (BPP $4 \div 8 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ při výkonu $1 \div 16 \text{ kW}$; $M^2 = 12 \div 24$). Výhodou tohoto typu laseru je nezávislost kvality svazku na výkonu laseru.

Aktivním prostředím vláknových laserů je dlouhé křemíkové vlákno (délka v řádech m, průměr $50 \div 300 \mu\text{m}$). Vysoce účinné čerpání je realizováno zářením laserových diod kolmo na průřez aktivního vlákna, které se dále šíří odrazy na vnitřní straně pláště. Rezonátor laseru tvoří Braggovy mřížky na koncích vlákna nebo vnější dichroická zrcadla. Díky geometrii aktivního prostředí je dostatečné chlazení vzduchem. Kvalita svazku dosahuje i $\text{BPP} = 0,34 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, $M^2 = 1 \div 24$ při výkonu $1 \div 20 \text{ kW}$. Hlavní předností vláknových laserů je jejich vysoká účinnost až 30 % díky účinnosti čerpání vyšší než 80 %. Prostorovým složením dílčích výstupních svazků do apertury společné výstupní čočky se dosáhne vyššího výkonu, ale současně se zvyšuje rozbíhavost svazku, a tím snižuje jeho kvalita.

Diodový laser vzniká sdružováním laserových diod do řad, bloků nebo baterií v závislosti na požadovaném výkonu. Aktivním prostředím je polovodič buzený elektrickým proudem. Z jeho PN přechodu o ploše 10^{-6} mm^2 je emitováno záření, které se šíří v rovině přechodu a opakovanými odrazy se zesiluje. Svazek vystupující z rezonátoru má velkou divergenci, navíc rozdílnou ve směru osy x a osy y . K jeho kolimaci se používají válcové mikročočky umístěné na stěně bloku. Přesto je kvalita svazku ve srovnání s jinými typy laserů výrazně nižší (M^2 od 75, $\text{BPP} > 20 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$). Účinnost je vysoká, dosahuje až 50 %. Výhodou je možnost navázat svazek opouštějící rezonátor do optického vlákna. Může dosahovat výkonů od několika wattů až nad 10 kW.

2.1.3 Laserové svařování [7, 10, 11, 13, 23 až 39]

Laserové svařování je způsob spojování materiálů laserovým paprskem o vysokém výkonu a hustotě energie. Distribuce hustoty výkonu a následná geometrie svarové housenky jsou schematicky zobrazeny a obr. 5. Srovnány jsou profily laserovým (a) a elektronovým (b) svazkem, svařování plasmatem (c) a obloukového svařování (d). Obloukové svařování se používá nejčastěji díky levným zdrojům a snadné výrobě spojů; hloubka svaru není tak velká. Plasma způsobí hlubší penetraci díky vyšší hustotě energie. Nejhlubší svar může produkovat elektronový paprsek. Je však vyžadováno vakuum, ochrana před rentgenovými paprsky a někdy i demagnetizace pro ocelové desky.



Obr. 5 Závislost hustoty výkonu a geometrie housenky na použité technologii svařování [22]

Při působení laserového svazku dochází k rychlému lokálnímu ohřevu, při kterém se nestihnou plně uplatnit mechanismy vedení a salání tepla. Ohřev, natavení, spojení i následné ochlazení součástí při svařování laserem probíhají velmi rychle. Získá se úzká tepelně ovlivněná oblast v okolí svaru, a tím i mnohem menší deformace svarů. Z důvodu rychlého ochlazování nesmí překročit množství uhlíku hodnotu 0,2 %. V závislosti na výkonu laseru a průměru fokusovaného svazku, případně poloze ohniska vůči materiálu, získáváme konkrétní velikost hustoty výkonu svazku, podle níž dělíme techniky svařování laserem na kondukční (a), penetrační (b) a keyhole (c) svařování vzhledem k dosahovanému poměru hloubky k šířce svaru, viz obr. 6.

Kondukční svařování je způsobeno rozostřením paprsku a nízkou nebo nedostatečnou hustotou výkonu. Při dané rychlosti svařování nedojde k varu.

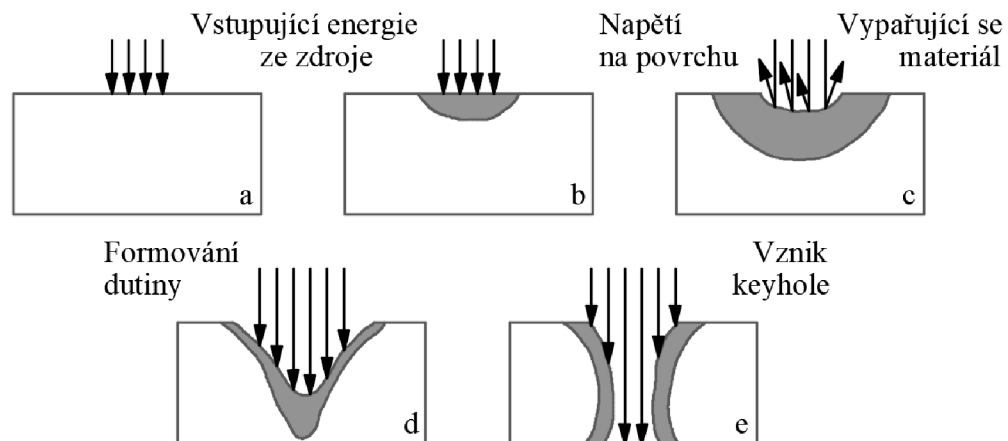


Obr. 6 Režimy laserového svařování [10]

Laser se chová jako bodový zdroj energie pohybující se po povrchu materiálu. Teplo je odváděno radiálním směrem. Svary jsou v řezu přibližně půlkruhového tvaru.

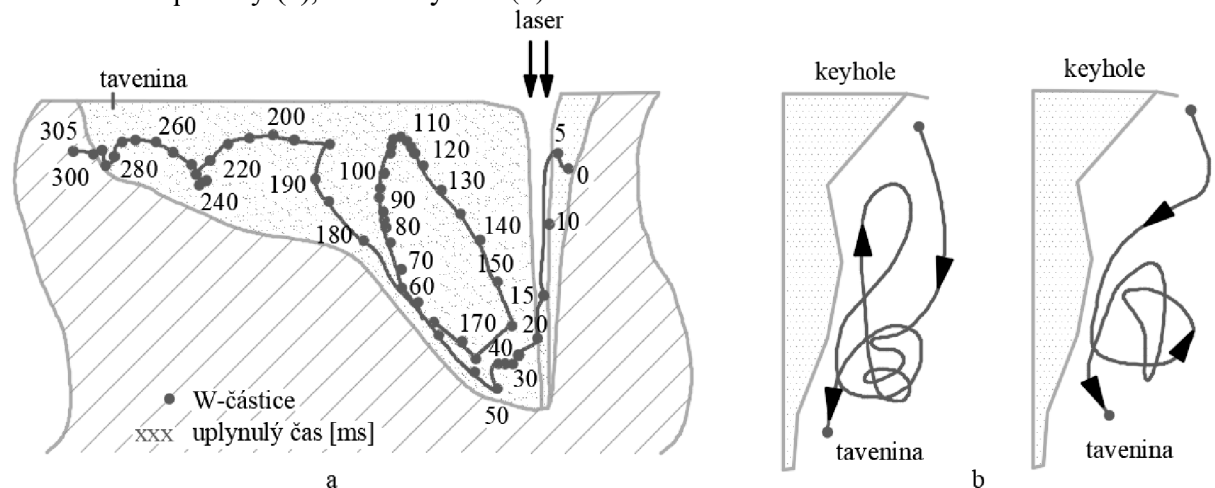
Při hlubší penetraci nebo keyhole je energie dostatečná, aby způsobila vypařování kovu; v tavenině se vytvoří tzv. klíčová dírka (hustota výkonu pro vznik keyhole $\geq 10^6 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$). Mechanismus vzniku keyhole je naznačen na obr. 7.

Energie dopadá na povrch (a) a povrch se zahřívá, dochází k tavení (b). Uprostřed taveniny vznikne důlek (c) jako důsledek vypařování roztaveného kovu a termokapilárního nebo Maragoniho míchání. Míchání je poháněno povrchovým napětím jako výsledek značného teplotního gradientu; ve středu taveniny dochází k varu, k tavení dochází pouze na okrajích, které mají tloušťku přibližně milimetr. Zvyšuje se vypařování, podtlak kapaliny a roztavený objem (d). Důlek se prohlubuje až vznikne keyhole (e). Přehřáté, částečně ionizované výpary, kterými je vyplněna a překryta keyhole, se nazývají plasma a mají velký vliv na přenos energie do materiálu. Plasma částečně pohlcuje laserový paprsek. Většina energie laseru je absorbována přímo stěnami keyhole, od které se odráží.



Obr. 7 Kroky vedoucí k formování keyhole [26]

Tok v tavenině má vířivou strukturu; víry rotují se značnou energií. Dynamiku procesu naznačuje následující obrázek 8. Pohyb tekutiny v kontinuálním režimu pozorovaný zavedením wolframové peletky (a), tok v keyhole (b).



Obr. 8 Dynamika v keyhole [28]

Tepelný příkon označuje množství vneseného tepla na jednotku jeho délky svaru. ČSN EN 1011-1 není určena pro spoje svařované laserem. Ale princip výpočtu zůstává shodný.

$$Q = \eta \cdot \frac{P}{v \cdot 10^3}, \quad (2.6)$$

kde: Q [$\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$] ... tepelný příkon

η [-] ... tepelná účinnost metody svařování (účinnost absorpce)

P [W] ... výkon laserového svazku

v [$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$] ... rychlost svařování

Účinnost svařování η lze definovat jako koeficient přenosu energie, tedy poměr mezi výkonem absorbovaným svařovaným materiálem a generovaným laserem.

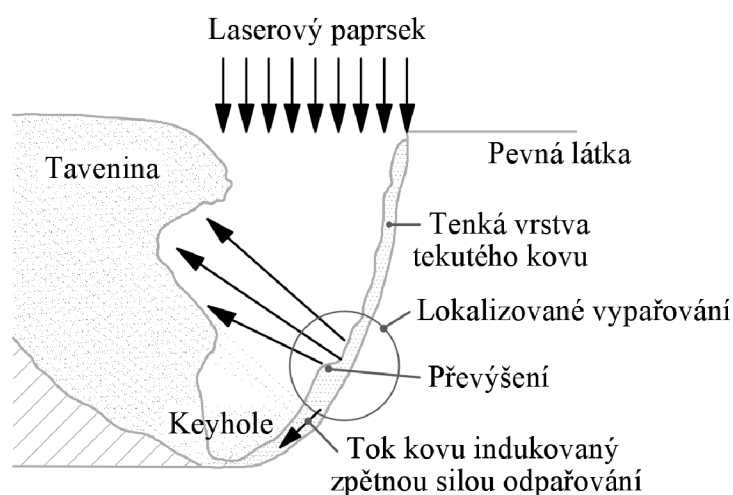
Účinnost bývá malá, ale může dosáhnout jedničky, pokud je vytvořen keyhole. Absorpce YAG laseru se zvyšuje z 30 na 70 % v závislosti na režimu penetrace a fokusaci. U vláknového laseru jsou hodnoty absorpce vyšší – 65 až 85 %. Rozdíl je přičítám menšímu průměru paprsku vláknového laseru vstupujícího do keyhole.

Absorpce laserového svazku je umožněna interakcí s volnými elektrony v kovu, jejich přenosem uvnitř pásma a interakcí pohybujících se elektronů v závislosti na krystalové mřížce,

deformacích a potenciálních porušení. Nedochází k přeměně kinetické energie na teplotu, ale foton přímo zvyšuje frekvenci vibrační mřížky s tím zvyšuje teplotu materiálu. Absorpce se mírně zvyšuje s nárůstem teploty v látce za pevného stavu a značně nad teplotou tavení látky. Teplota se zvyšuje až na teplotu varu. Dutina nebo klíčová dírka je vytvořena tlakem zpětného rázu v důsledku prudkého odpařování. Zejména z klíčové dírky vychází jasný oblak kovových výparů; silný proud vystupujícího oblaku může způsobit rozstříkování kapiček taveniny.

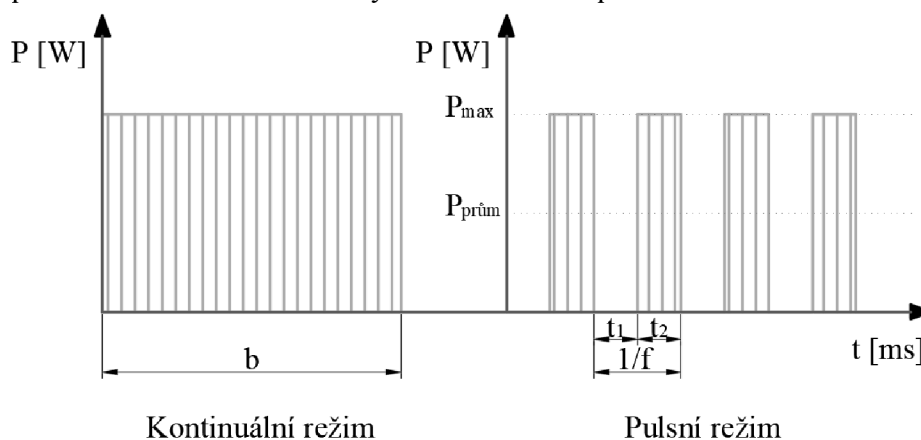
Absorpci lze dále zvýšit např. aplikací absorpčního nátěru, zdrsněním povrchu, oxidací nebo nitridací.

Boční pohled na tvar keyhole a absorpci svazku nabízí obr. 9.



Obr. 9 Tvar keyhole v příčném směru [28]

Jednou z nejranějších a nejrozšířenějších praktických aplikací laseru bylo svařování s použitím kontinuálního paprsku (CW). Další možností je pulsní mód (PW). Schéma na obr. 10. Během CW módu lze dosáhnout vysoké rychlosti svařování, pokud je možné provozovat laser s dostatečným výkonem. Výkon laseru je konstantní po celou dobu trvání svařování. PW je charakterizováno přerušovaným výkonem paprsku (časy t_1 a t_2), které způsobuje tavení a tunutí v probíhajícím procesu svařování (v závislosti na procesních parametrech po každém pulsu svarová lázeň ztuhne). Výhodou je přesná regulace rychlosti ohřevu a ochlazování. Používá se především u materiálů citlivých na vnesené teplo.



Obr. 10 Schéma přenosu výkonu paprsku laseru [24]

Ochrannou atmosféru svarové lázně tvoří nejčastěji helium, argon a dusík. Jejich úlohou je zabránit absorpci kyslíku, dusíku a vzdušné vlhkosti. Povrch oxiduje, vznikají póry a vodíkové

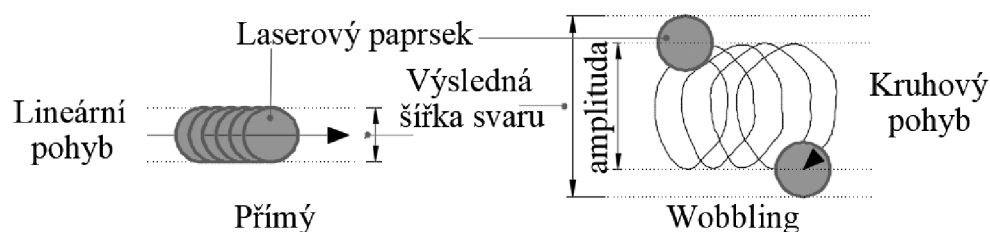
trhliny. U nelegovaných a nízkolegovaných ocelí přítomnost dusíku způsobuje stárnutí a křehnutí. Zajišťují také ofoukání plazmy. Plazma brání pronikání fotonů, absorbuje energii laseru a mohla by způsobit snížení výkonu procesu svařování. Vhodný plyn se volí v závislosti na spojovaných materiálech. Vliv indukované plazmy se dá ovlivnit parametry svařování – materiál se nesmí odpařit, dokud se neprohřeje pod povrchem do oblasti tavení. U laserů s vyššími výkony se používá plyn pro proplach optické cesty. Typickým plynem je dusík.

Argon i dusík mají nízký ionizační potenciál (15,76, resp. 15,5 eV); při určité hustotě vnášené energie může dojít ke vzniku dalšího plazmatu – ochranného plynu. Velké množství plazmatu snižuje účinnost svařování. Helium má vysoký ionizační potenciál (24,5 eV), který snižuje ionizaci a tvorbu plazmatu. Používá se pro nejhlubší průvary. Tepelná vodivost plynů se mění s teplotou a má výrazný vliv na přenos tepla do svaru. Zvětšuje se TOO, ale může se využít vyšších rychlostí svařování. Z uvedených tří plynů má nejvyšší tepelnou vodivost helium, následuje dusík a nakonec argon.

2.1.4 Svařování s rozmítáním svazku [6, 9, 11, 40 až 44]

Přímé vedení svazku klade velký důraz na přípravu svarových hran. Protože velikost laserového paprsku je velmi malá, je nutné pro zajištění správného natavení obou svarových ploch minimalizovat mezeru mezi svařovanými dílci. Mezera mezi spojovanými díly by neměla přesáhnout polovinu průměru svazku; optimálně se pohybuje mezi 0,05 až 0,20 mm. Rozostření (rozšíření) svazku pro eliminaci nepřesného sestavení dílů lze použít jen ve zvláštních případech. Dojde totiž ke snížení hustoty výkonu a z penetračního režimu se stává kondukční. Schopnost přemostění širokých nebo nepravidelných svarových mezer zvyšuje použití přídavného materiálu; snižují se tak nároky na přípravu ploch. S větší svarovou mezerou si dokáže poradit i svařování s použitím rozmítání svazku.

Laserové svařování spojené s efektem „wobblingu“ je metoda založená na rychlé oscilaci laserového paprsku. Schéma pohledu shora a výsledná šířka svaru provedeného paprskem lineárním a v kruhovém „wobble“ módu na obr. 11.



Obr. 11 Schéma vedení svazku [41]

Oscilace, označována jako sekundární pohyb, může nastat lineárním nebo křivočarým (kruhovým či eliptickým) pohybem. Sekundární pohyb se překrývá s hlavním pohybem laserového paprsku ve směru svařování. Nástup teploty a rychlosti ochlazování je pomalejší než u tradičního laserového svařování. Tato technika pomáhá překonat problémy s porozitou, horkými trhlinami, rozstříkem a špatně sestavenými díly. Má také pozitivní vliv na mikrotvrдость svaru.

Vysoké hodnoty frekvence oscilace (až stovky Hz) vedou k superpozici laserového paprsku během jeho oscilace. To má za následek opětovné roztavení části materiálu a vytvoření spojitě housenky. Při vyšších rychlostech svařování se zvětšuje vzdálenost mezi částí roztavenou průchodem laserového paprsku a opětovným natavením; housenka může být nespojitá.

Geometrie svaru se mění v závislosti na použitém výkonu laseru. Rozmítání vnáší do materiálu další teplo. Energie je absorbována efektivněji jako výsledek mnohonásobné odrazivosti paprsku uvnitř parní kapiláry v hloubce rozhraní pára – kapalina. To vede k hlubšímu svaru a většímu objemu natavení. Dalším efektem je větší šířka svaru a tepelně

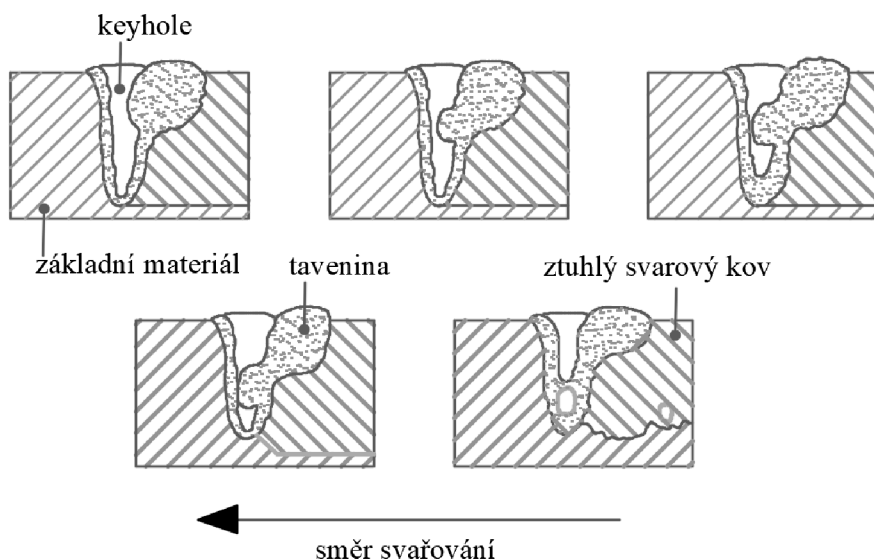
ovlivněná zóna. Je zajímavé, že výkon laseru má výrazně menší dopad ve srovnání s frekvencí oscilace v předepsaných rozmezích procesních parametrů. Se vzrůstající frekvencí se snižuje průvar, šířka svaru, TOO.

„Wobblovací hlavou“ lze řídit tavení a tuhnutí intermetalické vrstvy a výrazně tak zlepšit kvalitu svaru mezi dvěma odlišnými kovy. Mikrostruktura dosažitelná v heterogenním spoji může vykazovat vyšší jednotnost chemického složení.

2.1.5 Svarové defekty [23, 32, 45 až 52]

Svařování s hlubokým průvarem může způsobit problémy spojené s kvalitou spoje – nedokonalosti jako nevyplnění, porozitu, trhliny, přetečení.

Pórovitost se jednodušeji formuje ve svarových housenkách s vysokou penetrací a při nízkých rychlostech svařování. Keyhole je vytvořena obrovským množstvím energie působící na malé ploše, která vede k vytvoření tavné lázně s úzkým a hlubokým tvarem. Výsledný tvar taveniny způsobí, že bubliny se obtížně dostávají ven během krátké doby ochlazování, než materiál ztuhne. Tavenina není schopna vyplnit kráter. Tato vada souvisí s tokem tekutiny uvnitř taveniny, který je řízen teplotním gradientem, povrchovým napětím kapalina – tuhá látka a kapalina – pára, a tlaky zpětného rázu na tyto povrchy. Mechanismus vzniku pórů schematicky znázorněn na obr. 12.



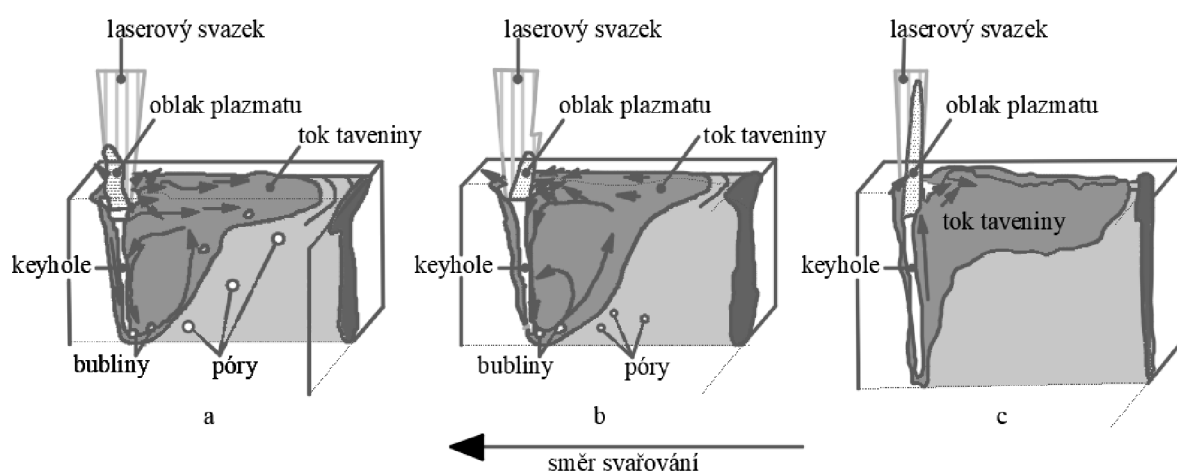
Obr. 12 Tvorba pórů v keyhole [46]

Schéma na obr. 13 zobrazuje v závislosti na chování oblaku par, keyhole, toku taveniny efekt rychlosti svařování na tvorbu pórovitosti v roztaveném kovu. (a) zobrazuje vliv nízké svařovací rychlosti; stejný efekt může mít střední rychlost při použití Ar jako ochranného i formovacího plynu. Se vzrůstající rychlostí svařování se intenzivní vypařování přesune z přední části keyhole (kde vrstva likvidu je tenká) deformovat její zadní stěnu keyhole (kde je likvid objemnější) a vytváří bubliny. (b) naznačuje proudění během střední rychlosti svařování (Ar chrání pouze krycí vrstvu). Pokud má materiál vysoké povrchové napětí a vytváří stabilní keyhole, páry jsou silně vystřelovány vzhůru. Formují se menší bubliny. Póry jsou vytvářeny blízko spodní části housenky. Je-li rychlost svařování dostatečně vysoká, oblak roztaveného kovu směřuje vzhůru a keyhole se stává tak stabilní, že potlačuje tvorbu bublin, dochází ke snížené pórovitosti (c).

Obecně se má za to, že póry mají stejné složení jako keyhole. Rozbory bylo prokázáno, že obsahují velké množství ochranného plynu, malé množství vodíku a někdy i dusíku.

Bubliny, které způsobují pórovitost, se obvykle vytváří na hrotu keyhole. Snížení pórovitosti lze dosáhnout:

- plným průvarem,
- pulsní modulací,
- vpřed nakloněným laserovým paprskem,
- svařováním ve vakuu,
- dvoubodovým laserovým svařováním,
- použitím rozmitací trysky,
- hybridním svařováním (lasTIG, lasMIG) s obloukem s vysokým proudem,
- vysokorychlostním svařováním.



Obrázek 13 Vliv rychlosti svařování na pórovitost svaru [23, 32]

Trhliny jsou připisovány zbytkovému napětí nebo nedostatečnému natavení. Trhliny tohoto typu jsou závislé na materiálu a pro určité případy laserového zpracování se jim nelze vyhnout. I když jsou trhliny způsobeny zbytkovým napětím, mohou existovat v různých formách. Například ke vzniku krystalizačních trhlin dochází působením velkého zbytkového napětí v důsledku teplotních gradientů mezi ztuhlou a natavenou fází. Nachází se ve svarovém kovu. Likvační trhliny se nachází v oblasti částečného natavení, nemají dendritickou morfologii. Jsou velmi závislé na rozsahu natavení, struktuře zrna, tažnosti a kontrakci materiálu. Náchylnost k trhlinám je nevyšší u bodového svařování v pulsním módu a nejnižší v kontinuálním při svařování tenkých plechů. Aby se snížilo riziko praskání, je nutné vzít v úvahu opatření:

- správný výběr základního materiálu, jeho tloušťka,
- kontrola složení tavné lázně pomocí plnicího drátu,
- potlačení rychlého tuhnutí a rychlého namáhání v tahu během tuhnutí.

Rozstřík jsou kapičky roztaveného kovu vystřeleného ze svarové lázně. Může ovlivnit odolnost svaru vůči korozi. Jeho množství souvisí s bodem varu svařovaných materiálů, tlakem par a procesními parametry. Vliv má i velikost tavné lázně; čím je větší, tím se vytvoří menší rozstřík. Potlačit tvorbu rozstříku lze snížením tepelného příkonu (snížením výkonu laseru, zvýšením rychlosti svařování, rozostřením laserového svazku, zvýšením pulsní frekvence), výběrem správného ochranného plynu a doplněním přídavného materiálu.

Proláklina, neúplné vyplnění svaru vzniká propadem taveniny tavnou lázní během svařování. Krycí vrstva svaru je nevyplněná (vytváří konkávní tvar), kořen může mít konvexní tvar. K defektu dochází častěji při působení vysokého tepelného příkonu a u materiálů s nižším povrchovým napětím. V případě silných desek nebo korozivzdorných ocelí s vyšším

povrchových napětím a za nižších teplot, dochází ke zdatnému „humpingu“ na spodním povrchu svaru, i když výkon laseru není tak velký, aby vytvořil plně protavený svar. Podmínkou je nízký obsah kyslíku. Tavenina za nižších teplot v blízkosti spodní části tavné lázně s nízkým obsahem kyslíku má tak vysoké povrchové napětí, že vtahuje tekutinu o vyšší teplotě do oblasti špičky keyhole a vytvoří se tak nadměrný průvar. Ve svarovém kovu s dostatečně vysokým obsahem kyslíku k protečení nedochází. Předjít přetečení svaru lze u tlustých ocelových plátů použitím horkého drátu a vhodného obsahu kyslíku v tavné lázni. Preventivním opatřením může být podložení nebo zavedení ochranného plynu do oblasti kořene. Nadměrný průvar může být spojený s neúplným vyplněním koruny svaru a také s pórovitostí.

Neprůvary, studené spoje způsobují trhliny, které ovlivňují zejména únavovou životnost součástí. Neprůvar je znakem nízké vstupní energie nebo vysoké rychlosti svařování.

2.2 Materiály a jejich svařitelnost [53 až 58]

Ocel má zaručenou svařitelnost tehdy, pokud lze bez omezujících podmínek vytvořit svarový spoj požadovaných vlastností. Omezujícími podmínkami jsou obtížnost získání celistvého svarového spoje, nutnost použití předehřevu, omezení měrného příkonu svařování.

Při výběru ocelí se vychází především ze způsobu namáhání konstrukcí, ať už staticky, dynamicky, nebo termodynamicky. Vhodnost materiálu ke svařování je charakterizována změnou jeho vlastností v TOO v důsledku působení teplotního cyklu svařování. Je ovlivněna způsobem výroby oceli, chemickým složením, způsobem odlévání, tváření, tepelným zpracováním. Na vlastnost svarového spoje má vliv technologie, parametry svařování i vhodně zvolený přídavný materiál.

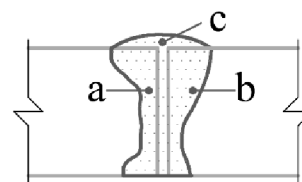
Vliv zejména na plastické vlastnosti a houževnatost má čistota ocelí. Na změně vlastností se podílí především síra, fosfor, oxidy, karbidy, nitridy a prvky, které jsou intersticiálně nebo substitučně rozpuštěné v základním tuhém roztoku, ale za jistých podmínek mohou segregovat na hranice zrn (B, Sn, Pb apod.). Tyto prvky zvyšují popouštěcí křehkost a náchylnost na žihací praskání. Sulfidy s nízkou teplotou tavení mohou být metalurgickou příčinou tzv. likvačního praskání, oxidy s nižší tepelnou stabilitou navíc i zdrojem pórovitosti. Vysoké množství nečistot zvyšuje náchylnost na lamelární praskání; sulfidy mají vliv i na korozní praskání pod napětím. S ohledem na zvýšení odolnosti vůči trhlínám se doporučuje celkový obsah síry a fosforu snížit pod 0,02 hm. %. Extrémně čisté oceli jsou však velmi náchylné na hrubnutí zrna, ztíží se tvorba feritu a dominují bezdifúzní transformace.

Při výběru ocelí je nutné přihlídnout i na možnou degradaci vlastností svarového spoje dlouhodobým provozem.

Během svařování dochází k ředění svarového kovu základním materiálem. Je závislé na metodě svařování. Vztah pro tupé svary (naznačení ploch na obr. 14):

$$V = \frac{a + b}{a + b + c} \cdot 100 [\%], \quad (2.7)$$

kde: a, b [mm²] ... natavený základní materiál
c [mm²] ... množství přídavného materiálu



Obr. 14 Zředění SK, upraveno dle [58]

2.2.1 Svařitelnost uhlíkových ocelí [53, 56, 59]

Uhlíková ocel má nízkou odolnost v korozním a oxidačním prostředí, vyznačuje se výrazným snížením pevnosti při vyšších teplotách, má nízkou prokalitelnost, výrazný pokles tvrdosti při žihání. Hlavním prvkem chemického složení ovlivňující svařitelnost je uhlík. Uhlík

v TOO způsobuje zvýšení tvrdosti, snižuje plasticitu; vznikají vnitřní pnutí, která mohou vést až ke vzniku trhlin. Maximální tvrdost svarového spoje v TOO se připouští 380 HV dle ČSN EN ISO 15614-1 (neplatí pro laserové svařování a heterogenní spoje).

Oceli s obsahem uhlíku $C < 0,20 \%$ a uhlíkovým ekvivalentem $CE \leq 0,45 \%$ s tloušťkou pod 25 mm nevyžadují při svařování zajistit zvláštní podmínky. Čím je hodnota uhlíkového ekvivalentu CE vyšší, tím je svařitelnost oceli obtížnější. CE charakterizuje náchylnost oceli na vznik tvrdých rozpadových struktur (martenzitické, martenzitické v kombinaci s dolním bainitem) TOO ve vztahu s jejich prokalitelností, tedy náchylnost na praskání za studena – zkřehující účinek vodíku. Vzorec stanovený Mezinárodním svářečským institutem (IIW):

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{15} \quad (2.8)$$

2.2.2 Svařitelnost austenitických ocelí [1, 53, 56, 58, 60, 61]

Aby mohla být ocel považována za korozivzdornou, musí obsahovat více než 12 hm. % chromu v závislosti na obsahu uhlíku. Takováto ocel je schopná pasivace a odolává elektrochemické korozi v oxidačním prostředí. Austenitické oceli obsahují obvykle dohromady více než 24 hm. % chromu, niklu a manganu, přičemž obsah chromu je větší než 16 hm. %.

Austenitické Cr-Ni (Cr-Ni-Mo) oceli mají sklon v důsledku transformace delta feritu na fázi σ ke zkřehnutí a k trhlinám v oblasti svarových spojů, kdy v TOO dochází k precipitaci karbidů chromu $(Cr, Fe)_{23}C_6$ a (Cr, Fe) , zóna je ochuzená o chrom a náchylná na mezikrystalovou korozi. Aby ke vzniku denudovaných zón nedocházelo, oceli se stabilizují přísadami s vyšší afinitou k uhlíku, než má chrom. Karbidy, karbidonitridy, nitridy potom vytváří přednostně titan, niob, tantal, zirkon, vanad. Jejich potřebné množství se pohybuje v 6÷8 násobku obsahu uhlíku. K mezikrystalové korozi u korozivzdorných ocelí může dojít v pásmu zcitlivění ležící v rozmezí teplot 425 až 815 °C. Při obsahu uhlíku pod 0,02 hm %, resp. pod 0,05 hm % u svařů s velmi rychlými cykly, nemůže MKK nastat.

Mikrostruktura Cr-Ni ocelí závisí na chemickém složení a rychlosti krystalizace. Je výsledkem kombinace feritotvorných (tzv. ekvivalent chromu Cr_E) a austenitotvorných (tzv. ekvivalent niklu Ni_E) prvků. Konstituční diagramy (Schäfflerův, De Longův, WRC-92) slouží k odhadům výsledné struktury vysokolegovaných korozivzdorných ocelí. De Longe doplnil dusík jako významný austenitotvorný prvek. Pak pro dané ekvivalenty platí:

$$Cr_E = Cr + Mo + 1,5 \cdot Si + 0,5 \cdot Nb + 2 \cdot Ti \quad (2.9)$$

$$Ni_E = Ni + 30 \cdot C + 30 \cdot N + 0,5 \cdot Mn + 0,5 \cdot Cu \quad (2.10)$$

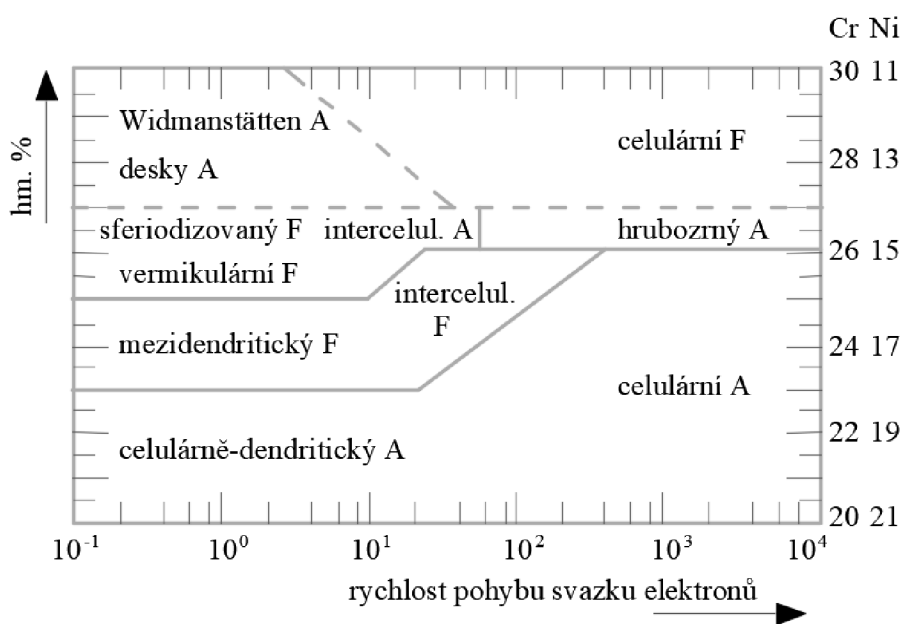
Obsah feritu v Schäfflerově diagramu byl stanoven metalograficky (plošně), v De Longově magnetometricky, kde se objemový podíl feromagnetického komponentu označil jako Feritové číslo (FN). Při nízkých hodnotách feritu jsou feritické číslo a obsah feritu identické.

Při vysoké rychlosti ochlazování, speciálně během laserového a elektronového svařování, mohou být konstituční diagramy nepřesné. Se zvyšující se rychlostí ochlazování se u slitin s nízkým poměrem Cr/Ni snižuje obsah feritu (tuhnou primárně jako austenit, protože redistribuce prvků je časově redukována), u slitin s vysokým poměrem Cr/Ni se obsah feritu zvyšuje (transformace $\delta \rightarrow \gamma$ má méně času se projevit). Projevy rychlosti ochlazování, resp. rychlosti vedení svazku elektronů u EBW (srovnatelné s LBW) na mikrostrukturu ukazuje obr. 15.

Na praskání svarového kovu mají vliv především síra a fosfor, ale i křemík, titan, niob. Prvky buď segregují do mezidendritických oblastí a na hranice zrn, kde vytváří nízkotavitelná eutektika snižující technologickou pevnost hranic zrn, nebo snižují plasticitu kovu. Způsob krystalizace austenitických ocelí má vliv na odolnost vůči horkým trhlinám. Feritická struktura je méně citlivá na vznik trhlin než austenitická a doporučuje se obsáhnout ve svarovém kovu FN 3÷15. δ ferit eliminuje vliv fosforu. Rozpustnost fosforu v δ feritu je při teplotách pod

teplotou solidu asi $10\times$ vyšší než v austenitu. Ve svarových kovech se doporučuje 2÷6 hm. %, v základním materiálu 3 hm % obsahu δ feritu. Vyšší obsahy snižují antikorozi vlastnosti a podporují vznik σ fáze. Obsah síry lze snížit vazbou na mangan.

Při svařování se nepoužívá přehřev, který by mohl nepříznivě ovlivnit korozi odolnost spoje. S ohledem na možnost transformace δ feritu se doporučuje omezit tepelný příkon na $1,5 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$ a teplotu interpass do $150 \text{ }^\circ\text{C}$. Pokud jsou svarové spoje vystaveny korozi prostředí (s obsahem fluoridů, chloridů, bromidů a jodidů, nebo ve vodě s přebytkem kyslíku), může nastat korozi praskání pod napětím. Odolnost vůči korozi praskání lze zvýšit vyžiháním svarového spoje pro snížení úrovně napětí, volit ocel s vyšším obsahem niklu, změnit prostředí.



Obrázek 15 Závislost rychlost EBW a výsledné struktury svaru [58]

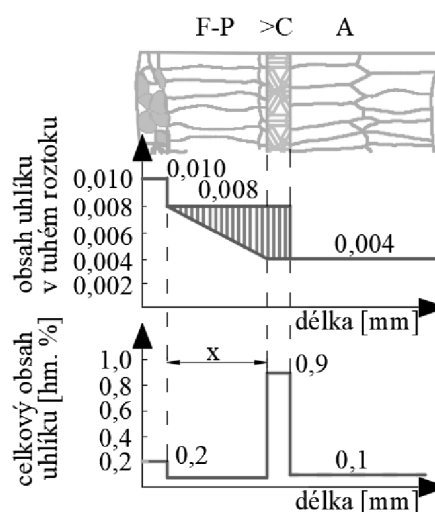
2.2.3 Svařitelnost heterogenních materiálů [40, 58, 62 až 66]

Provádění heterogenních svarů je spojování dvou samostatných kovů, které by se obvykle nesvařovaly, protože mají různé chemické a mechanické vlastnosti. Rozdílné jsou teploty tání, pevnost, tepelná roztažnost, vodivost, chemické složení, kompatibilita apod. Navzdory omezením se tyto materiály svařují, ať už z důvodu úspory nákladů, snížení hmotnosti, zvýšení účinnosti zařízení atd.

Vytvoření univerzálních kombinací spojů nabízí mnoho aplikací, ale jejich bezchybné a opakovatelné svařování je stále obtížným procesem. Než se začne svařovat heterogenní spoj je třeba si uvědomit několik faktorů:

- v přechodové zóně se vytváří intermetalické sloučeniny; měly by být zhodnoceny fáze, které se budou mezi dvěma kovy tvořit a vyšetřeny jejich náchylnosti k tvorbě trhlin, ke korozi a tvařitelnosti, V některých případech je nutné použít přídatný materiál rozpustný v obou kovech a tento rozbor usnadní rozhodování o jeho použití,
- úroveň svařitelnosti,
- příliš odlišný koeficient tepelné roztažnosti má za následek vznik vnitřních zbytkových napětí, které mají vliv na životnost svařovaných dílů,
- vliv různých teplot tání,
- různý elektrochemický potenciál naznačuje vysokou náchylnost ke korozi.

Svarový spoj mezi feriticko-perlitickou a austenitickou ocelí se vyznačuje velmi nízkou strukturální stabilitou. V důsledku difúze uhlíku v gradientu chemické koncentrace v tuhých roztocích, dochází k přerozdělování uhlíku, viz obr. 16. Tvoří se širší oduhličené pásmo (na obr. 16 značeno 'x') na straně feritické a úzké nauhličené pásmo v austenitické oceli. Šířku pásma lze vypočítat pomocí koeficientu difúze uhlíku; doba setrvání na teplotě může být menší, než je mezní hodnota koeficientu difúze uhlíku. Hlavní složku pevnosti tvoří disperzní a precipitační zpevnění. Redistribuce uhlíku probíhá již během svařování. Na rozhraní svarových spojů s rozdílnými koeficienty teplotní roztažnosti vznikají vysoká vnitřní napětí relaxující plastickou deformací v odpevněné zóně spoje. Přerozdělením uhlíku precipitačně odpevněný a v následující fázi plasticky deformovaný materiál má vyšší volnou energii než sousední zpevněná oblast, a proto je i méně stabilní. Přejít do stabilnějšího stavu se při tepelném zpracování (nebo jeho exploataci) uskuteční zotavením a rekrytalizací. Překročí-li plastická deformace oduhličené zóny kritickou hodnotu, dojde k rekrytalizaci a struktura je nahrazena novými nedeformovanými zrny. Nově vznikající feritická zrna rostou ve směru převážně kolmém na rozhraní ferit / austenit – proti směru difúzního toku uhlíku. Počátek nukleace je vázán na úplné rozpuštění karbidických a nitridických částic v zóně.



Obr. 16 Průběh difúze uhlíku za zvýšené teploty (550 °C) [64]

Mezi svarovým kovem a částečně natavenou zónou se objevuje tzv. „nepromíšená zóna“. Existuje teorie, že na složení se nepodílí difúze, ale spíše segregace. Profil složení se sníženým obsahem chromu, niklu a manganu je způsoben „odmítnutím“ pevným svarovým kovem roztavit tyto prvky v počáteční fázi tuhnutí. Během experimentů s použitím přídavných materiálů „nepromíšená zóna“ měla stejné složení jako základní materiál, což naznačuje nepromíchání s PM. Tok kovu po hranici ztavení není dostatečně silný, aby došlo k promíšení, ale postačí k natavení základního materiálu. Ve svarovém kovu může u laserového svařování dojít k nedostatečnému promíchání taveniny; svarový kov ztuhne rychleji, než k němu může dojít. Vznikají tak makrosegregace.

Aktivita uhlíku je u austenitických ocelí ve srovnání s feritickými velmi nízká. Vyrovnání aktivit v těchto spojích je možné vysokými koncentracemi chromu nebo niklu. Strukturálně stálý svar lze vytvořit vložením difúzní bariéry proti přerozdělování uhlíku; vrstvu kovu s minimální rozpustností uhlíku. Dalším požadavkem je, aby se součinitel teplotní roztažnosti nacházel mezi svařovanými materiály. Vrstva tak umožní snazší relaxaci vznikajících pnutí. Technickým řešením je vložení slitiny na bázi niklu, popř. čistý nikl. Účinnost této bariéry souvisí s její tloušťkou, teplotou a dobou provozu spoje a režimu tepelného zpracování. Používá se především pro svařování větších tlouštěk a pro pracovní teploty spoje nad 350 °C. Pro svařování heterogenních spojů pracujících do 350 °C se doporučuje použití austenitických přídavných materiálů. Takový spoj je odolný vůči krystalizačním trhlinám. Relativně měkký svarový kov redukuje napětí, které by mohlo vzniknout, pokud by se objevil martenzit, a nebezpečí formování vodíkem indukovaných trhlin.

3 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST [67, 68]

Porovnávání parametrů pro svařování pevnolátkovým laserem (metoda 521 dle ČSN EN ISO 4063:2011) potrubí dvou rozdílných materiálů (feriticko-perlitická – austenitická ocel) bylo provedeno na vzorcích svařených různými výkony, rychlostmi svařování, s přímým vedením svazku i s rozmitáním, v ochranném plynu, za použití formovacího plynu i bez. Vhodnost jejich použití byla ověřena nedestruktivními a destruktivními metodami kontrol, hodnocení vad dle ČSN EN ISO 13919-1:2021. Vložení přídavného materiálu mělo posunout strukturu svarového kovu do příznivějších oblastí, nikl měl vytvořit difúzní bariéru pro uhlík. Celkovou představu o vzorcích a použitých parametrech při laserovém svařování si lze vytvořit z přílohy č. 01. Přehled vzorků, základních, přídavných materiálů zobrazuje tab. 01.

Tab. 01 Zkušební vzorky

Ozn. vzorku	Metoda svařování	Základní materiál		ZM rozměry [mm]	Přídavný materiál	PM rozměry [mm]
		A	FP			
1	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	-	-
2	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	-	-
3	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	-	-
4	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	-	-
5	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	-	-
6	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	-	-
7	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	-	-
8	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	-	-
9	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	-	-
10	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	-	-
11	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	-	-
12	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	-	-
13	141	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	Sv-07Ch25N13	Ø 1,2
14	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	-	-
15	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	-	-
16	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	-	-
17	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	Sv-07Ch25N13	Ø 1,2
18	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	Sv-07Ch25N13	Ø 1,2
19	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	Ni	Ø 5,0
20	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	Ni	Ø 5,0
21	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	Ni	F tl. 0,2
22	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	Ni	F tl. 0,2
23	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	Sv-07Ch25N13	Ø 1,0
24	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	Sv-07Ch25N13	Ø 1,0
25	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,2	Sv-07Ch25N13	Ø 1,0
26	521	1.4541	1.0425	Ø 44,5×3,3	-	-

Vzorky č. 1 a 13 byl zkušební a dále nehodnoceny.

3.1 Svařované materiály [1, 9, 56, 69 až 91]

Kombinace materiálů byla zvolena s ohledem na jejich použití v JE, a to austenitická chromniklová a feriticko-perlitická ocel. Skupina materiálů dle TNI CEN ISO/TR 15608:2008: 1.1+8.1, skupina dle PNAE G-7-003-87:1+6. Materiály či jejich ekvivalenty musí být v souladu s NTD A.S.I., Sekce II.

V experimentu byly použity základní materiály Ø 44,5×3,2 mm:

- austenitická chromniklová ocel 1.4541 značena dle ČSN EN 10027-2:2016, (X6CrNiTi18-10 dle EN 10027-1:2017) tavba 53306, technické dodací podmínky dle ČSN EN 10216-5:2014,

- feriticko-perlitická ocel 1.0425 dle ČSN EN 10027-2:2016 (P265GH dle EN 10027-1:2017) tavba 85082, technické dodací podmínky dle ČSN EN 10216-2:2014 (neaktuální norma, ale materiál dodán v r. 2018).

Použití přídavných materiálů upravuje NTD A.S.I., Sekce I. V souladu s ní zařazen:

- svařovací drát Sv-07Ch25N13 (GOST 2246-70), tavba 103056 Ø 1,0 mm a 1,2 mm.

Pro vytvoření difúzní bariéry:

- niklový drát (Ni 99,6) Ø 5,05 mm, tavba B5927,
- niklová fólie (Ni 99,6) tl. 0,2 mm.

Inspekční certifikáty ZM uloženy jako příloha 02, PM 03 a 04.

Byly provedeny zkoušky chemického složení základních materiálů pomocí:

- jiskrového emisního spektrometru Q4 Tasman – prvky obsažené ve vzorku se atomizují (částečně ionizují) v excitačním zdroji, atomy nebo ionty přecházejí na vyšší energetickou hladinu, při návratu do nižšího energetického stavu emitují spektrum, jehož intenzita je úměrná obsahu prvku,
- spalovacího analyzátoru G4 Icarus CS HF – typ C – v malém keramickém kalíšku se za pomoci wolframu spálil vzorek o hmotnosti 0,5 g; ze vzniklých spalin se určilo množství síry a uhlíku.

Porovnání s normami stanovenými požadavky uvedeno v tab. 02 a 03.

Tab. 02 Chemické složení oceli 1.4541 v hm. % srovnáno s ČSN EN 10216-5:2014

Složení	C	Si	Mn	P	S	N	Cr
dle ČSN	≤ 0,08	≤ 1,00	≤ 2,00	≤ 0,040	≤ 0,015	-	17,00÷19,00
Q4 Tasman	0,045	0,400	1,700	0,025	< 0,001	0,027	17,370
G4 Icarus	0,0452	-	-	-	0,0006	-	-
Složení	Cu	Mo	Nb	Ni	Ti	Co	V
dle ČSN	-	-	-	9,00÷12,00	5×C÷0,7	-	-
Q4 Tasman	0,243	0,284	0,020	10,540	0,361	0,059	0,062
G4 Icarus	-	-	-	-	-	-	-

Tab. 03 Chemické složení oceli 1.0425 v hm. % srovnáno s ČSN EN 10216-2:2014

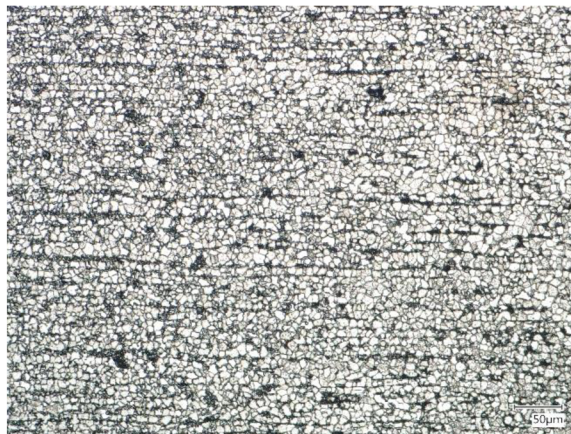
Složení	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
dle ČSN	≤ 0,20	≤ 0,40	≤ 1,40	≤ 0,025	≤ 0,010	≤ 0,30	≤ 0,08
Q4 Tasman	0,163	0,215	0,498	0,0063	0,011	0,061	0,024
G4 Icarus	0,1614	-	-	-	0,0121	-	-
Složení	Ni	Al _{celk.}	Cu	Nb	Ti	V	Cr+Cu+Mo+ Ni
dle ČSN	≤ 0,30	≥ 0,02	≤ 0,30	≤ 0,02	≤ 0,04	≤ 0,02	≤ 0,70
Q4 Tasman	0,059	0,027	0,149	0,0028	0,0008	0,0046	0,293
G4 Icarus	-	-	-	-	-	-	-

U materiálu 1.0425 byla překročena max. povolená hodnota pro obsah síry. Dosazením do vztahu 2.8 odpovídá uhlíkový ekvivalent $CE = 0,28$. Vzhledem k tloušťce materiálu a obsahu uhlíku se jedná o ocel se zaručenou svařitelností.

Obr. 17 a 18 zachycují strukturu obou základních materiálů bez tepelného ovlivnění.



Obr. 17 ZM A, lept Lučavka, 200×



Obr. 18 ZM F-P, lept 10% Nital, 200×

Složení svarového kovu přidavného materiálu Sv-07Ch25N13 je uvedeno v následující tabulce 04. Požadavek normy PN AE G-7-010-89 je srovnám s dodaným inspekčním certifikátem pro tavbu a velikost drátu $\varnothing 1,0$ mm a $\varnothing 1,2$ mm. Dle dalších zkoušek by dráty $\varnothing 1,0$ mm i $\varnothing 1,2$ mm měly obsahovat 4,2 hm. % δ feritu. GOST 2246-70 předepisuje obsah 2÷8 hm. % δ feritu ve svarovém kovu.

Kroužek z drátu $\varnothing 5,05$ mm a fólie tl. 0,2 mm jsou složeny z 99,6% niklu.

Tab. 04 Chemické složení Sv-07Ch25N13 v hm % srovnáno s PN AE G-7-010-89

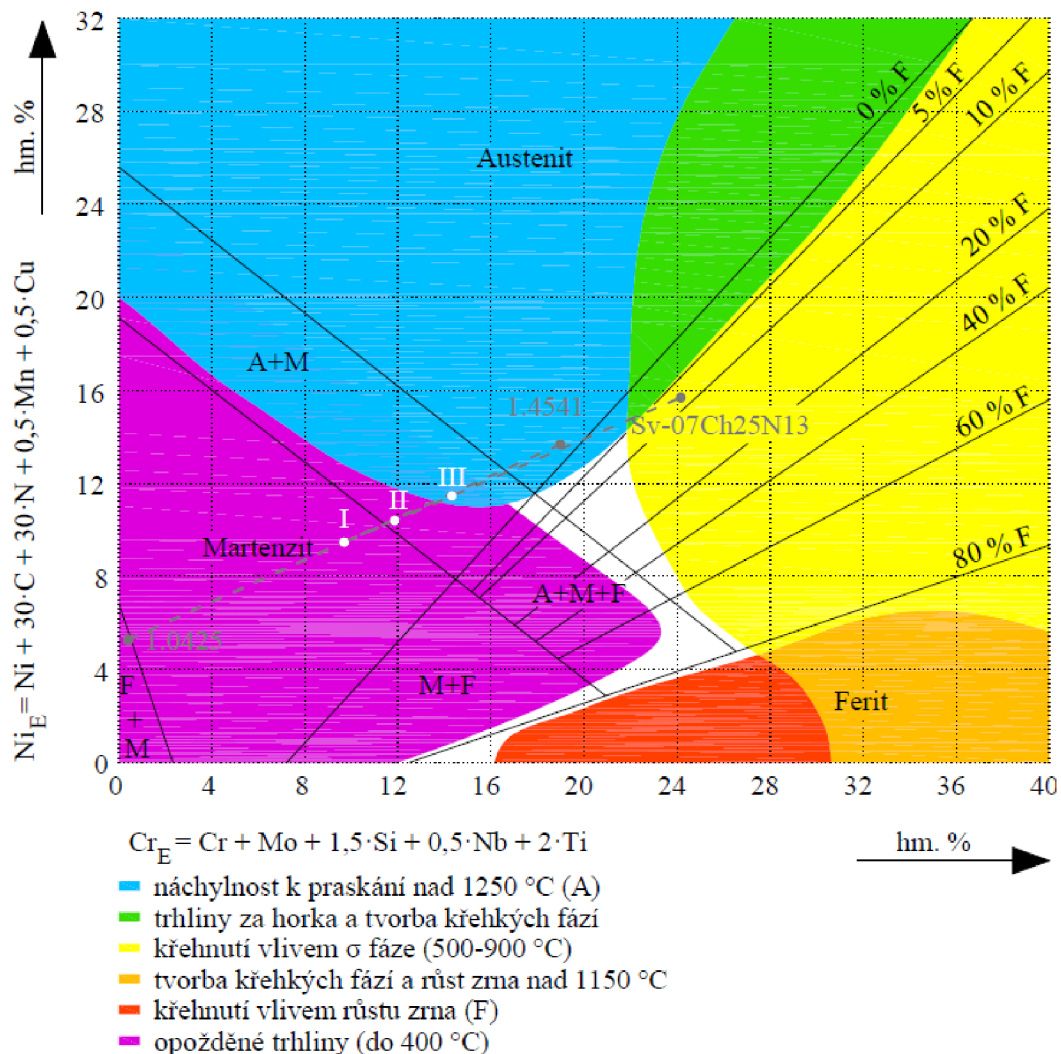
Složení	C	Mn	Si	P	S	Co	Ni	Cr
PN AE G-7-010-89	0,09	0,9÷2	0,14÷1,0	0,025	0,018	-	11,8÷14,0	22,8÷26,0
T 103056 $\varnothing 1,2$ mm	0,055	1,82	0,48	0,015	0,005	0,039	13,13	23,45
T 103056 $\varnothing 1,0$ mm	0,052	1,85	0,48	0,015	0,005	0,037	13,21	23,39

Základní a přidavný materiál byly zaznačeny do Schöfflerova diagramu, viz obr. 19. Výsledná struktura závisí na vzájemném promíšení materiálů. Ze vztahů 2.6 a 2.7 byl vypočítán chromový a niklový ekvivalent; obsahy prvků dosazeny z ověřovacích zkoušek chemického složení pro ocel 1.4541: $Cr_E = 18,98$ a $Ni_E = 13,67$, 1.0425: $Cr_E = 0,41$ a $Ni_E = 5,27$ a přidavný drát Sv-07 vycházely ekvivalenty pro oba průměry podobně s rozdílem setin (pro $\varnothing 1,2$ mm: $Cr_E = 24,17$, $Ni_E = 15,69$, $\varnothing 1,0$ mm: $Cr_E = 24,11$, $Ni_E = 15,70$); do grafu zaneseny hodnoty $\varnothing 1,2$ mm.

Umístěním materiálů 1.4541 a 1.0425 do diagramu s uvažovaným stupněm promíšení 50 % se získá martenzitická struktura (bod I). Ta by měla vzniknout v případě svařování bez použití přidavného materiálu. Pokud se dodá Sv-07 $\varnothing 1,0$ mm automatizovaně do lázně, bylo podle vztahu 2.7 zředění svarového kovu vypočítáno 85 % (struktura převážně martenzitická s podílem austenitu; bod II), u Sv-07 $\varnothing 1,2$ mm 68 % (struktura austeniticko-martenzitická; bod III). U výpočtů se vycházelo z tvaru svaru svařeného bez PM s co nejbližšími svařovacími parametry. Množství automatizovaně podávaného drátu bylo poníženo o 15 %. Důvodem byl rozdíl mezi rychlostí svařování a rychlostí podávání drátu právě cca 15 %.

Feritové číslo vychází pro materiál 1.4541 $FN = 1,15$, pro Sv-07 $FN = 15,73$ ($\varnothing 1,2$ mm) a $FN = 15,44$ ($\varnothing 1,0$ mm).

Upravený Schäfflerův diagram:



Obr. 19 Upravený Schäfflerův diagram [9, 56, 82, 83]

Základní materiály byly podrobeny mechanickému zkoušení – provedena zkouška tahem za pokojové teploty dle ČSN EN ISO 6892-1:2019 i za zvýšené podle ČSN EN ISO 6892-2:2018. Vzorky vyhověly hodnotám stanovených normou ČSN EN 10216-5:2014 pro 1.4541, viz tabulka 05 a ČSN EN 10216-2:2014 pro 1.0425, viz tabulka 06.

Tab. 05 Srovnání mechanických vlastností oceli 1.4541 s ČSN EN 10216-5:2014

Parametr	$t_{20} \text{ °C}$	ověření 1 při 20 °C	ověření 2 při 20 °C	$t_{350} \text{ °C}$	ověření 1 při 350 °C	ověření 2 při 350 °C
Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	min. 180	319	317	min. 94	223	221
Pevnost v tahu R_m [MPa]	460÷680	661	629		447	458
Tažnost A [%] podélně	min. 35	52,1	54,0		37,2	36,3
Tažnost A [%] příčně	min. 30					
Odolnost k MKK	ano*	ano**				

* Metoda A dle EN ISO 3651-2

** Mezní teplota MKK 400 °C

Tab. 06 Srovnání mechanických vlastností oceli 1.0425 s ČSN EN 10216-2:2014

Parametr	t ₂₀ °C	ověření 1 při 20 °C	ověření 2 při 20 °C	t ₃₅₀ °C	ověření 1 při 350 °C	ověření 2 při 350 °C
Mez kluzu R _{p0,2} [MPa] / mez kluzu ReH [MPa] pro t ≤ 16 mm	min. 265	430 437	460 463	min. 141	278	296
Pevnost v tahu R _m [MPa]	410÷570	567	561		512	492
Tažnost A [%] podélně	min. 23	29,3	31,4		41,8	34,9

Materiály 1.4541 i 1.0425 byly dále podrobeny zkoušce tvrdosti HV10 podle Vickerse, (ČSN EN ISO 6507-1:2015, metalografickým zkouškám na makrostrukturu (ASTM E381-20, ASTM E340-15), mikročistotu (ČSN ISO 4967:2015) a stanovení velikosti zrna (ČSN EN ISO 643:2021). Vyhodnocení:

- 1.4541: Průměrná tvrdost na deseti vtiscích byla stanovena 149 HV10. Makrostruktura neobjevila vady typu trhliny, póry, zdvojeniny. Kontrola mikročistoty neodhalila nekovové vměstky nebo řádky nadměrné velikosti. Velikost zrna G6. Protokol uložen jako příloha 05.

- 1.0425: Průměrná tvrdost na deseti vtiscích byla stanovena 154 HV10. Makrostruktura neobjevila vady typu trhliny, póry, zdvojeniny. Kontrola mikročistoty neodhalila nekovové vměstky nebo řádky nadměrné velikosti. Velikost zrna G13. Protokol uložen jako příloha 06.

Tabulka 07 uvádí mechanické vlastnosti přídatného materiálu Sv-07Ch25N13, tabulka 08 niklový drát Ø 5,05 mm. Niklový drát nevyhovuje požadavkům technické specifikace polotovaru. Pro niklový drát byla doplněna zkouška tvrdosti HV10 podle Vickerse – pět vtisků střední linií s průměrnou hodnotou 94 HV10 a vytvořen příčný osový kříž s pěti vtisky s průměrnou hodnotou 101 HV10. Protokol ze zkoušek uložen jako příloha 07.

Tab. 07 Mechanické vlastnosti Sv-07Ch25N13 dle GOST 2246-70

Parametr	t ₂₀ °C	t ₃₅₀ °C
Mez kluzu R _{p0,2} [MPa]	441	353
Pevnost v tahu R _m [MPa]	284	176
Tažnost A5 [%]	25	-
Kontrakce Z [%]	35	-

Tab. 08 Mechanické vlastnosti Ni 99,6 dle Ae 16110/Dok, Rev. 06:2020

Parametr	t ₂₀ °C	ověření 1 při 20 °C	ověření 2 při 20 °C
Mez kluzu R _{p0,2} [MPa]	max. 80	145	107
Pevnost v tahu R _m [MPa]	280÷440	475	543
Tažnost A5 [%]	min. 40	33,0	38,5

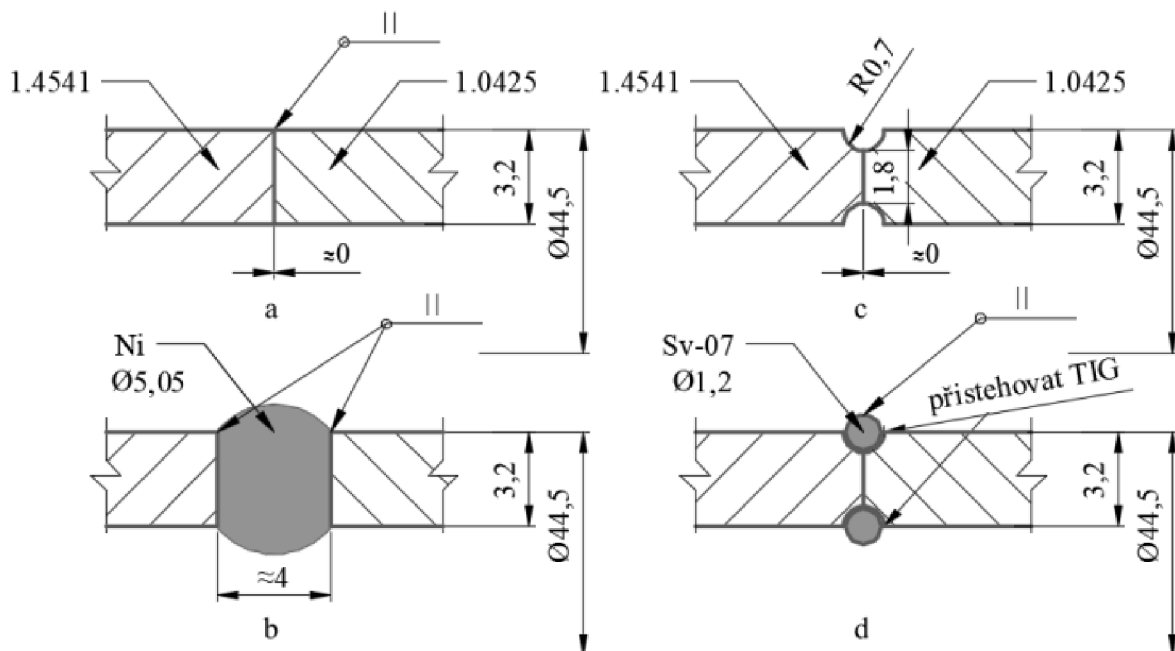
3.2 Příprava svarových hran a sestavení vzorků [92 až 94]

Stanovení postupu svařování upravuje ČSN EN ISO 15609-4:2010. Velikost zkušebního kusu pro radiální tupý svar na trubce vychází z ČSN EN ISO 15614-11:2003; délka 2×150 mm.

U vzorků byla sražena čela za pomoci třískového obrábění, viz obr. 20; svar tupý typu „I“ (a). Naznačení sestavy s Ni kroužkem (b; zde byly provedeny dva svary), obdobu představuje vložení Ni fólie s tloušťkou 0,2 mm. Vzorky s přídatným materiálem ve formě drátu (Ø 1,2

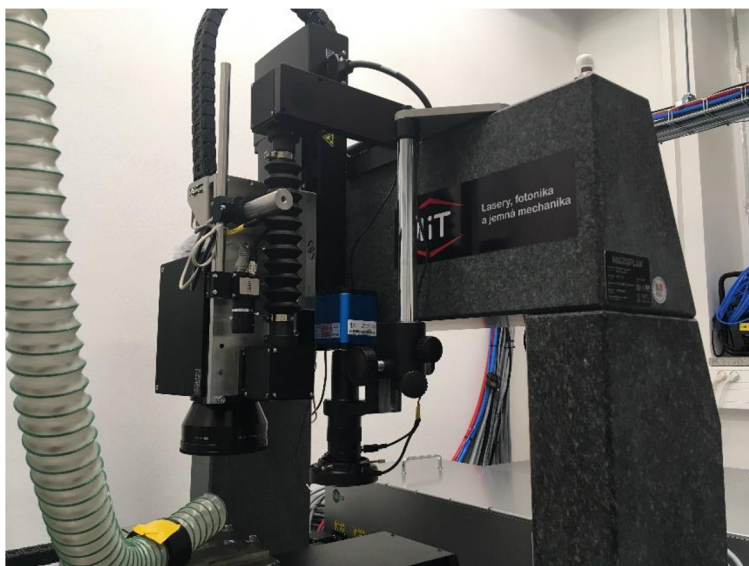
mm) byly opatřeny vybráním o $R = 0,7$ mm z vnitřní i vnější strany (c). Drát Sv-07 byl do drážek austenitického materiálu nastehován metodou TIG (d). Pro automatické podávání drátu Sv-07 byla zachována úprava pro „I“ svar.

Niklové kroužky byly vytvořeny svažením z drátu $\text{Ø } 5,05$ mm. Kraje byly zbroušeny.

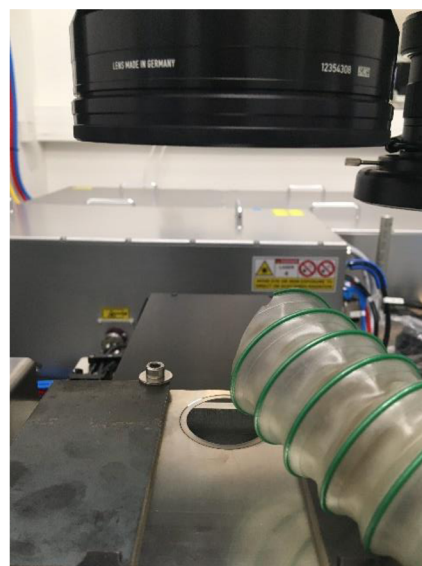


Obr. 20 Příprava svarových ploch

Mezivrstva z niklové fólie tl. 0,2 mm byla vyřezána Pikosekundovým Yb:YAG tenkodiskovým laserem od firmy HiLASE, viz obr. 21 a 22. Parametry: Výkon 6 W, opakovací frekvence pulzů 60 kHz, délka pulzů 1 ps ($1 \cdot 10^{-12}$ s), rychlost $1000 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.



Obr. 21 Pikosekundový Yb:YAG laser na ÚPT



Obr. 22 Detail optiky

Pro přesné sestavení vzorků pro svařování vláknovým laserem na ÚPT byl použit speciální přípravek, viz obr. 23. Jednotlivé trubky byly k sobě přitaženy pomocí svorníků a takto umístěny do polohovadla. Stejný postup byl aplikován i v případech s přídavným materiálem: niklové kroužky a niklové plechy byly vloženy mezi trubky volně a staženy svorníky. Sestavy dvojic trubek byly vytvořeny za pomoci svorníků i během svařování v Plzni. Jedna upínací strana byla upravena tak, aby bylo možné do kořenové oblasti foukat formovací plyn. Vzorky svařované na MTF v Trnavě byly stehovány stejným laserem, jakým byly následně svařeny.



Obr. 23 Přípravek pro sestavení vzorků na ÚPT

3.3 Svařování [95 až 97]

Převážná část vzorků byla svařena pevnolátkovým vodou chlazeným vláknovým laserem IPG YLS 2000 v Ústavu přístrojové techniky Akademie věd České republiky v Brně. Laser má výkon 2000 W s účinností přibližně 30 %. Aktivní prostředí je dopováno ytterbiem. Vlnová délka 1,07-1,08 μm . BPP = 0,34 mm·mrad. Polohování hlav proběhlo pomocí robotického ramene ABB IRB 2400-10. Díly byly upevněny na synchronní dvouosé polohovadlo IRBP 250 s nosností 200 kg.

Prvních sedm vzorků bylo svařeno svařovací hlavou Precitec YW 30 (obr. 24) přímým vedením laserového svazku s rozdílným výkonem a rychlostí svařování. Průměr optického vlákna 200 μm . U vzorků č. 8÷12 a č. 26 byla vyměněna svařovací hlava za wobblovací (skenerová hlava IPG Photonics FLW D30-Wobbler P30-010533-V4D1, viz obr. 25) a vzorky svařeny rozmitáním paprsku ve tvaru kružnice. Optické vlákno 100 μm . Ochranný plyn byl použitý argon o čistotě 4.6 s průtokem 16 l·min⁻¹ (bez ochrany kořene). Ohnisková vzdálenost 200 mm. Ohnisko během svařování zaměřeno 1 mm pod povrch materiálu ($f = -1$ mm). Vzorky č. 17 až 22 byly svařeny wobblovací hlavou, ale bez použití rozmitání svazku, tedy přímým paprskem. Průměr optického vlákna 200 μm . Průtok argonu 4.6 byl snížen na cca 12 l·min⁻¹. Optika ve všech případech zaměřena kolmo na svařovaný vzorek.

Tři vzorky (č. 14, 15 a 16) byly svařeny pevnolátkovým diskovým laserem TruDisk 4002 (na obr. 26) od firmy Trumpf na Materiálovotechnologické fakultě v Trnavě. Současný maximální výkon laseru 2000 W, účinnost přibližně 30 %. Vlnová délka 1,03 μm . BPP = 8 mm·mrad. Umístění fokusační optiky BEO D70 na robotickém rameni Fanuc M-710ic/50. Díly uchyceny do dvouosého polohovadla.

Ochranný plyn argon o čistotě 4.6 s průtokem 22 l·min⁻¹ chránil povrch, u dvou vzorků (č. 14 a č. 15) kořen helium o čistotě 4.6 s průtokem 34 l·min⁻¹. Ohnisková vzdálenost 200 mm. Ohnisko při svařování zaměřeno na povrch materiálu ($f = 0$ mm). Optické vlákno 400 μm . Sklon optiky 5°. Pro zakončení svaru byl naprogramovaný doběh 500 ms (vzorky č. 14, č. 15) a 700 ms (vzorek č. 16). Tzv. rampa znamená pokles výkonu ze svařovacího na nulový. Za daný časový okamžik dojde k přejezdu přes počáteční bod svařování.

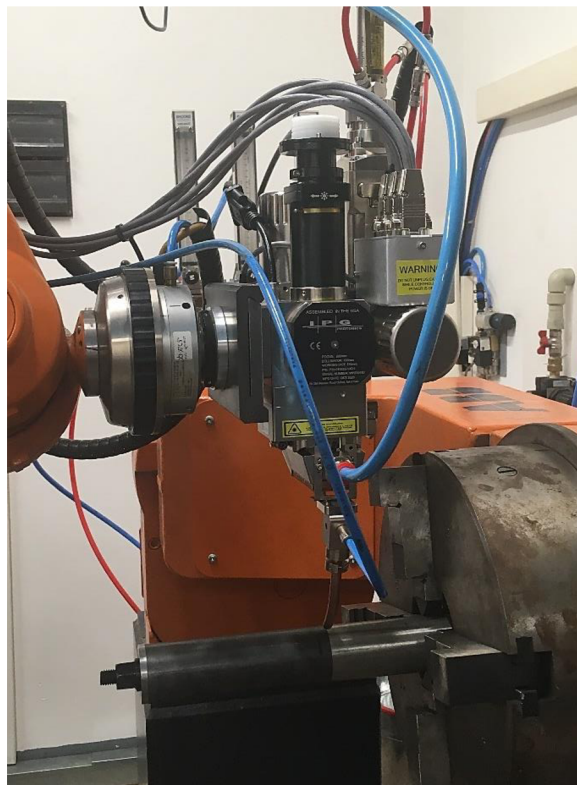
Vzorky č. 23, 24 a 25 byly svařovány ve firmě LaserTherm v Plzni (obr. 27). Použitý byl pevnolátkový vláknový laser chlazený vodou od firmy Laserline 4000-6. Maximální výkon 4000 W, účinnost 30 %. Vlnová délka 1,00 μm . BPP = 6 mm·mrad. Svařovací optika OTS-3 vybavená automatickým podavačem drátu (systém push-pull) pracovala v součinnosti s robotickým ramenem Fanuc M-20iA/20M. Díly uchyceny do dvouosého polohovadla.

Jako ochranný plyn krycí i kořenové oblasti byl použit dusík o čistotě 5.0 s průtokem přibližně 6 l·min⁻¹. Ohnisková vzdálenost 250 mm. Ohnisko při svařování zaměřeno na povrch

materiálu ($f = 0 \text{ mm}$). Optické vlákno $150 \mu\text{m}$. Sklon optiky 2° . Pro svařování byla nastavená rampa 400 ms a přejezd 10° .



Obr. 24 Vlákenný laser na ÚPT v Brně



Obr. 25 Laser na ÚPT s wobblovací hlavou



Obr. 26 Diskový laser na MTF Trnava



Obr. 27 Vlákenný laser v Lasertherm Plzeň

Parametry svařování u jednotlivých vzorků shrnuje tab. 09.

Tab. 09 Svařovací parametry

Ozn. vzorku	Metoda	Výkon [W]	Rychlost svařování [mm·s ⁻¹]	Rychlost podávání		Tepelný příkon [kJ·mm ⁻¹]	Tvar křivky	Průměr křivky [mm]	Frekvence kmitání [Hz]
	521			PM					
	Druh laseru						-		
2	vláknový	2000	P	20	-	0,085	-	-	-
3	vláknový	2000	P	20	-	0,085	-	-	-
4	vláknový	2000	P	20	-	0,085	-	-	-
5	vláknový	1800	P	10	-	0,153	-	-	-
6	vláknový	1800	P	10	-	0,153	-	-	-
7	vláknový	1800	P	10	-	0,153	-	-	-
8	vláknový	2000	R	10	-	0,170	kružnice	1	100
9	vláknový	2000	R	10	-	0,170	kružnice	2	100
10	vláknový	2000	R	15	-	0,113	kružnice	2	100
11	vláknový	2000	R	15	-	0,113	kružnice	2	100
12	vláknový	2000	R	15	-	0,113	kružnice	2	100
14	diskový	1600	P	15	-	0,091	-	-	-
15	diskový	1700	P	15	-	0,096	-	-	-
16	diskový	1800	P	15	-	0,102	-	-	-
17	vláknový	1800	P	10	-	0,153	-	-	-
18	vláknový	1800	P	10	-	0,153	-	-	-
19	vláknový	2000	P	20	-	0,085	-	-	-
20	vláknový	2000	P	20	-	0,085	-	-	-
21	vláknový	2000	P	20	-	0,085	-	-	-
22	vláknový	1800	P	10	-	0,153	-	-	-
23	vláknový	2000	P	20	13	0,085	-	-	-
24	vláknový	2200	P	20	13	0,094	-	-	-
25	vláknový	2400	P	20	13	0,102	-	-	-
26	vláknový	2000	P	15	-	0,113	kružnice	2	100

* P – přímé vedení svazku, R – rozmítání

Tepelný příkon vypočítán ze vztahu 2.6 s uvažovanou účinností 85 %.

3.4 Nedestruktivní kontroly [1, 68, 75, 98 až 101]

Defektoskopické metody slouží ke zjišťování povrchových a vnitřních vad, popřípadě zobrazení jejich indikací.

Použití následujících metod vychází z požadavků TPE 10-40/1771/2014-JE Všeobecné technické podmínky pro montážní svařování potrubí elektráren typu VVER, které představují výňatek z původních předpisů PK 1514–72 a OP 1513–72. Návod pro provádění a hodnocení nedestruktivních kontrol na provozovaných jaderných zařízeních představuje NTD A.S.I. Sekce VII. Výchozím předpokladem je zařazení svarových spojů do kategorie IIA. Do této kategorie jsou dle NTD A.S.I. Sekce I zařazeny svarové spoje pracující trvale nebo periodicky s radioaktivním mediem při tlaku $P \leq 5$ MPa nebo s pod tlakem.

Hodnocení vad svarů pro laserové svařování, jejich mezní hodnoty, uvádí norma ČSN EN ISO 13919-1:2021. Uvažovány mezní hodnoty vad pro stupeň jakosti 'B'.

NDT probíhaly v dílnách JE Temelín a JE Dukovany a ve specializovaném pracovišti v Brně. Teplota zkoušeného povrchu 23÷25 °C, intenzita osvětlení 900÷1200 luxů. Provedené NDT s výsledky shrnuje tab. 10.

Tab. 10 Přehled nedestruktivního zkoušení

Ozn. vzorku	VT	PT	RT	UT-PA	Ozn. vzorku	VT	PT	RT	UT-PA
2	•	•	•	•	17	•	•	•	•
3	•	•	•	•	18	•	•	•	•
4	•	•	•	•	19	•	•	•	•
5	•	•	•	•	20	•	•	•	•
6	•	•	•	•	21	•	•	•	•
7	•	•	•	•	22	•	•	•	•
8	•	•	•	•	23	•	•	•	•
9	•	•	•	•	24	•	•	•	•
10	•	•	•	•	25	•	•	•	•
11	•	•	•	•	26	•	•	•	•
12	•	•	•	•					
14	•	•	•	○					
15	•	•	•	○					
16	•	•	•	○					

•	vyhovuje
•	nevyhovuje
○	nezkoušeno

4.4.1 VT (vizuální kontrola) [99, 102, 103]

Provádí se podle všeobecných zásad uvedených v ČSN EN ISO 17637:2018 a instrukci VT- 19-JE-002, vyhodnocení jakosti svarového spoje podle PK 1514–72.

Nevyhovujícími se staly vzorky: č. 3 s vadou 511 (neúplné vyplnění svaru), č. 8 – 502 (nadměrné převýšení), 5061 (přetečení krycí vrstvy), č. 9, č. 10 a č. 11 – 2025 (koncová kráterová staženina), č. 12 – 2025 (koncová kráterová staženina), 5061 (přetečení krycí vrstvy) a vzorek č. 26 – vada 2025 (koncová kráterová staženina).

4.4.2 PT (kapilární zkouška) [99, 104 až 106]

Obecné zásady zkoušky uvádí ČSN EN ISO 3452-1:2015. Zkouška byla provedena metodou barevné indikace; u svarových spojů z nelegovaných, austenitických, ostatních legovaných a různorodých ocelí se používá instrukce PT-19-JE-0002 s hodnocením dle PK 1514–72. Pro danou kategorii svarového spoje (kategorie II) a tloušťku materiálu do 5,0 mm nejsou objemové vady kruhového nebo protáhlého charakteru povoleny.

Kritériím nevyhověly vzorky č. 8, 10, 11 a 26.

Foto z PT zkoušky u vzorků č. 11 a 8 na obr. 28, u vzorku č. 26 na obr. 29.



Obrázek 28 PT vzorků č. 11 (vlevo) a č. 8 (vpravo)

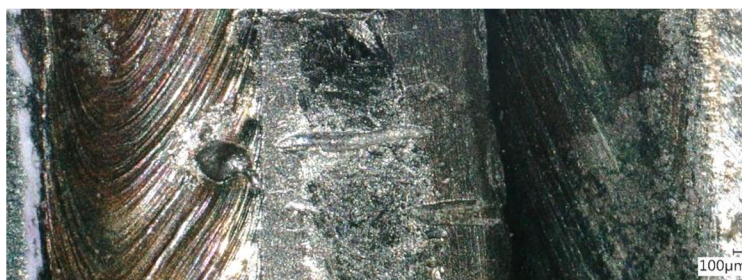


Obr. 29 Indikace 509 u vz. č. 26

Kapilární zkouška provedena u vzorků č. 19 indikovala objemové vady kruhového typu 2017 6x v délce 3 mm. U vzorku č. 20 se projevil indikace typu 2017 dle ČSN EN ISO 13919-1 na délce 65 mm, viz obr. 30. Vada byla potvrzena kontrolou na optickém mikroskopu, viz obr. 31.

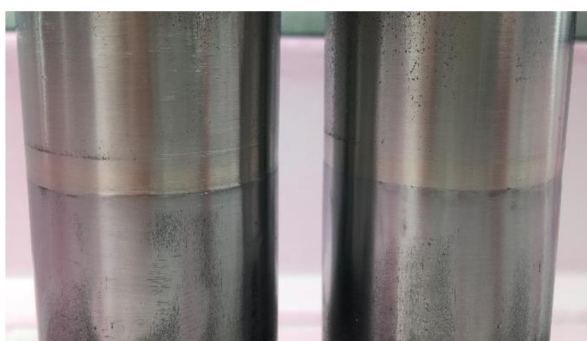


Obr. 30 Indikace 2018 u vz. č. 20

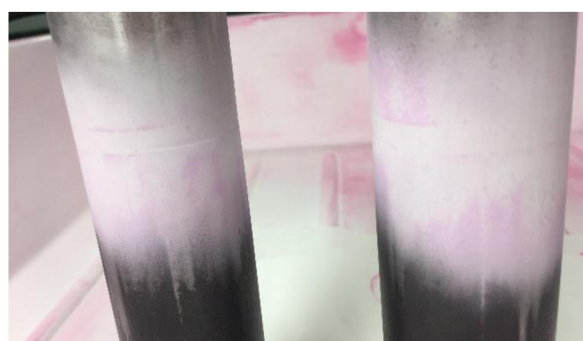


Obr. 31 Povrchový pór u vzorku č. 20

Vzorky č. 19 a č. 20 byly svařeny s přídavným materiálem ve formě niklového kroužku Ø 5,05 mm s provedením svaru z obou stran kroužku. Indikace se projevil v převýšení. Proto byl následně kroužek zbrošen na úroveň základních materiálů a přistoupilo se k opakování PT. Výsledkem byl vyhovující vzorek, viz obr. 32 a 33.



Obr. 32 Zbroušení Ni kroužku u vz. č. 19 a 20



Obr. 33 Opakovaná PT u vz. č. 19 a č. 20

4.4.3 RT (prozařovací zkouška) [1, 68, 105, 107 až 109]

Radiografického zkoušení za použití filmu se provádí přednostně dle ČSN EN ISO 17636- 1:2013. Je vhodné především ke zjišťování objemových vad (póry, pevné vměstky, staženiny), zjistitelnost plošných vad (trhliny, studené spoje) je omezena.

V souladu s normou byly vzorky rentgenovány z míst 'A' a 'B'. Uspořádání zkoušky k prozařování přes dvě stěny, obraz obou stěn (eliptická technika). Většina vzorků byla kontrolována pomocí rentgenky. Vzdálenost zdroj – film 350 mm, napětí $U = 145$ kV, proud $I = 5,5$ mA, doba expozic přibližně 17 s a 30 s. Třemi vzorky pronikalo gama záření ze zdroje Se 75. Vzdálenost zdroj – film 620 mm, parametry záření 73 Ci. Pro určení jakosti radiogramu

(speciálního fotografického filmu, na který se zachycuje účinek prošlého záření předmětem) se na vzorky umísťuje měřka jakosti obrazu dle ČSN EN ISO 19232-1 typ W10FE ISO, resp. W13FE. Během vyhodnocování se kontroluje rozeznatelnost nejmenšího patrného drátku a stupeň optické denzity 'D'.

Vzorky byly nevyhovující především kvůli vadám č. 402 (neprůvar) a značné pórovitosti (vady 2013 / 2014 – shluk / řádek pórů). Velikost pórů se pohybovala až kolem 2 mm. Mezní hodnoty vad pro nejvyšší stupeň jakosti 'B' uvedený v normě ČSN EN ISO 13919-1 připouští v závislosti na tloušťce svařovaného materiálu velikost póru do 1 mm. Vyhovující byl vzorek č. 4 a vzorky č. 23, 24 a 25.

Na obr. 34 uložen snímek z prozařovací zkoušky vz. č. 17 a 18, elipsa z jedné strany. Na obr. č. 35 vyhovující radiogram ze zkoušky vz. č. 23.



Obr. 34 Radiogramy těles č. 17 a 18, pohled A

Obr. 35 Radiogram vz č. 23

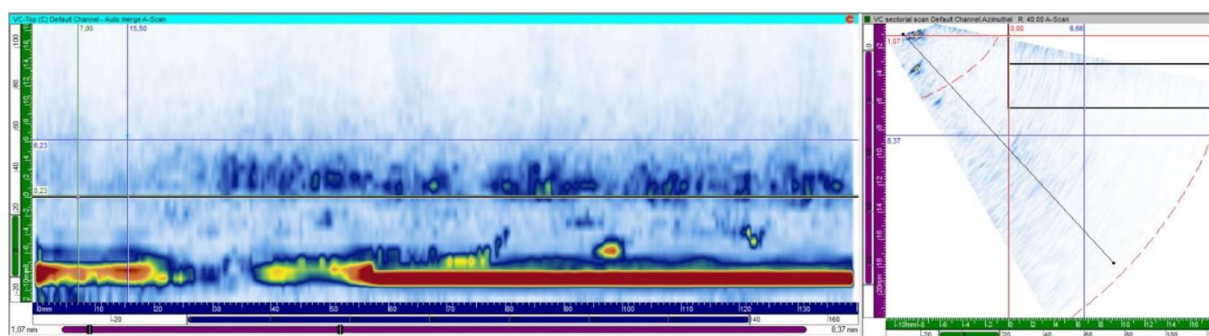
4.4.4 UT-PA (ultrazvuková zkouška – Phased Array) [1, 108, 110 až 112]

Svary potrubí se zkoušely ultrazvukem podle UT-19-JE-0001. Využití automatizované techniky phased array uvedeno v ČSN EN ISO 13588:2020. Tato technika využívá sondu obsahující soustavu nezávislých měničů, které jsou od sebe izolovány, samostatně ovládány a jednotlivé elementy dokáží přijímat ultrazvukový signál. Ultrazvukový svazek je možné tvarovat, naklánět. Sledují se změny v intenzitě signálu vyvolané nehomogenitami ve zkoušeném prostředí – vady (vměstky, póry, trhliny, studené spoje).

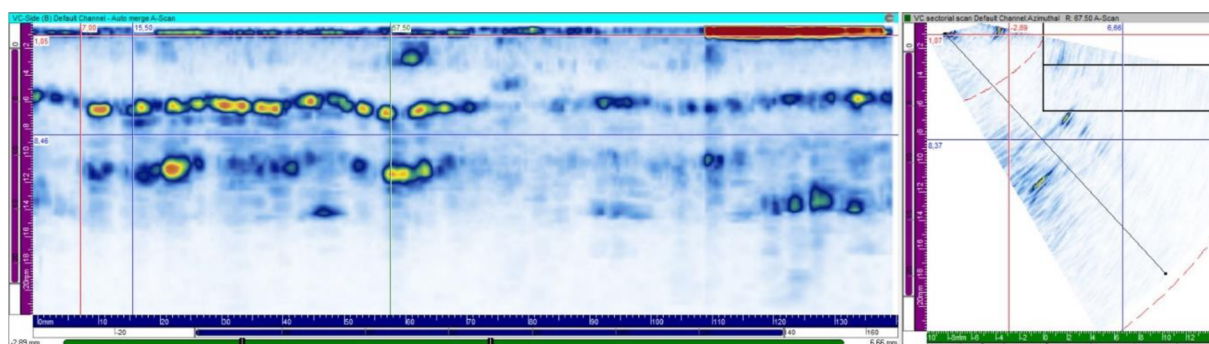
Pro kontrolu bylo použito zařízení TOPAZ 32/128 PR s manipulátorem Circ-it. Vzorky č. 2÷12 byly zkoušeny pouze ze strany feriticko-perlitického (FP) materiálu se zaobleným klínkem OLYMPUS SA15-N60S A0D1,9, sondou 10 MHz: OLYMPUS 10CCEV35-32; snímání v jedné skupině s rozevřením svazku 35÷80°. Instrukce UT předepisuje nutnost kontroly z FP strany, v opačném případě kontrolu nelze provést. U vzorků č. 16÷26 byla aplikována kontrola jak ze strany FP materiálu, tak i austenitického (A). Pro austenity se používá z důvodu odlišné struktury materiálu sonda 5 MHz: OLYMPUS 5CCEV35-32; snímání ve dvou skupinách s rozevřením svazků 35÷60° a 50÷75°. Citlivost pro detekci nastavena na příčný vývrt průměru 1,5 mm, zesílena o 10 dB. Jako kalibrační médium se používá vazelína, pro zkoušku voda.

Nevyhovující výsledky kontrol UT-PA a RT převážně korespondovaly. Indikace se zobrazovaly v místech neprůvarů, neúplného vyplnění. Zásadní rozdíl v hodnocení znamenaly vzorky č. 17 a č. 18. Na obr. 36 – kontrola ze strany austenitu – zobrazuje červená barva ostrý zářez do materiálu při provádění kalibrace vzorku, ale ne vadu ve svaru. Tyto spoje byly z pohledu UT-PA vyhovující, RT byla naopak jasně nevyhovující (kapitola 3.4.3, obr. 34) z důvodu nadměrné pórovitosti svarového kovu (vady 2013, 2014). Při zpětném srovnání snímků z RT a UT-PA bylo potvrzeno, že UT-PA póry nezachytí, pokud nemá opravdu velký rozměr; odhalila vadu, která vznikla během svařování niklového kroužku u vz. č. 20. Na druhou stranu, vyhovující RT vzorku č. 23 (obr. 35) neznamenal vyhovující UT-PA. Ze záznamu na obr. 37 vyplývají indikace ve svaru. Nelze přesně stanovit, o jakou vadu se jedná. Mohlo jít o příčné trhliny, které byly nalezeny v rámci destruktivních kontrol.

Metoda UT-PA není vhodná k odhalení vad typu pór, ale může lépe odhalit trhliny než RT.



Obr. 36 UT-PA Vz. č. 18 ze strany A materiálu



Obr. 37 UT-PA Vz. č. 23 ze strany FP materiálu

3.5 Destruktivní kontroly [93, 99]

Kromě nedestruktivního zkoušení (VT, PT, RT, UT) předepisuje ČSN EN ISO 15614-11:2002 (stejně tak PK 1514-72) další typy zkoušek pro ověření postupu svařování. Pro stupeň přípustnosti 'B' byla zvolena příčná zkouška tahem, metalografické zkoušení, zkouška tvrdosti. Doplněna byla zkouška tahem za zvýšené teploty a liniová mapa prvků.

Následující tabulka 11 uvádí provedené destruktivní kontroly u jednotlivých vzorků, popř. vybraného zástupce ze skupiny se stejnými svařovacími parametry. Tahové zkoušky byly uskutečněny na dvou tělesech. Metalografické hodnocení proběhlo u všech vzorků minimálně ve dvou zastoupeních. Vybraná byla místa v problémové oblasti – napojení / ukončení svaru, ale i místa bez zřetelných vad. Vždy jeden z reprezentantů ve společném puku byl následně zvolen pro provedení zkoušky mikrotvrdomosti. Pro účely EDS analýzy vznikly nové puky se zástupci s porovnatelnými hodnotami.

DT se uskutečnily na JE Temelín v prostorách Tréninkového a Realizačního Centra, které disponuje akreditovanou materiálovou laboratoří. Vzorky k vyhodnocení na SEM byly měřeny na Materiálovotechnologické fakultě v Trnavě.

Tab. 11 Přehled destruktivního zkoušení

Ozn. vzorku	ZK Tah (20 °C)	ZK Tah (350 °C)	Metalografie	Mikro-tvrдость	Ozn. vzorku	ZK Tah (20 °C)	ZK Tah (350 °C)	Metalografie	Mikro-tvrдость
2	●	○	●	●	17	●	●	●	●
3	○	●	●	●	18	○	○	●	●
4	○	○	●	●	19	○	○	●	●
5	●	●	●	●	20	●	●	●	●
6	○	○	●	●	21	●	●	●	●
7	○	○	●	●	22	●	●	●	●
8	○	○	●	●	23	●	●	●	●
9	○	○	●	●	24	●	●	●	●
10	○	○	●	●	25	●	●	●	●
11	●	●	●	●	26	●	●	●	●
12	○	○	●	●					
14	●	●	●	●					
15	●	●	●	●					
16	●	●	●	●					

● vyhovuje
 ● nevyhovuje
 ○ nezkoušeno

4.5.1 Tahová zkouška (za pokojové teploty) [113 až 117]

Zkouškou se stanovuje jedna nebo více mechanických vlastností materiálu; těleso je deformováno tahovým zatížením, obvykle do lomu. Zkouška svarového spoje statickým tahem se provádí nejméně na dvou vzorcích podle GOST 6996-66. Příčnou zkoušku tahem upravuje ČSN EN ISO 4136:2012, postup zkoušky ČSN EN ISO 6892-1:2021.

Nejprve byly ze svařených trubek vyříznuty podélné pásy na gravitační pásové pile s vlastním posuvem do řezu. Tyto výřezy byly osoustruženy na požadovaný rozměr. Příklad připravených zkušebních těles ze vzorků č. 2 a č. 5 je na obr. 38.



Obr. 38 Zkušební tělesa před tahovou zkouškou za studena

Použité zařízení INSTRON 5989 umí vyvinout sílu až 600 kN, minimální rychlost zatěžování $0,0001 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, maximální rychlost $508 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ a disponuje vertikálním prostorem pro upnutí vzorku 2000 mm. Zařízení zachycuje fotografie na obr. 39, upnutí vzorku v plochých čelistech po provedení zkoušky obr. 40. Na obrázku je zachycen i extenzometr,

který je jednou z možností měření skutečného prodloužení tělesa. Tenzometrická hlava upevněná v horním příčniku zaznamenává zátěžnou sílu.

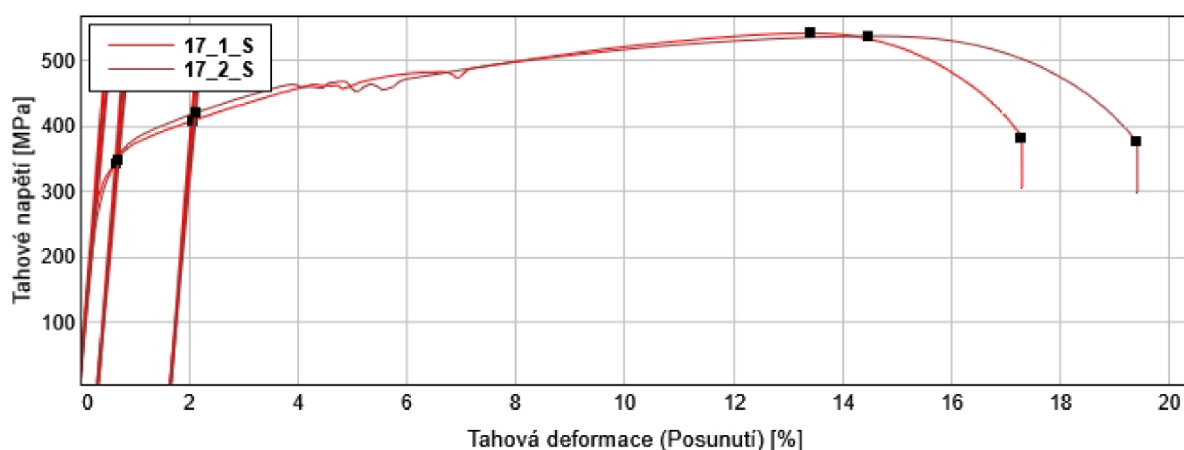


Obr. 39 Zařízení INSTRON 5989



Obr. 40 Vz. č. 26 po zkoušce tahem při 20 °C

Jak je patrné z tab. 11 k porušení vzorků bez přídavných materiálů došlo v základním feriticko-perlitickém materiálu (vyhovující výsledek zkoušky), který má při teplotě 20 °C nižší mez pevnosti než austenitický. Bylo tomu tak i v případě vzorku č. 26 (na obr. 40), i když kořen nebyl zcela provařen. U vzorků č. 20 s vloženým niklovým kroužkem a č. 21, 22 s niklovou fólií se staly místem porušení svary; v případě niklového kroužku svar s austenitickým základním materiálem. Ukázka průběhu zkoušky těles vyrobených ze vzorku č. 17 na obr. 41, vyhodnocení v tab. 12.



Obrázek 41 Průběh tahové zkoušky za pokojové teploty

Tab. 12 Vyhodnocení tahové zkoušky za pokojové teploty

	Ozn. vzorku	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	Lc [mm]	Rp 0,2 [MPa]	Rm [MPa]	Místo porušení
1	17_1_S	6,0	2,9	60,0	342	542	ZM - P265 GH
2	17_2_S	6,0	2,9	60,0	349	538	ZM - P265 GH
Střední		6,0	2,9	60,0	346	540	

4.5.2 Tahová zkouška (za zvýšené teploty) [73, 74, 117, 118]

Zkoušení mechanických vlastností za zvýšené teploty bylo realizováno dle požadavků normy ČSN EN ISO 6892-2:2018. Teplota zkoušky byla stanovena na 350 °C.

Testovacím zařízením byl opět INSTRON 5989. Upínací část těles byla zploštěna na hydraulickém lisu; tělesa následně upnuta pomocí čepů, vybavena snímači teploty (obr. 42) – třemi vzhledem k měrné délce vzorku nad 50 mm. Náhřev na požadovanou teplotu probíhal v indukční peci, viz obr. 43.

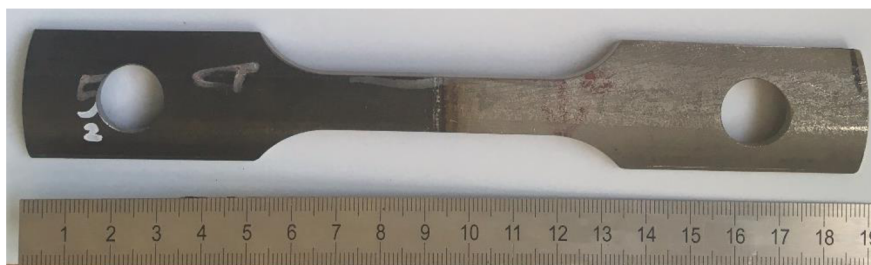


Obr. 42 Snímače teploty



Obr. 43 Ustavování tělesa v indukční peci

Zkušební těleso před zkouškou zobrazeno na obr. 44.



Obr. 44 Zkušební těleso pro tahovou zkoušku za zvýšené teploty

Zkušební těleso po zkoušce při 350 °C na obr. 45.

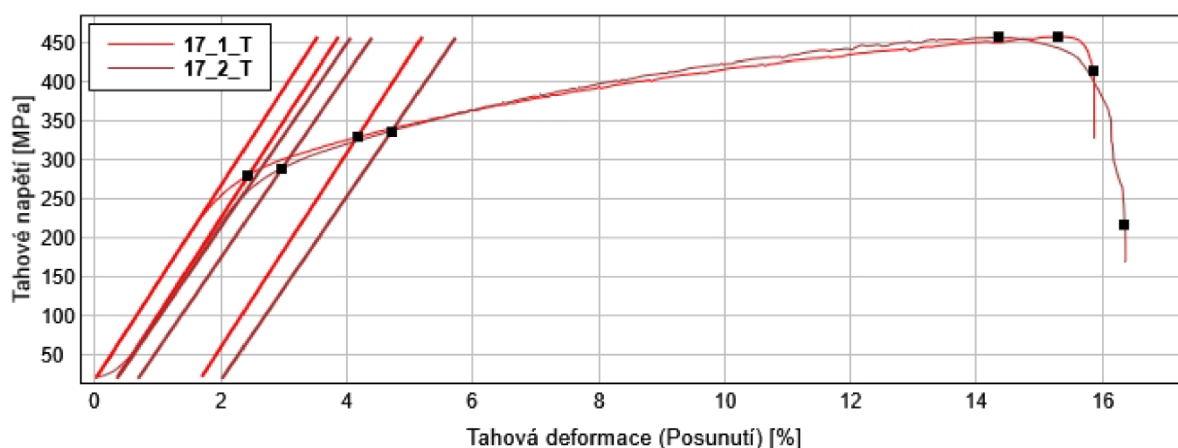


Obr. 45 Vz. č. 3 po zkoušce tahem při 350 °C

K překročení meze pevnosti došlo u vzorků bez přídavných materiálů tentokrát na straně austenitického materiálu. U materiálu 1.4541 uvádí norma ČSN EN 10216-5:2014 nižší minimální hodnoty smluvní meze kluzu, než pro materiál 1.0425 zmiňuje ČSN EN 10216-2:2014. Rozdíl činní přibližně 50 MPa. Ověřovací tahové zkoušky základních materiálů potvrdily sníženou mez pevnosti v tahu austenitického materiálu za zvýšené teploty oproti feriticko-perlitickému.

Nevyhovujícími se staly oba vzorky č. 17 (vyhověly během zkoušky tahem za studena); u přetržených vzorků byla pouhým okem viditelná pórovitost. Porušení ve svaru bylo zaznamenáno i u vzorků č. 20, 21 a 22 s niklovým kroužkem a niklovou fólií.

Ukázka průběhu zkoušky těles vyrobených ze vzorku č. 17 na obr. 46, vyhodnocení v tab. 13.



Obrázek 46 Průběh tahové zkoušky za zvýšené teploty

Tab. 13 Vyhodnocení tahové zkoušky za zvýšené teploty

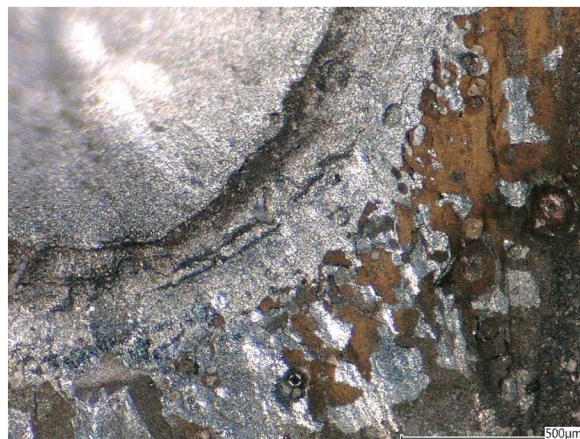
	Ozn. vzorku	Šířka [mm]	Tloušťka [mm]	Lc [mm]	Rp 0,2 [MPa]	Rm [MPa]	Teplota zkoušky	Místo porušení
1	17_1_T	10	3	60	280	459	350 °C	SK
2	17_2_T	10	3	60	289	458	350 °C	SK
Střední		10	3	60	285	458		

4.5.3 Metalografie [58, 88, 93, 119 až 122]

Před metalografickým zkoumáním byly doposud nedělené části svarů podrobeny kontrole vnitřního povrchu. U vzorků č. 5 a č. 6 byly v oblasti zakončení laserového svazku v kořenové části viditelné kráterové, viz obr. 47 i podhousenkové trhliny, viz obr. 48.



Obr. 47 Kráterová trhlina, vz. č. 6; 50×

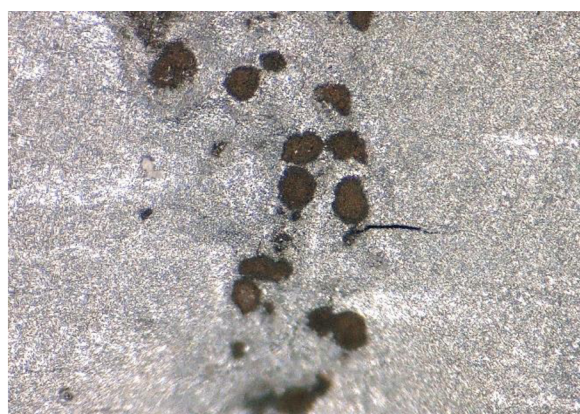


Obr. 48 Podhousenková trhlina, vz. č. 6; 200×

Mikrotrhliny se šířily podélně, viz obr 49 i příčně přes kořen svaru, viz obr. 50.



Obr. 49 Podélná trhlina, vz. č. 5; 100×



Obr. 50 Příčná trhlina, vz. č. 6; 200×

Kráterové trhliny se objevily i u vzorku č. 26, který byl svařený stejnými parametry (jako vzorky č. 5, 6, 7), ale se sníženým množstvím Ar. Pozorovaná trhlina nebyla rozšířena do takové hloubky a měla plynulejší přechod. U ostatních vzorků kráterové trhliny zjištěny nebyly.

Povrchové vady, tentokrát z vnější, krycí strany, měly téměř všechny vzorky svařené wobblingem. Koncovou kráterovou staženinu jasně odhalila PT.

Následovaly metalografické rozbory v souladu s normou ČSN EN ISO 17639:2014. Norma ČSN EN ISO 15614-11:2002 doporučuje jak makroskopické, tak i mikroskopické zkoušení pro svary stupně přípustnosti B. Části byly rozděleny metalografickou pilou Struers Labotom 50; řezný kotouč obsahující korund (Aluminium Oxide Cut-off Wheel 40A25); a zalisovány pomocí metalografického lisu Metalco QPRESS 50 do pryskyřice pro zapékání za tepla. Polovinu hmoty tvořila vodivá složka. Takto připravené puky byly následně broušeny a leštěny na zařízení Struers Laboforce 100. Použity byly brusné papíry o zrnitosti 180, 800, 1200 a 2400, lešticí plátna s diamantovou suspenzí 3 μm a 0,06 μm.

Leptání se uskutečnilo třemi způsoby:

- elektrolytickým s 65% kyselinou dusičnou, napětím 5 V, dobou leptání 15 s doplněné 10% nitalem; elektrolyt naleptal austenitický materiál a svarový kov, roztok 10% nitalu feriticko-perlitický materiál,
- chemickým ve složení HCl:65% HNO₃:H₂O₂ v poměrech 3:1:1 pro zobrazení makrostruktury (Lučavka královská s podporou oxidačního činidla),
- chemickým ve složení HCl:CuCl₂:C₂H₅OH v poměru 100:5:100 pro zobrazení δ feritu dle ASTM E340-15

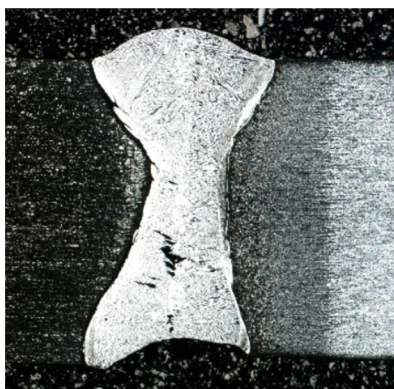
Po úspěšném naleptání základních materiálů i svarového kovu byly struktury pozorovány optickým mikroskopem KEYENCE VHX-6000.

Následuje stručný popis výsledků jednotlivých svařovaných skupin vzorků:

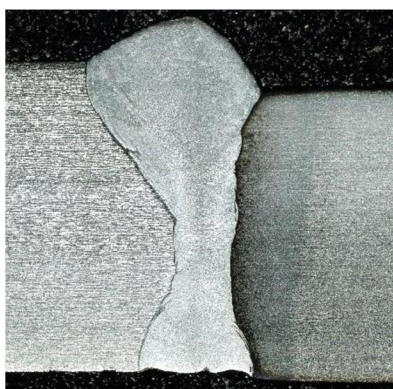
A. Bez přídavného materiálu

A.1) P = 2000 W, v = 20 mm · s⁻¹, ochranný plyn Ar 4.6, přímé vedení svazku; vzorky č. 2, 3, 4 (obr. 51, 52, 53)

Vzorky se vyznačují úzkým svarem s hubeným kořenem a nízkou pórovitostí. TOO na straně FP materiálu byla naměřena cca 1 mm, na straně A cca 0,4 mm. Velká interkrytalická solidifikační trhlina vedoucí v centrální lince svaru u vz. č. 2.



Obr. 51 Vz. 2A; 100×



Obr. 52 Vz. 3A; 100×



Obr. 53 Vz. 4A; 100×

A.2) P = 1800 W, v = 10 mm · s⁻¹, ochranný plyn Ar 4.6, přímé vedení svazku; vzorky č. 5, 6, 7 (obr. 54, 55, 56)

Svary formovány do tvaru „přesýpacích hodin“ – úzká středová část, rozšíření především na vnějším povrchu. Jednotlivé póry do velikosti 1 mm, neprůvary, v kořenové oblasti velké krystalizační trhliny. Větší tepelný příkon rozšiřuje TOO; na straně FP materiálu byla ve střední části naměřena šířka až 2,5 mm, na straně A cca 0,8 mm.



Obr. 54 Vz. 5A; 100×



Obr. 55 Vz. 6A; 100×

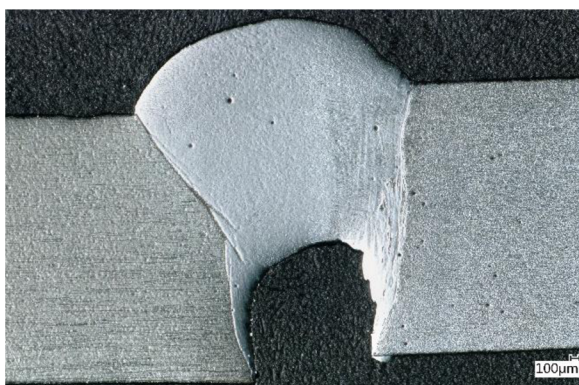


Obr. 56 Vz. 7B; 100×

A.3) $P = 2000 \text{ W}$, $v = 15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, kružnice $\varnothing 2 \text{ mm}$, $f = 100 \text{ Hz}$, ochranný plyn Ar 4.6, wobbling; vzorky č. 10, 11, 12 (obr. 57, 58, 59), č. 26 (obr. 60)

Svary celkově širší rovnoměrně na tloušťku svařenců, mírné rozšíření na vnějším povrchu. Výrazně hubený kořen konvexního tvaru, v oblasti zakončení laserového paprsku se objevuje koncová kráterová staženina. Póry se začínají shlukovat, jsou drobné. Podélné trhliny se šíří centrální linií svaru. TOO se na straně FP materiálu pohybuje do 1,1 mm, na straně A cca 0,4 mm.

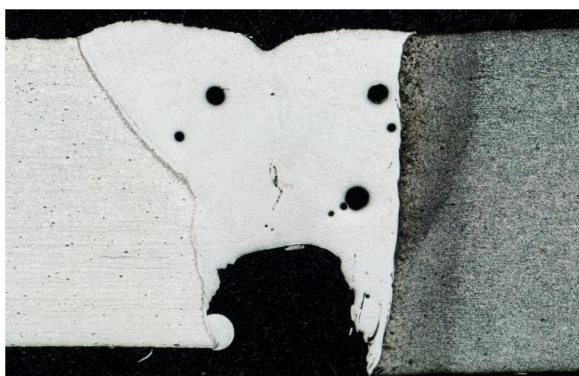
Vzorek č. 26 byl svařen kvůli opakování tahových zkoušek. Rozdílným parametrem bylo pouze množství ochranného plynu – snížení o $4 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$. Pórovitost minimální, neprovařený kořen, příčná trhlina v horní oblasti svaru.



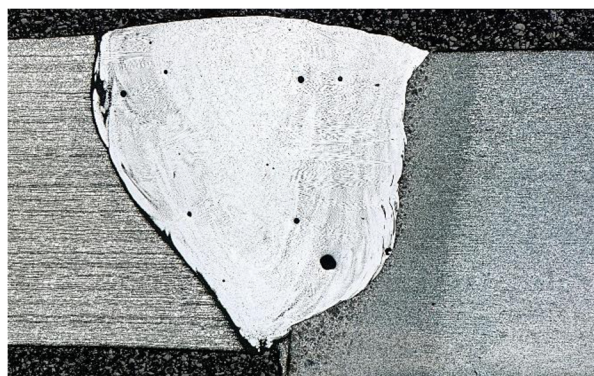
Obr. 57 Vz. 10B; 100×



Obr. 58 Vz. 11B; 100×



Obr. 59 Vz. 12B; 100×



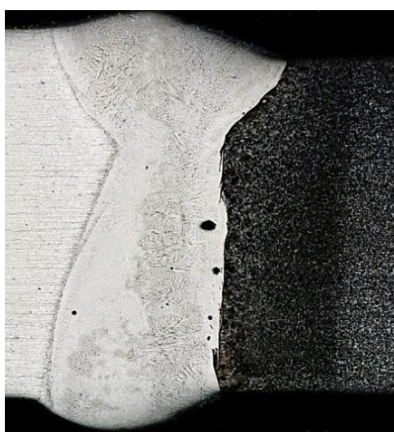
Obr. 60 Vz. 26B; 100×

A.4) $P = 1600 \div 1800 \text{ W}$ (vz. č. 14÷16), $v = 15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, ochranný plyn Ar 4.6, formovací plyn He 4.6 (u vz. č. 14, č. 15), přímé vedení svazku (obr. 61, 62, 63)

Vzorek č. 14 s nedostatečným průvarem, ostatní (svařené vyššími výkony) již provařeny. Velké póry po celém obvodu svaru. TOO o velikosti cca 1 mm ze strany FP, 0,5 mm ze strany A. Podélné i příčné trhliny ve svarovém kovu u všech vzorků.



Obr. 61 Vz. 14A; 100×



Obr. 62 Vz. 15B; 100×

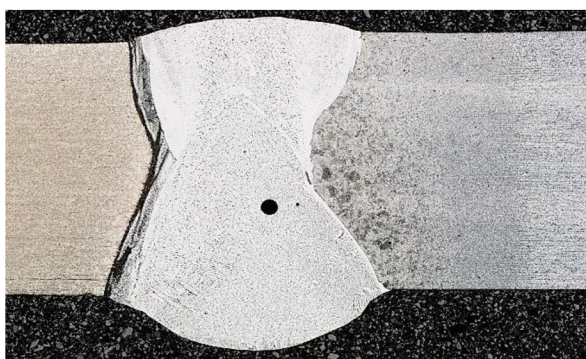


Obr. 63 Vz. 16A; 100×

B. S přídavným materiálem

B.1) $P = 1800 \text{ W}$, $v = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, Sv-07 $\varnothing 1,2 \text{ mm}$, ochranný plyn Ar 4.6, přímé vedení svazku; vzorky č. 17, 18 (obr. 64, 65)

Svary formovány do tvaru „přesýpacích hodin“, stejně jako u vzorků č. 5, 6, 7 svařovaných bez přídavného materiálu stejnými parametry s mírným snížením množství ochranného plynu, pouze středová část byla širší. V kořenové oblasti se objevuje ne tak výrazná krystalizační trhlina, TOO odpovídá parametrům (na straně FP 2,5 mm, A 0,7 mm), nejvyšší pórovitost ze všech svařených vzorků (projevilo se i nevyhovující zkouškou tahem při 350 °C).



Obr. 64 Vz. 17B; 100×



Obr. 65 Vz. 18B; 100×

B.2) $P = 2000 \text{ W}$, $v = 20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, Ni 99,6 mm $\varnothing 5,05 \text{ mm}$, ochranný plyn Ar 4.6, přímé vedení svazku; vzorky č. 19, 20 (obr. 66, 67)

Po obou stranách niklového kroužku svary nejsou provařeny; vizuální prohlídka potvrdila přenos energie laserového paprsku do převýšení Ni kroužku. Svary jsou úzké, malá TOO (na straně FP 0,8 mm, A 0,2 mm), téměř bez pórovitosti.



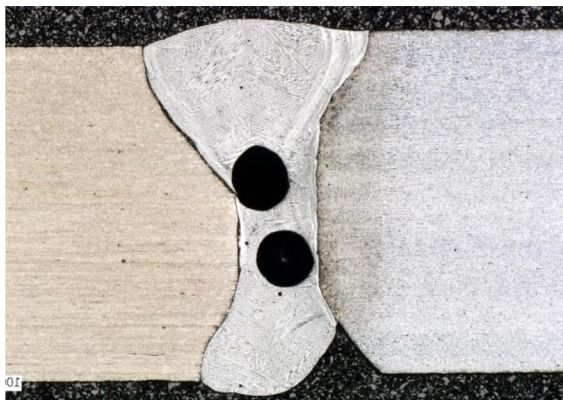
Obr. 66 Vz. 19B; 100×



Obr. 67 Vz. 20B; 100×

B.3) $P = 2000 \text{ W}$, $v = 20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (vz. č. 21; obr. 68), $P = 1800 \text{ W}$, $v = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ (vz. č. 22; obr. 69), Ni 99,6 mm tl. 0,2 mm, ochranný plyn Ar 4.6, přímé vedení svazku

Vzorek 21 má neprovařený kořen a drobnější póry téměř po celém obvodu. S vyšším tepelným příkonem došlo sice k provaření kořene (vz. č. 22), ale i ke zvýšení pórovitosti, vzniku kráterové trhliny a trhlinám ve svarovém kovu. TOO odpovídá svařovacím parametrům.



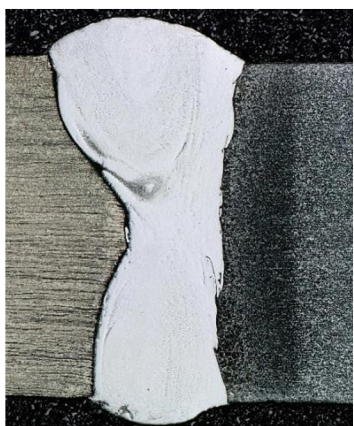
Obr. 68 Vz. 21A; 100×



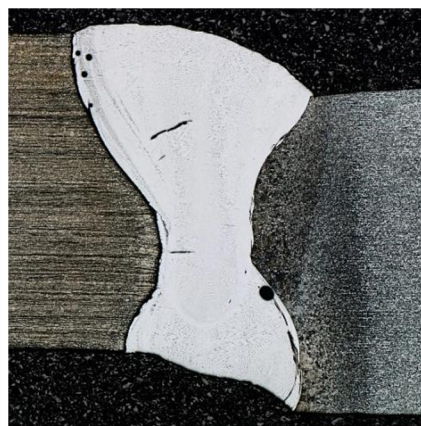
Obr. 69 Vz. 22A; 100×

B.4) $P = 2000 \text{ W}$ (vz. č. 23), $P = 2200 \text{ W}$ (vz. č. 24), $P = 2400 \text{ W}$ (vz. č. 25),
 $v = 20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, Sv-07 Ø 1,0 mm podávaný $w = 13 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, ochranný a formovací plyn N_2 5.0, přímé vedení svazku (obr. 70, 71, 72)

U všech vzorků došlo k provaření kořene, svary jsou úzké s TOO přibližně 1,0 mm na FP a 0,2 mm na A straně. Pórovitost se téměř nevyskytovala. Nevyhovujícími se staly z důvodu výskytu příčných trhlin ve svarovém kovu.



Obr. 70 Vz. 23A; 100×



Obr. 71 Vz. 24A; 100×



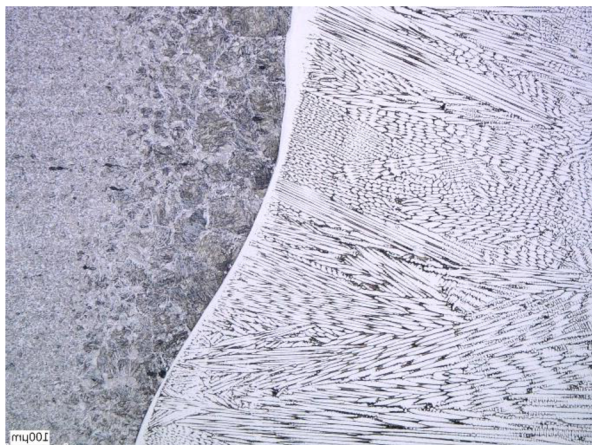
Obr. 72 Vz. 25A; 100×

Na vzorcích jsou zřetelné nedokonalosti při zobrazování mikrostruktury leptáním. Leptání heterogenního spoje typu A – FP skrývá úskalí v podobě Cr_2O_3 , který pokrývá austenitický materiál. Je třeba použít speciálních leptadel, které se téměř vzorek od vzorku chovaly rozdílným způsobem.

Laserové svařování se vyznačuje vysokou rychlostí svařování a následně vysokou rychlostí ochlazování. Čím rychleji k ochlazování dochází, tím snadněji dochází k nukleaci, tuhnutí trvá kratší dobu a velikost dendritů nebo cell se zmenšuje. Vytváří se jemnější dendritická nebo celulární mikrostruktura.

Největší teplotní gradient se objevuje na okraji svarové housenky na styku se základním materiálem. V této oblasti vzniká planární, nedendritická zóna. Nejvíce byla patrná na rozhraní

FP – SK, viz obr. 73, ale i SK – A, viz obr. 74. Na straně austenitu nebývá tolik výrazná, nebo nevzniká; austenit má menší teplotnou vodivost a teplotní gradient je nižší než na feriticko-perlitické straně.



Obr. 73 Vz. 21B rozhraní FP – SK; 300×

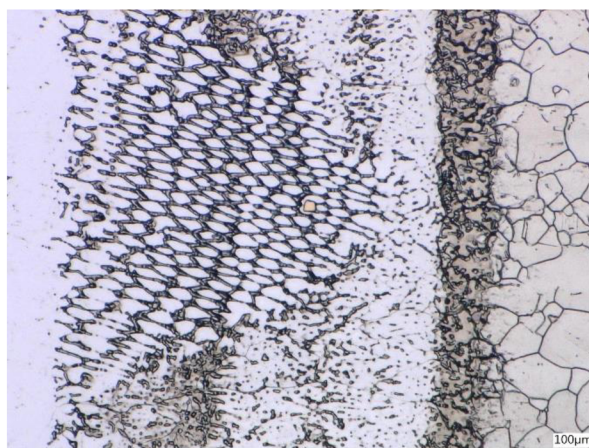


Obr. 74 Vz. 21A rozhraní SK – A; 300×

V blízkosti hranice ztavení dochází k epitaxiálnímu růstu; zrna ve svarovém kovu navazují na zrna základního materiálu, mají hrubší strukturu. Na obr. 75 viditelný růst z austenitického zrna, transformace z planární na celulární strukturu. Obr. 76 zachycuje detail celulárního růstu.



Obr. 75 Vz. 4A epitaxiální růst; 1000×



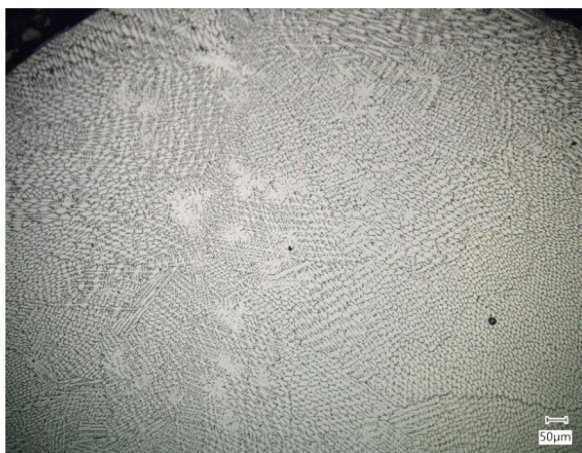
Obr. 76 Vz. 17A celulární růst; 1000×

Směrem do středu svaru roste koncentrační přechlazení a klesá teplotní gradient. Tuhnutí přechází do formy sloupcovitých dendritů. V blízkosti osy svaru dendrity nukleují a rostou rovnoměrně a sloupcovité dendrity blokují. Centrální linka svaru tuhne jako poslední. Na obr. 75 jsou zachyceny i dlouhoosé kolumnární dendrity; nedošlo k bočnímu větvení.

Rychlost ochlazování vzrůstá v závislosti na zvyšující se rychlosti svařování. Jemnější celulární strukturu zachycuje obr. 77a 78. Vzorek byl svařen při 2000 W rychlostí 20 mm·s⁻¹ bez přídavného materiálu. Obr. 77 zobrazuje střed krycí vrstvy svaru, obr. 78 rozhraní s austenitem. Parametry svaru na obr. 80 (FP – SK) a 81 (SK – A) byly 1800 W a 10 mm·s⁻¹ také bez přídavného materiálu. Zrna jsou větší, směrem k ose svaru se tvoří dendrity.

Na obr. 78 a 80 lze srovnat i vliv teplotního příkonu na austenitické zrno. Vnesený příkon při svařování spoje na obr. 78 je o 45 % menší, než při svařování vzorku na obr. 80; zde je patrné zhrubnutí zrna v TOO. Na straně FP materiálu se vyskytuje Widmannstättenova

struktura tvořena deskami feritu, mezi nimiž jsou uložena zrna perlitu. Její velikost roste s tepelným příkonem.



Obr. 77 Vz. 3A střed SK (krycí); 200×



Obr. 78 Vz. 3A SK-A (krycí); 200×



Obr. 79 Vz. 5A FP-SK (krycí); 200×



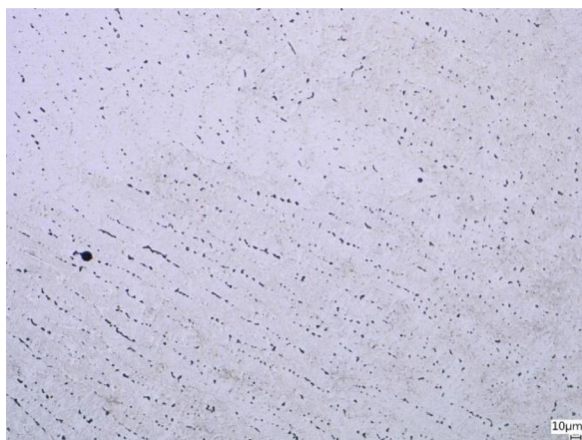
Obr. 80 Vz. 5A SK-A (krycí); 200×

Vzorky byly leptány speciálním leptadlem dle kvůli zjištění obsahu δ feritu. Ten se ve svarovém kovu nacházel pouze u vzorků s přidávným materiálem Sv-07. U vzorků č. 17 a č. 18, a č. 23÷25 se objevily drobné útvary δ feritu v mezidendritických prostorech kořenové i krycí vrstvy. U vzorků č. 17 a č. 18 byl Sv-07 přistehován ručně k základnímu materiálu. Jeho podíl ve svarovém kovu byl vypočítán 32 % oproti automatizovanému přidávání s 15 % (vzorky č. 23÷25). Další vliv na snížení δ feritu mohlo mít i použití dusíku jako ochranného plynu. Podle studií měl přidávaný dusík do ochranného plynu tvořeného argonem, redukovat obsah feritu ve svaru. Srovnání výsledného obsahu nabízí obr. 81 a 82.

Na hranici ztavení austenitického materiálu a svarového kovu se objevuje eutektikum, které vzniká promísením svařovaných materiálů. Pokud by byl doplněn přidávaný materiál, jeho legury se v této oblasti neroztaví a nedojde k jejich promíchání. „Nepromíšená zóna“ se vyskytuje u všech svařených vzorků. Oproti svarovému kovu se vyznačuje nižší tvrdostí srovnatelnou se základním materiálem. Zobrazení zóny po elektrolytickém leptání se nachází na obr. 83, po leptání leptadlem na zobrazení δ feritu na obr. 84, lučavkou královskou na obr. 85 a 86. Eutektikum je tvořeno δ feritem. Elektrolyticky (silnějším leptadlem) došlo k zobrazení dalších složek, proto je oblast výraznější.

Základní austenitický materiál byl dodán po rozpouštěcím žhání při 1110 °C, chlazený ve vodě, bez podílu feritu (výpočet FN = 1,15). δ ferit se vytvořil díky vysoké ochlazovací rychlosti.

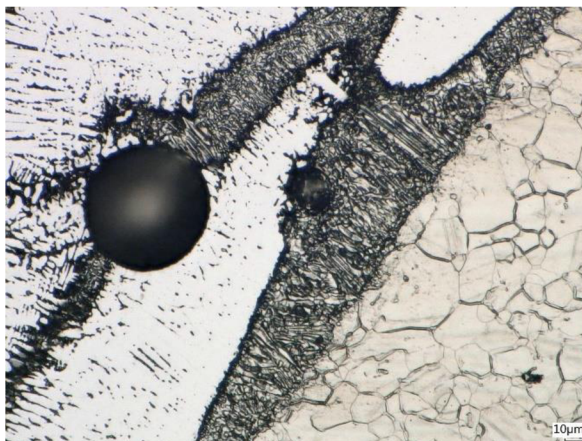
δ ferit je do určitého množství žádoucí; zvyšuje odolnost vůči praskavosti za tepla. Rozhraní SK – A by mělo být vůči těmto trhlinám více odolné.



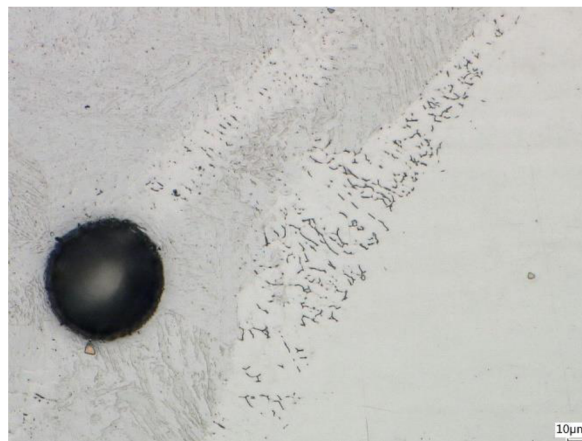
Obr. 81 Vz. 18A SK; δ ferit kořen; 500×



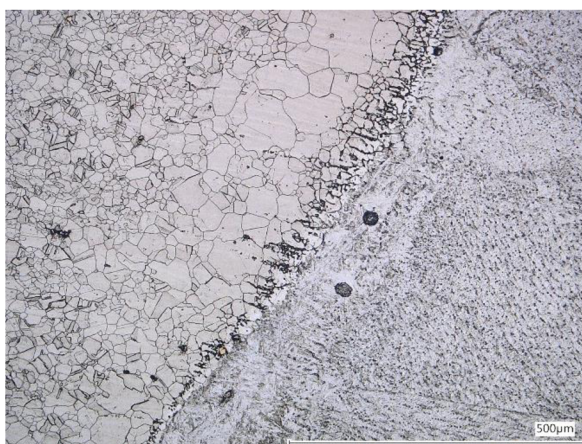
Obr. 82 Vz. 23B SK; δ ferit kořen; 500×



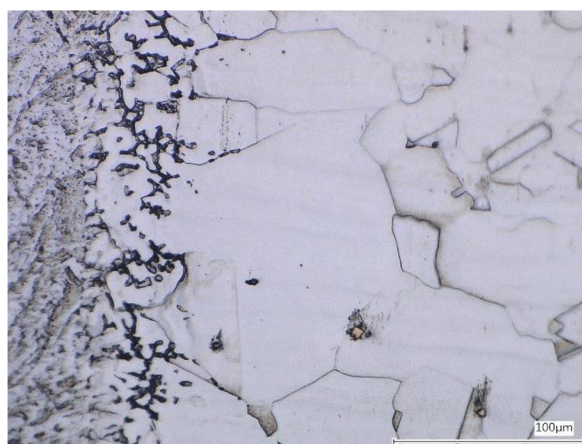
Obr. 83 Vz. 26A SK – A; elektrolyt.; 1000×



Obr. 84 Vz. 26A SK – A; δ ferit; 1000×



Obrázek 85 Vz. 6A SK - A; lučavka; 300x



Obr. 86 Vz. 6A SK - A; lučavka; 1000x

4.5.4 Rastrovací (skenovací) elektronová mikroskopie (SEM) [113, 123, 124]

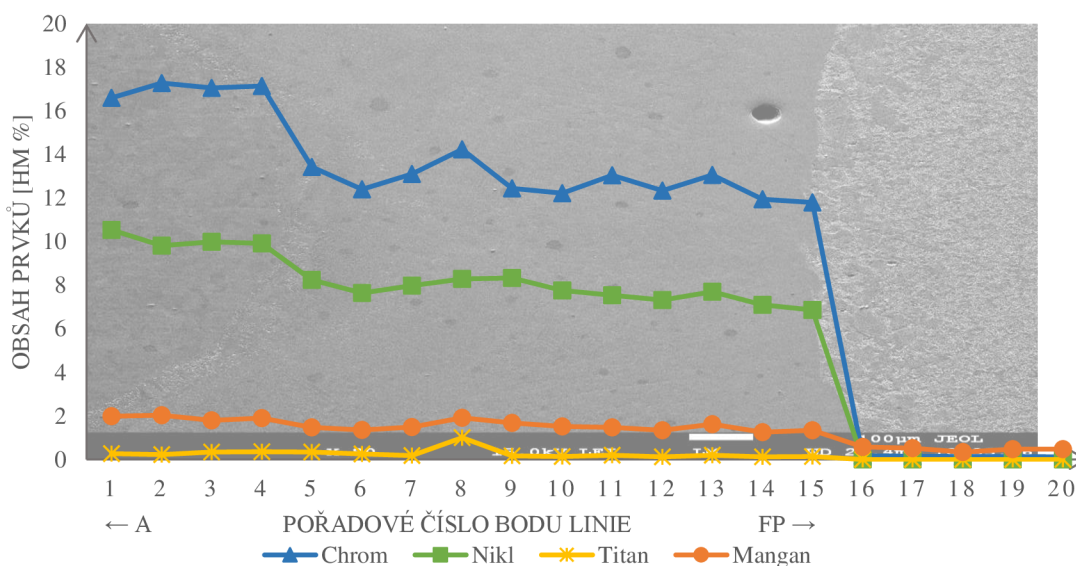
Rastrovací (skenovací) elektronová mikroskopie (SEM) pracuje s úzkým elektronovým paprskem. Při interakci urychlených elektronů se vzorkem se k vytváření obrazu používají zpětně odražené primární elektrony uvolněné ze vzorku a sekundární elektrony emitované z jeho slabé povrchové vrstvy.

Liniová analýza vytypovaných prvků byla provedena na rastrovacím mikroskopu JEOL JSM 7600F za pomoci energiově disperzního spektrometru EDX X-Max 50 mm². Detektor zachytí RTG záření (fotony), které vzniká při bombardování vzorku primárními elektrony. Výstupem je spektrum četnosti rentgenového signálu v jednotlivém energetickém okně odpovídající konkrétním prvkům; výška píku je úměrná koncentraci daného prvku ve vzorku.

Analýze byly podrobeny vzorky č. 3, 5, 12, 14 bez přídavného materiálu a 18, 19, 21, 23 s přídavným drátem Sv-07 nebo bariérou z Ni99,6.

Graf č. 1 zobrazuje přerozdělení prvků Cr, Ni, Ti a Mn během procesu svařování vzorku č. 3. Vzorek je zástupcem parametrů výkonu 2000 W a 20 mm·s⁻¹ bez aplikace přídavného materiálu. Na hranici ztavení došlo k poklesu chromu a niklu oproti základnímu austenitickému materiálu o 22 %. Jejich obsah přes svarový kov postupně klesal až dosáhl nulové hodnoty v základním feriticko-perlitickém materiálu. Obsah titanu se snížil po cca 240 μm na polovinu a tuto hodnotu si udržoval až na rozhraní s FP materiálem. Obsah manganu ve svarovém kovu byl přibližně stejný jako v základním A materiálu.

VZOREK Č. 3



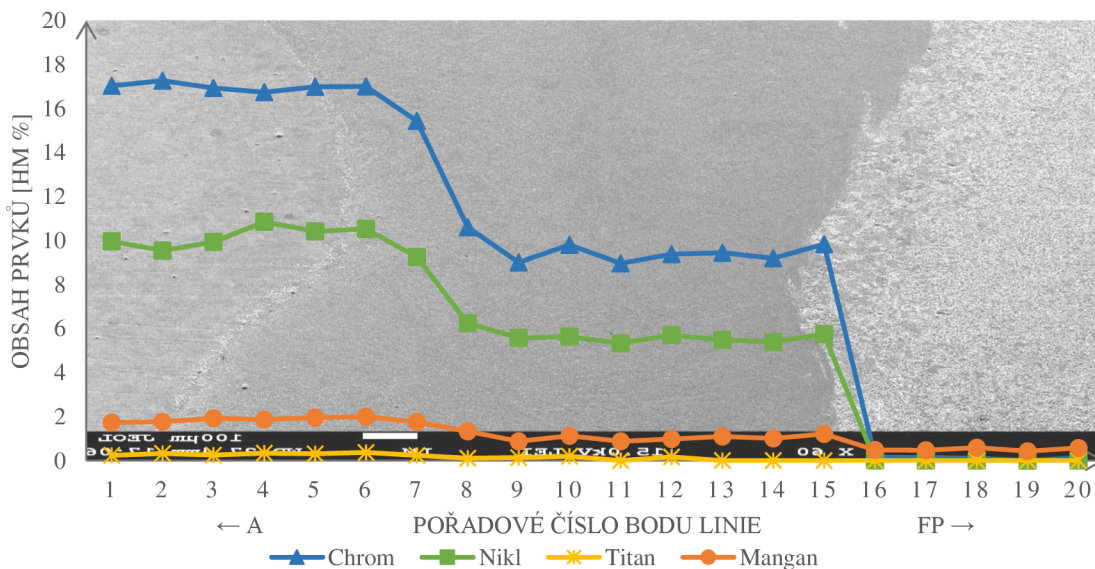
Graf 1 Liniová analýza obsahu vybraných prvků vz. č. 3

Redistribuce prvků se prakticky nelišila ve srovnání se vzorkem č. 14 s parametry 1600 W, 15 mm·s⁻¹. Pouze chrom se pohyboval ve svarovém kovu přibližně o 1 hm. % výše. Nebyl pozorován vliv nižších svařovacích parametrů u vz. č. 5 (1800 W, 10 mm·s⁻¹), ani použití rozmítání svazku u vz. č. 12 na přerozdělení prvků.

Graf 2 se věnuje vzorku č. 23, do kterého byl během svařování automaticky přidáván PM Sv-07. Svarový kov Sv-07 má podle PN AE G mít min. 22,8 hm. % Cr, min. 11,8 hm. % Ni a min. 0,9 hm. % Mn. Podle provedené liniové analýzy je pokles prvků v první fázi pozvolnější, ale přibližně v polovině svaru se chrom dostane na úroveň okolo 9 hm. %, což odpovídá snížení 43 % oproti základnímu A materiálu, nikl se sníží na cca 5 hm. %, tedy o 47 %. Titan svou hodnotu obsahu ve SK dostal na úroveň 0,0 hm. % cca 300 μm před rozhraním SK a FP materiálu. U vzorku č. 18 (PM Sv-07 přistehován TIGem) byly hodnoty obsahu chromu, niklu

a manganu srovnatelné se svařováním bez přídavného materiálu; titan se ve svarovém kovu prakticky nevyskytoval.

VZOREK Č. 23

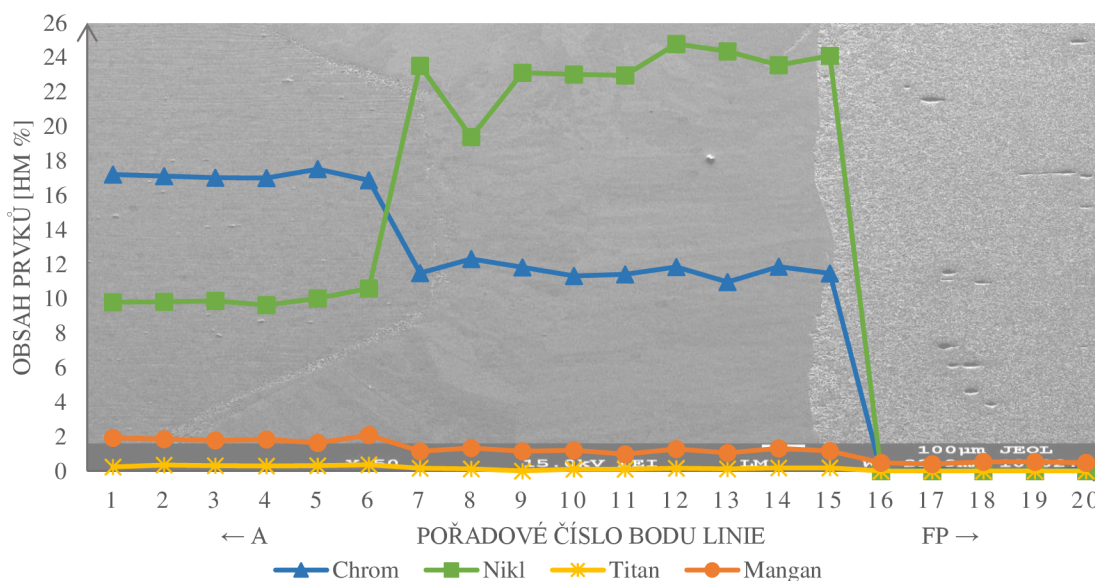


Graf 2 Liniová analýza obsahu vybraných prvků vz. č. 23

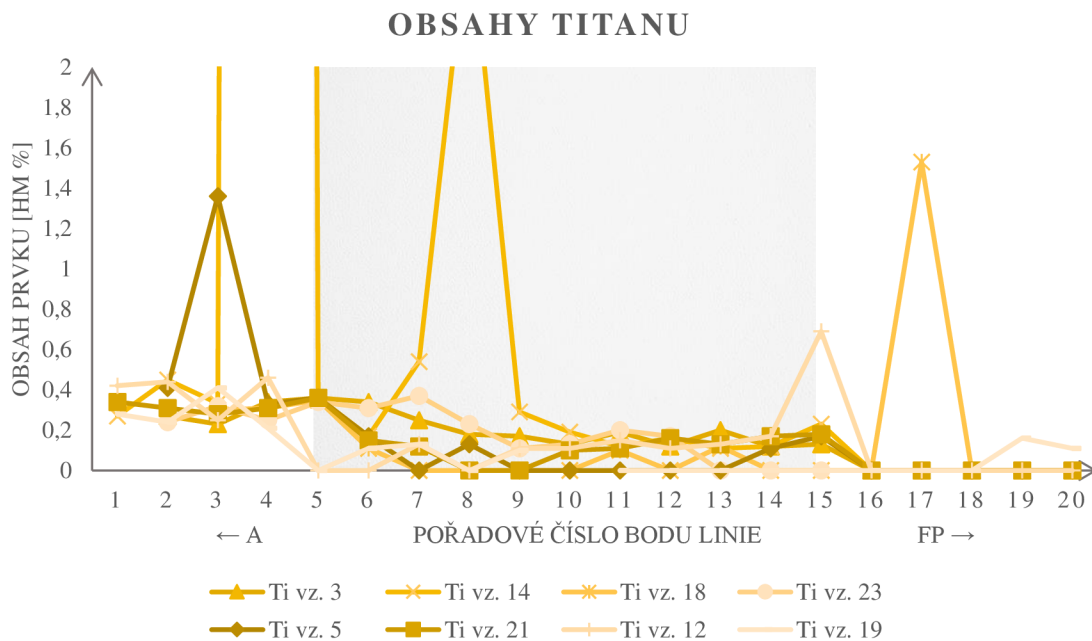
Byly svařeny čtyři vzorky s vloženou difúzní bariérou ve formě Ni99,6. Mezi základní materiály vzorků č. 19 a č. 20 byl vložen Ni kroužek Ø 5,05 mm. EDX analýza vz. č. 19 ukázala nárůst niklu na 60 hm. % a pokles chromu na cca 6 hm. % na rozhraní A – SK. Na rozhraní SK – FP materiál nikl vystoupal na 31 hm. % a chrom nebyl detekován. U vz. č. 21 a č. 22 byl vložen nikl tl. 0,2 mm. Na grafu 3 u vzorku č. 21 je zobrazen nárůst niklu na úroveň přibližně 24 hm. %; hodnota se průběhem přes svarový kov neměnila. Obsah chromu ve svarovém kovu poklesne o cca 5 hm. % (na 11,5 hm. %) oproti základnímu A materiálu.

Bez vlivu na titan či mangan.

VZOREK Č. 21

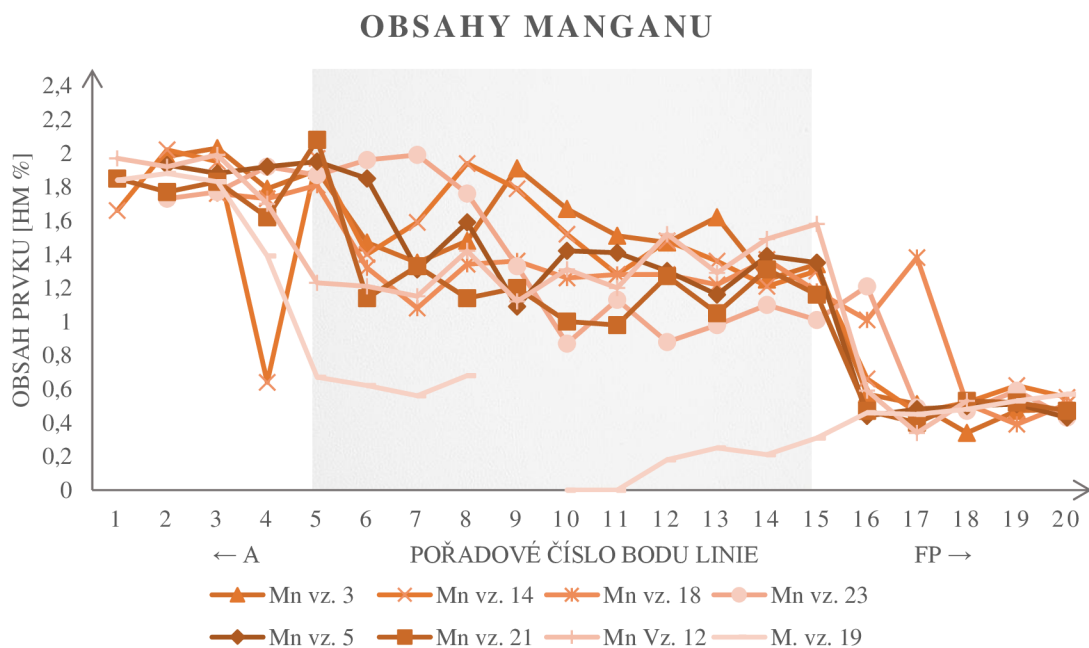


Graf 3 Liniová analýza obsahu vybraných prvků vz. č. 21



Graf 6 Liniová analýza obsahu titanu

V bodě 4 se u vzorku č. 14 dostal pík v obsahu titanu až na hodnotu 60,95 hm. %. Tato anomálie vedla ke snížení obsahů všech měřených prvků a byla pravděpodobně způsobena umístěním bodu měření do TiC(N).

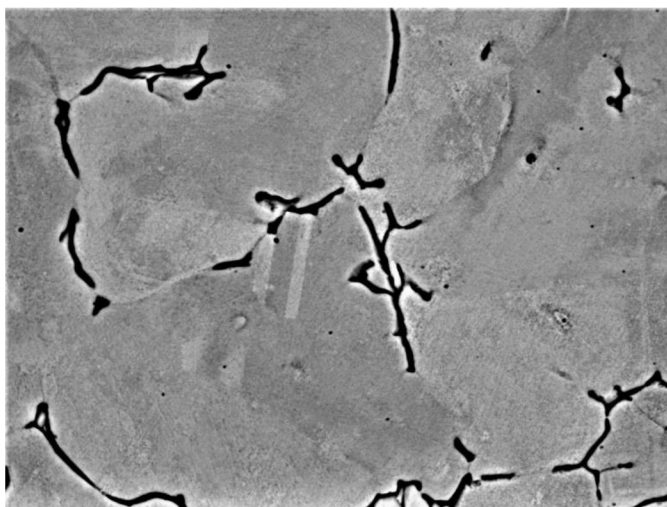


Graf 7 Liniová analýza obsahu manganu

Analýza prvků byla provedena i na hranici ztavení austenit – svarový kov, kde byl optickou mikroskopií v kombinaci s vhodnými leptadly identifikován δ ferit.

Obsah chromu byl zvýšený a obsah niklu snížený oproti základnímu A materiálu bez rozdílu, zda přídatný materiál byl nebo nebyl použit. Mírná souvislost se dala pozorovat ve vztahu chromu a tepelného příkonu. Nižší tepelný příkon znamenal vyšší obsah chromu (až o 5 hm. % oproti ZM). Obsah niklu snížen o cca 4 hm. %. Poměrová kombinace prvků naznačuje feritickou strukturu.

Na obr. 87 zachyceny ostrůvky feritu na hranicích zrn, leptáno leptadlem na δ ferit.



Obr. 87 Vz. 3 – δ ferit; 3000 \times

Výsledky analýz, které se staly podkladem k této podkapitole, jsou součástí práce jako příloha 08.

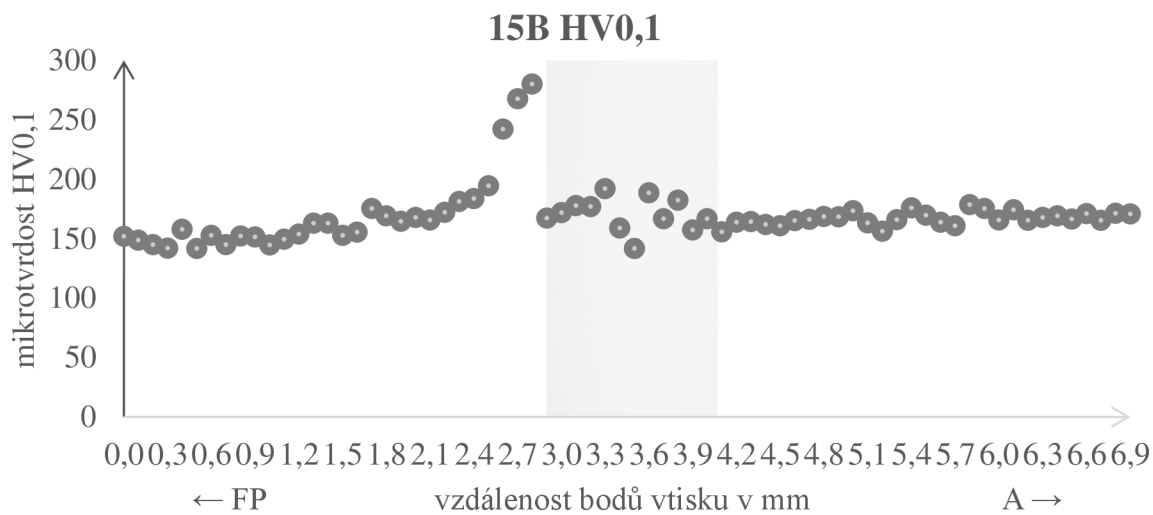
4.5.5 Mikrotvrdość [59, 86, 113, 125 až 127]

Mikrotvrdość se používá pro měření jednotlivých strukturních složek. Měření HV_{0,1} dle Vickerse (ČSN EN ISO 6507-1 a ISO 22826) proběhlo za pomoci tvrdoměru Wilson VH3100 uprostřed svařence přes rozhraní ZM – TOO – SK – TOO – ZM. Sedmdesát (sto u vzorků č. 19 a č. 20) vtisků je od sebe vzdáleno 0,1 mm, zatěžovací síla o velikosti 0,98 N působila 10 s.

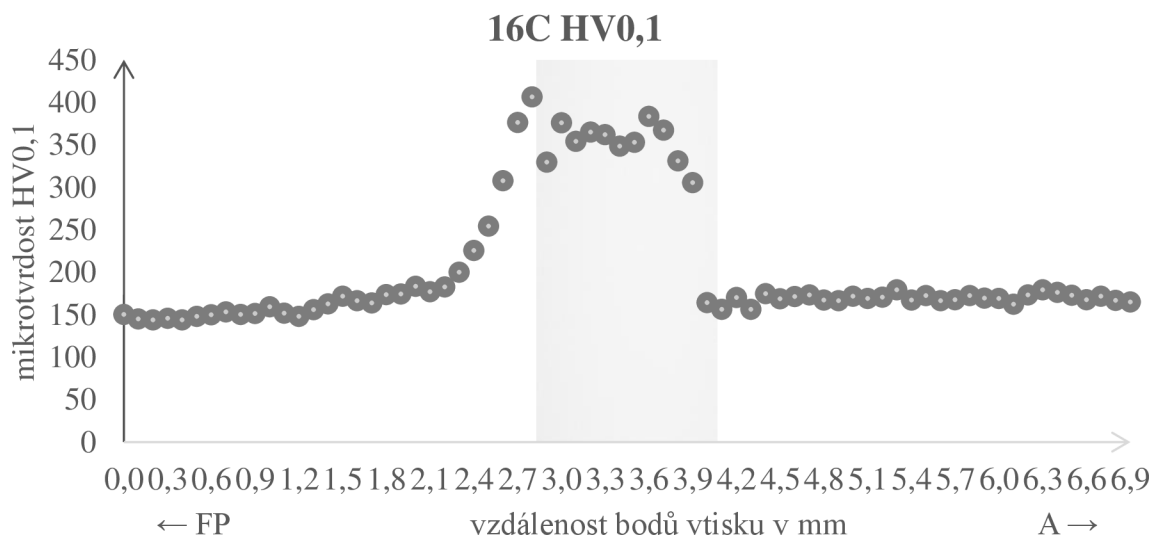
Kritická hodnota úspěšnosti zkoušky byla uvažována 380 HV v souladu s ČSN EN ISO 15614-1. Kritériu vyhověly vzorky č. 5 a č. 8 svařované přímým svazkem bez přídavného materiálu (ostatní vzorky se stejnými parametry nevyhověly). Dále č. 14 a č. 15 také bez přídavného materiálu, ale s použitím helia jako formovací plynu; vzorek č. 16 ze srovnatelné sady svařovaný bez použití formovacího plynu nevyhověl.

Grafy 01 a 02 zobrazují záznam zkoušky mikrotvrdości u vz. č. 15 a 16. Vzorek č. 16 představuje typického zástupce nevyhovující zkoušky; maximum v oblasti svarového kovu o hodnotě pohybující se okolo 400 HV_{0,1}. Vzorky s přídavným drátem Sv-07 ručně nastehovaným, s vloženým niklovým kroužkem a niklovou fólií vyhověly všechny (č. 17÷22). Automatizovaně přidávaný Sv-07 ke snížení tvrdosti nepřispěl (vzorky č. 23÷25). U těchto tří vzorků mohl k nevyhovující tvrdosti dopomoci dusík. Dusík se používá jako formovací plyn u austenitických ocelí, ale pokud je taková ocel legovaná titanem, vytváří N₂ a Ti velmi tvrdé nitridy. Svarový kov je o titan navíc ochuzen.

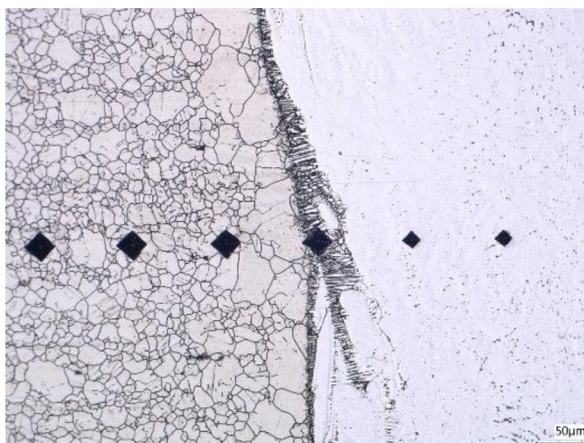
Zkoušení mikrotvrdości potvrdilo vznik odpevněné zóny na hranici ztavení rozhraní svarový kov – austenitická ocel, viz obr. 88. Tato zóna se vyskytovala bez ohledu na použití přídavného materiálu. Rozbory mikrostruktury na optickém a elektronovém mikroskopu bylo zjištěno, že se jedná o ostrůvky δ feritu vyskytující se na hranici ztavení. Na straně SK – feriticko-perlitická ocel planární zóna s nárůstem tvrdosti, viz obr. 89.



Graf 8 Průběh mikrotvrdości u vz. č. 15B



Graf 9 Průběh mikrotvrdości u vz. č. 16C



Obr. 88 Vz. 4B mikrotvrdość; 500×



Obr. 89 Vz. 22B mikrotvrdość;

4 VYHODNOCENÍ [14, 63, 122, 126, 128]

Po samotném svařování byly vzorky podrobeny nedestruktivním a destruktivním kontrolám. Nutno poznamenat, že některé vzorky by neprošly již sítím VT a PT.

Zcela nevhodně se projeví parametry 1800 W a 10 mm·s⁻¹. Vzorky bez přídavného materiálu (č. 5, 6), s přídavným materiálem Sv-07 (č. 17, 18) i v kombinaci s Ni fólií (č. 22) se vyznačovaly velkou kráterovou trhlinou v kořeni viditelnou pouhým okem. Pozorovány byly i mikrotrhliny šířící se rozhraním svarové housenky a základního materiálu, podhousenkové trhliny u zakončení svaru a trhliny šířící se napříč svarovou housenkou. U vzorků s přídavným materiálem navíc vzrostla pórovitost. K natavení drátu Sv-07 došlo i v kořenové oblasti, ale keyhole nemá dostatečnou stabilitu k potlačení pórů. Přídavný materiál se roztavil jako první, keyhole uzavřel a bubliny neměly prostor kudy unikat.

Wobbling, svařování s rozmítáním svazku. Tvarem rozmítací křivky byla kružnice. Její průměr 1 mm vedl při výkonu 2000 W a rychlosti 10 mm·s⁻¹ k nadměrnému přetečení svaru a současnému neprovaření kořene. Zároveň ale k nejnižšímu množství pórů ze vzorků této série. Stejně parametry s průměrem kružnice 2 mm znamenaly hubený kořen, kráterovou trhlinu a velkou pórovitost. Výkon 2000 W, 15 mm·s⁻¹ a průměr 2 mm způsobil neprovařený kořen. Všechny vzorky měly společnou vadu – koncovou kráterovou staženinu. Koncový kráter odhalila VT, jednoznačně indikovala PT i ostatní kontroly. Otázkou je, zda by si s nedostatkem materiálu poradilo „rampování“, pomalé snížení výkonu. U přímého vedení svazku se koncový kráter neobjevil, i když „přejezd“ svazku aplikován nebyl. Přispění wobblingu ke snížení pórovitosti zaznamenáno nebylo. Rychlost 15 mm·s⁻¹ se zdá být stále nedostatečně vysoká pro její eliminaci.

UT-PA a RT společně nacházely vady typu neprůvar, ale UT-PA nezachytila pórovitost. U vz. č. 17 a č. 18 byla UT-PA UT-PA vyhovující, RT byla naopak jasně z důvodu nadměrné pórovitosti svarového kovu. Další rozdílné hodnocení se objevilo u vz. č. 23; na RT vyhověl, ale UT-PA zaznamenala indikaci ve svaru. Pravděpodobně se jednalo o trhliny, které u daného vzorku byly objeveny během destruktivních kontrol. Metoda UT-PA není vhodná k odhalení vad typu pór, ale může lépe odhalit trhliny než RT. Vhodná je kombinace obou metod.

Místem porušení příčných tahových zkoušek za pokojové i zvýšené teploty se staly převážně základní materiály. Mez pevnosti byla překonána při 20 °C u feriticko-perlitického materiálu, při 350 °C austenitického. Tato skutečnost byla očekávána; ověření vlastností základních materiálů potvrdilo požadavky norem – austenitický materiál má vyšší mez pevnosti než FP za nižších teplot a nižší při 350 °C.

Nevyhovující výsledky přinesly vzorky s vloženou niklovou vrstvou. Za pokojové i zvýšené teploty došlo k porušení ve svaru. Vzorek č. 17 vyhověl na tahovou zkoušku za pokojové, ale ne za zvýšené teploty. Na lomových plochách byly zřetelné velké póry.

Na první pohled lze použité parametry svařování odhadnout podle velikost svaru, která byla srovnávána s pomocí optického mikroskopu. Svary zhotovené vyšším výkonem a rychlostí mají úzký tvar. Se snižující se rychlostí se tvar rozšiřuje a pokud se sníží i výkon, dochází k rozšíření kořenové a krycí části. Vzorek svařený 2000 W, rychlostí 20 mm·s⁻¹ měřil přibližně 1,8 mm v krycí a 1,4 mm v kořenové oblasti, střed 0,7 mm. Při výkonu 1800 W a rychlosti 10 mm·s⁻¹ se tyto rozměry v krycí části téměř zdvojnásobily, v kořenové části se zvýšily o třetinu a střední část se rozšířila pouze o 0,2 mm. Rozdílná byla TOO; se zvyšujícím se příkonem se rozšiřovala a dosáhla až 2,5 mm. V TOO se vyskytovala Widmannstättenova struktura značící hrubé zrno a snížení mechanických vlastností. Vysoké výkony a svařovací rychlosti vedou ve výsledku k nižšímu vnesenému teplu, vyššímu teplotnímu gradientu a jemnější struktuře. Podle Hall-Petchova vztahu zmenšující se velikost zrna vede k vyšší pevnosti. Více zrn = více hranic, které jsou neprůchozí pro dislokace a napětí potřebné k deformaci se zvyšuje.

Při vyšších výkonech a rychlostech byly svary méně pórovité. Všechny svary svařené s výkonem od 2000 W, rychlostí $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ obsahovaly jednotlivé, velmi malé, nebo téměř žádné póry. Při výkonu okolo 1800 W a s rychlostí $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ se póry začaly shlukovat. Na pórovitost má vliv i příliš nízký nebo příliš vysoký průtok plynu. Působení příliš velkého průtoku pravděpodobně přispělo k nadměrným velikostem pórů při rychlosti svařování $15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Argon tvořil ochrannou atmosféru průtokem $22 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ oproti 16, resp. $12 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ u ostatních svařenců. Vliv na pórovitost mohlo mít i neočištěné okolí svarových hran.

Druh ochranného, případně formovacího plynu pórovitost ovlivňuje také. V experimentu byly použity tři druhy plynů – Argon 4.6 jako ochranný plyn, Argon 4.6 jako ochranný plyn v kombinaci s formovacím plynem Helium 4.6 a dusík v čistotě 5.0 jako ochranný i formovací plyn.

Střední svařovací rychlost znamená méně pórů, ale pokud se použije argon na ochranu krycí i kořenové vrstvy, posouvá tato kombinace střední svařovací rychlost na úroveň nízkých, tedy do oblasti vyšší pórovitosti. Tato teorie byla potvrzena zkušenostmi z firmy LaserTherm. Vysoké parametry nad 2000 W a $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ nestačily v kombinaci Argon – Argon zajistit svar bez pórů. Proto přešli na Dusík – Dusík, který přináší více než uspokojivé snížení pórovitosti. Podle výsledků by podobný účinek měl zajistit i sám Argon chránící krycí vrstvu svaru, bez formování kořene.

Použití dusíku jako ochranného plynu sebou nese nevýhodu ve zvýšení tvrdosti svarového kovu. S rostoucí teplotou taveniny vzrůstá rozpustnost dusíku. Je vyšší u γ železa s FCC mřížkou než u α či δ železa s BCC mřížkou. Roste také se zvyšujícím se obsahem chromu a mírně i manganu. U austenitických ocelí stabilizovaných titanem vytváří nitridy a ochuzuje svarový kov o stabilizační prvek. Vysoká mikrotvrdość byla potvrzena zkouškami – maxima 450 HV_{0,1}, 423 HV_{0,1} a 442 HV_{0,1} u vzorků č. 23 až 25. Tyto vzorky navíc byly svařeny s přídavným materiálem, který měl svarový kov posunout do míst příznivějších struktur, tedy ne čistě martenzitické, ale s jistým podílem feritu. Liniová EDX analýza ukázala vyšší propad chromu a niklu ve svarovém kovu oproti ostatním vzorkům. To může ukazovat na vytvoření nitridu chromu a niklu.

Příznivý vliv na tvrdost mělo použití helia jako formovacího plynu. Oba vzorky svařené Argon – Helium měly vyhovující průběh mikrotvrdosti, a to maximum 244 HV_{0,1} a 280 HV_{0,1}. U vzorku svařené stejným průtokem Argonu, na stejném laseru, i když s vyšším výkonem o 100, resp. 200 W, hodnoty mikrotvrdosti vyskočily až na hodnotu 406 HV_{0,1}. V okolí této hodnoty se pohybovaly i ostatní vzorky svařované bez přídavného materiálu.

Argonem chráněné vzorky č. 17 a č. 18 s ručně přistehovaným přídavným materiálem dosáhly maximálních tvrdostí 367 HV_{0,1} a 364 HV_{0,1}. Velikost tvrdosti u vzorků s niklovou difúzní bariérou (č. 19 až 22) vycházela vyšší u niklové fólie než u niklového kroužku. Potvrzuje se tak předpoklad účinnosti difúzní bariéry v závislosti na její tloušťce. Ale i zde nepřesáhla hodnotu 314 HV_{0,1}.

Závislost rychlosti svařování, resp. ochlazování bylo pozorováno na struktuře svaru. Nižší tepelný příkon znamenal vyšší rychlost ochlazování a jemnější, spíše celulární, strukturu. Se vzrůstajícím tepelným příkonem se začalo objevovat větvení dendritů rostoucích proti směru odvodu tepla. Směr růstu odpovídá přednostní krystalografické orientaci.

Na straně FP materiálu se vyskytovala Widmannstättenova struktura. Množství desek (jehlic) rostlo se zvyšujícím se tepelným příkonem. Jeho růst měl i vliv na austenitické zrna, které hrublo. Rozhraní FP a svarového kovu se vyznačovalo planární zónou. Bez dendritická zóna vzniká v místech největšího teplotního gradientu a byla pozorována i na straně SK–A.

Každý z hodnocených vzorků má svůj prvotní záznam, který shrnuje provedené kontroly. Protokoly jsou uloženy jako přílohy 09÷32.

Liniovou EDX analýzou zjištěn pokles chromu i niklu u všech vzorků. Při svařování bez přídavného materiálu a ručně přistehovaného drátu Sv-07 na rozhraní A – SK obsah těchto prvků poklesl o cca 22 %, konstantně přešel přes svarový kov až dosáhl hodnot odpovídajícím základnímu FP materiálu. PM Sv-07 přidáván automatizovaně s ochranou i formovací N₂ atmosférou se dostal na snížení o 43 % u chromu a 47 % u niklu. Možnou příčinou by bylo svařování v čistém dusíku; chrom i nikl vytvořily s dusíkem nitridy.

Analýzou prošly i vzorky č. 19 a č. 21 s vloženým niklovým kroužkem, resp. fólií. Nárůst niklu na 60 hm. % a pokles chromu na cca 6 hm. % na rozhraní A – SK byl zaznamenán u vz. č. 19 s vloženým kroužkem. Na rozhraní SK – FP nikl vystoupal na 31 hm. % a chrom nebyl detekován. U vz. č. 21 nikl dosáhl ve svarovém kovu přibližně 24 hm. %; hodnota zůstala konstantní. Obsah chromu poklesl oproti původnímu A materiálu o pouhých 5 hm. %.

Obsah manganu a titanu bez výrazných změn ve všech případech.

Na hranici ztavení austenitu a svarového kovu se objevuje eutektikum tvořené δ feritem. Že se jedná o δ ferit, bylo potvrzeno použitím speciálního leptadla přímo na tuto fázi a také elektronovou mikroskopií. EDX analýza potvrdila zvýšený obsah chromu a snížený obsah niklu; kombinace ukazuje na feritickou strukturu. δ ferit do určitého množství žádoucí. Jeho přítomnost zvyšuje odolnost vůči praskavosti za tepla. Síra má větší rozpustnost v δ feritu než v austenitu.

5 ZÁVĚRY

Práce se zabývala laserovým svařováním potrubí dvou základních materiálů – feriticko-perlitické oceli s austenitickou. Metodou 521 bylo svařeno 25 vzorků a 24 z nich podrobena nedestruktivním a destruktivním kontrolám.

Zcela nevyhovujícími se staly vzorky svařované příkonem 1800 W a $10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ s přímým vedením svazku. V oblasti kořene se objevovala velká kráterová trhlinka. Byly zjištěny trhliny šířící se podél svarové housenky i příčně přes ni. Použití wobblingu znamenalo ve všech případech koncovou kráterovou staženinu a neprůvar.

Výkony pod 2000 W způsobovaly vyšší pórovitost; největší póry byly zjištěny u výkonů 1600÷1800 W při rychlosti svařování $15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Nejmenší výskyt pórů byl u vzorků svařovaných v atmosféře čistého dusíku; výkon 2000÷2400 W, svařovací rychlost $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$.

Nedostatečný průvar u wobblingu nezpůsobil nevyhovující tahovou zkoušku. Nadměrná pórovitost u vzorků s přídavným materiálem (ručně přistehovaným) však ano. Mez pevnosti u tahové zkoušky za pokojové teploty byla překročena u FP materiálu, ale místem porušení během zkoušky za zvýšené teploty již byl svarový kov.

K nárůstu tvrdosti v TOO a svarovém kovu došlo téměř u všech vzorků. Výjimkou se staly svařence s vloženým niklovým kroužkem. U většiny vzorků nárůst překročil povolenou mez. Vysokých hodnot dosahovaly vzorky s přídavným materiálem chráněné během svařování dusíkem. Vyhovujících tvrdostí dosáhly svary vyhotovené v ochranné atmosféře argonu s formováním kořene heliem.

Na redistribuci vybraných prvků (Ti, Ni, Cr, Mn) neměl výrazný vliv výkon, ani svařovací rychlost. EDX analýza nepotvrdila ztelnější promíšení při použití rozmítání laserového svazku. Ke snížení chromu a niklu napříč svarovým kovem docházelo přibližně stejně i v případě ručně přistehovaného přídavného materiálu. Obsah chromu se pohyboval okolo hranice 12 hm. %. Rozdíl byl zaznamenán u vzorku svařového v atmosféře N_2 s automatizovaně podávaným PM. Dusík plnil ochranu krycí i kořenové části svaru a pravděpodobně způsobil navázání chromu i niklu. Propad prvků byl cca 43 hm. % u chromu a 47 hm. % u niklu.

Na hranici ztavení austenitu a svarového kovu se objevuje eutektikum tvořené δ feritem, které by mělo zvýšit odolnost spoje vůči horkým trhlinám.

Pro další svařování se jeví jako nejvhodnější začít s použitím kombinace Argon (ochrana krycí oblasti svaru) – Helium (ochrana kořenové oblasti svaru) s parametry 2000 W a $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$. Helium by kromě pozitivního vlivu na tvrdost, mělo se svou vysokou tepelnou vodivostí pomoci odstranit problémy s případným nedostatečným provařením kořene a umožnilo zvýšit svařovací rychlost. Niklový kroužek by mohl pomoci vytvořit svar s vyhovujícími vlastnostmi, i když díky vrubovému účinku neprovařeného kořene nevyhověl tahovým zkouškám.

Diplomová práce definovala možnosti, kterými se ubírat v dalším výzkumu svařování heterogenních svarů potrubí v jaderných elektrárnách. Ve výsledku se staly všechny vzorky nevyhovujícími, ale množství získaných informací by snad mohlo posunout problematiku o malý krůček dál.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [129]

1. CHARVÁTOVÁ, Eliška. Automatizace procesu svařování HSS v prostředí JE. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117313>.
2. Svařovací roboti v jaderné energetice [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://allforpower.cz/jaderna-energetika/svarovaci-roboti-v-jaderno-energetice-348>
3. Optimizing the CO2 laser welding process for dissimilar materials [online]. [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0143816613000559?token=05830C3F52F4665C0B9AF3E269E075C61AD2CEE86564D4A0C9A84E60F4AB1EDF89D6C9B65942D0780174A5239FB0A07D>
4. Technologie využívající laser [online]. [cit. 2021-05-21]. Dostupné z: https://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_svarovani_laserem_2013_mrna.pdf
5. DVOŘÁK, Milan a kolektiv. *Technologie II*. 2. vydání. CERM Brno, 7/2004. 238 s. ISBN 80-22-1425-9.
6. STEEN, William M. *Laser Material Processing*. 2 ed. London: Springer, 1998, 346 s. ISBN 3-540-76174-8.
7. MAJUMDAR, Dutta J. and I. MANNA. *Laser processing of materials*. Sadhana Vol. 28, Parts 3 & 4, June/August 2003, pp. 495–562.
8. SALEH, Bahaa E. A., Malvin Carl TEICH a Jiří FIALA. *Základy fotoniky = fundamentals of photonics*. svazek 2. Praha: Matfyzpress, 1994, xxii, 436 stran: černobílé ilustrace. ISBN 80-85863-02-2.
9. ŠEBESTOVÁ, Hana. *Vybrané aspekty laserového svařování*, Olomouc, 2012, 159 stran. Dostupné také z: https://theses.cz/id/98ehx6/disertace_sebestova_vybrane_aspekty_laseroveho_svarovani.pdf
10. LAPŠACKÁ, Hana *Laserové technologie v praxi*, Univerzita Palackého v Olomouci, 2010, 17 stran.
11. KUBÍČEK, Jaroslav. *Speciální metody tavného svařování, tlakové svařování*. Syllabus přednášek. Brno, 2006. 69 s.
12. Technologie svařování. [online]. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/technologie_svarovani_5te_etv_etv-k_kubicek.pdf.
13. Kolektiv autorů. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
14. MESSLER, Robert W. *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. New York: John Wiley, 1999, 662 s. ISBN 0-471-25376-6.
15. Základy laserové techniky. [online]. [cit. 2021-03-20]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_zaklady_laserove_techniky_2013_mrna.pdf
16. Možné dělení typů a druhů laserů [online]. [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/mozne-deleni-typu-a-druhu-laseru>.

17. Základy laserové techniky [online]. [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/hsv_specialni_metody_svarovani_zaklady_laserove_techiky_2013_mrna.pdf.
18. Seriál na téma lasery – laserové svařování I (Laser welding) [online]. [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>.
19. Seriál na téma lasery – hlavní typy laserů používaných v průmyslu [online]. [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>.
20. Základy laserové techniky. [online]. [cit. 2021-03-21]. Dostupné z: <https://www.isibrno.cz/cs/vykonovy-laser-ipg-yls2000>.
21. Laserové technologie v praxi I. [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: https://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/ltp1_4prez.pdf.
22. Lasery, laserové technologie a stroje s laserem [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem>.
23. Laser welding [online]. [cit. 2021-03-27]. Dostupné z: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-7611-5_10.
24. Fibre laser welding of dissimilar materials [online]. [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: https://www.research.manchester.ac.uk/portal/files/54592753/FULL_TEXT.PDF.
25. Laser welding of hardenable steel. [online]. [cit. 2021-03-27]. Dostupné z: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1023039/FULLTEXT01.pdf>.
26. R. W. Messler, *Principles of welding: processes, physics, chemistry, and metallurgy*: John Wiley, 1999.
27. C. Lampa, A.F.H. Kaplan and J. Powell. *The offset of process speed on energy redistribution in deep penetration CO2 laser Welding*. Lasers in Engeneering. 1995.
28. STEEN, William M. and Jyotirmoy MAZUMDER. *Laser Material Processing*. 4 ed. London: Springer, 2010, 577 s. e-ISBN 978-1-84996-062-5.
29. Effect of welding parameters and the heat input on weld bead profile of laser welded T-joint in structural steel [online]. [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: <https://lia.scitation.org/doi/10.2351/1.4906378>
30. Kolektiv autorů. *Materiály a jejich chování při svařování*. Učební texty pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT). Ostrava, 2016. 404 s.
31. Process Efficiency Measurements in the Laser Engineered Net Shaping Process [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs11663-004-0104-7.pdf>.
32. Elucidation of Phenomena in High Power Fiber Laser Welding, and Development of Prevention Procedures of Welding Defects [online]. [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/228533125_Elucidation_of_Phenomena_in_High_Power_Fiber_Laser_Welding_and_Development_of_Prevention_Procedures_of_Welding_Defects.

33. Weld metal microstructural characteristics in pulsed Nd: YAG laser welding [online]. [cit. 2021-04-15].
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359646207001194>.
34. ČSN EN 1011-1. *Svařování – Doporučení pro svařování kovových materiálů – Část 1: Všeobecná směrnice pro obloukové svařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. 16 s. Třídící znak 052210.
35. OLSON D.L. a kolektiv autorů. ASM Handbook. Welding, brazing, and soldering Volume 6.: vyd. Materials Park, Ohio, 2011. ISBN-13978-1-61503-133-7.
36. Plyny – neviditelné tajemství zpracování materiálu laserem [online]. [cit. 2021-04-29].
Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/plyny-neviditelne-tajemstvi-zpracovani-materialu-laserem_18781.html
37. Laserové svařování – posouzení vlivu ochranného plynu [online]. [cit. 2021-04-29].
Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/laserove-svarovani-posouzeni-vlivu-ochranneho-plynu>
38. Svařování laserem [prezentace]. 44 s. [cit. 2021-05-10].
39. Svařování hliníku v ochranných atmosférách [online]. [cit. 2021-05-13]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svarovani-hliniku-v-ochrannych-atmosferach>
40. Analysis and Advantages of Welding Dissimilar Metals by Fiber Lasers factor [online]. [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/328335402_Analysis_and_Advantages_of_Welding_Dissimilar_Metals_by_Fiber_Lasers
41. SHAH, Luqman, KHODABAKHSHI, Farzad and Adrian GERLICH. X. *Effect of beam wobbling on laser welding of aluminum and magnesium alloy with nickel interlayer*. Journal of Manufacturing Processes. 2018. 37. 212-219. 10.1016/j.jmapro.2018.11.028.
42. Process Parameter Optimization for Wobbling Laser Spot Welding of Ti6Al4V Alloy [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1875389216301572>
43. Fiber laser welding technique joins challenging metals [online]. [cit. 2021-04-12].
Dostupné z: <https://www.industrial-lasers.com/welding/article/16485057/fiber-laser-welding-technique-joins-challenging-metals>.
44. Welding with wobbling technique [online]. [cit. 2021-04-11]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1875389216301572>.
45. A Study of Keyhole Porosity in Selective Laser Melting: Single-Track Scanning With Micro-CT Analysis [online]. [cit. 2021-04-11].
Dostupné z: <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10095233>.
46. A review of defect modeling in laser material processing [online]. [cit. 2021-03-27].
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214860416302858>.
47. ZAGUMENNYI, A. I., MIKHAILOV, V. A., SHCHERBAKOV, I. A. *Handbook of Laser Technology and Applications*. Vol. 2. Webb, C. E., Jones, J. D.C. (Eds.). Bristol: IOP Publishing, 2004. ISBN 0-7503-0963-6.
48. Analysis of mechanism of plasma and spatter in CO2 laser welding of galvanized steel [online]. [cit. 2021-04-15].
Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0030399299000134>.

49. Effects of Different Shielding Gases and Power Waveforms on Penetration Characteristics and Porosity Formation in Laser Welding of Inconel 690 Alloy [online]. [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/269451008_Effects_of_Different_Shielding_Gases_and_Power_Waveforms_on_Penetration_Characteristics_and_Porosity_Formation_in_Laser_Welding_of_Inconel_690_Alloy.
50. Optimisation of welding using two Nd–YAG laser beams combined at workpiece surface online]. [cit. 2021-04-15]. Dostupné z: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1179/136217100101538100>
51. Handbook of Laser Welding Technologies [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=wWZEAgAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=welding+lasers+in+engineering&hl=cs&sa=X&ved=2ahUKEwjp5vL9h9HvAhUFmYsKHQ7QBRwQ6AEwAXoECAkQAQ#v=onepage&q=welding%20lasers%20in%20engineering&f=false>
52. Factors affecting weld root morphology in laser keyhole welding [online]. [cit. 2021-04-21]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816617305432>.
53. HRIVŇÁK, Ivan. *Teória zvariteľnosti kovov a zliatin*. Bratislava: Veda, 1989. 344 s. ISBN 80-2240016-5.
54. Kolektiv autorů. *Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení*. 1. vydání. Ostrava: ZEROSS – svářečské nakladatelství, 1999. 249 s. ISBN 80-85771-70-5.
55. SIGMUND, Marián: *Svařitelnost kovových materiálů. Svařitelnost C a C-Mn ocelí*. [prezentace]. 2020. 59 s. [cit. 2021-05-10].
56. Kolektiv autorů. *Materiály a jejich svařitelnost*. 1. vydání. Ostrava: ZEROSS – svářečské nakladatelství, 2001. 292 s. ISBN 80-85771-85-3.
57. KOLARŽÍK, Ladislav. *Hodnocení svařitelnosti*. [prezentace]. ČVUT v Praze, Fakulta strojní. 60 s. [cit. 2021-05-10].
58. KOU, Sindo. *Welding metalurgy*. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, 2003, 466 s. ISBN 0-471-43491-4
59. EN ISO 15614-1. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování – Část 1: Obloukové a plamenové svařování oceli a obloukové svařování niklu a slitin niklu*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. 48 s. Třídící znak 050313.
60. PILOUS, Václav. *Strojírenské materiály tepelně energetických zařízení*. Plzeň: Ediční středisko Vysoké školy strojní a elektrotechnické, 1986.
61. KUBÍČEK, Jaroslav. *Trhliny za horka – AUSTENITICKÉ OCELI*. Studijní materiál. Brno, 2015. 6 s.
62. Analysis and Advantages of Welding Dissimilar Metals by Fiber Lasers factor [online]. [cit. 2021-04-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/328335402_Analysis_and_Advantages_of_Welding_Dissimilar_Metals_by_Fiber_Lasers

63. PILOUS, Václav a Karel STRÁNSKÝ. *Strukturální stálost návarů a svarových spojů v energetickém strojírenství*. Praha: Academia, 1989. Studie ČSAV. ISBN 80-200-0007-0, 208s
64. PILOUS, Václav. *Spolehlivost svarových spojů nových žárovevných ocelí v energetickém strojírenství*. Sborník TDS Brno SMS, 2008. 9s.
65. Svařitelnost některých technických materiálů a volba přídatných materiálů [online]. [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/N1_svaritelnost_materialu_ESAB.pdf
66. Welding guide for the joining of dissimilar metals [online]. [cit. 2021-04-24]. Dostupné z: https://www.serpantinas.com/uploads/documents/esab_suvirinimo_vadovas_skirtas_skirting_metal_sujungimui_en.pdf
67. ČSN EN 4063. *Svařování a příbuzné procesy – Přehled metod a jejich číslování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 24 s. Třídící znak 050011.
68. ČSN EN ISO 13919-1. *Svarové spoje zhotovené elektronovým a laserovým svařováním – Požadavky a doporučení pro určování stupňů jakosti – Část 1: Ocel, nikl, titan a jejich slitiny*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021. 24 s. Třídící znak 050335.
69. TNI CEN ISO/TR 15608. *Svařování – Směrnice pro zařazování kovových materiálů do skupin*. Praha: Český normalizační institut, 2008. 12 s. Třídící znak 050323.
70. PNAE G-7-003-87. *Certification rules for welders of nuclear power plants equipment and pipelines*. Moskva, 1988. 15 s.
71. **NORMATIVNĚ TECHNICKÁ DOKUMENTACE ASOCIACE STROJNÍCH INŽENÝRŮ. Sekce II.: Charakteristiky materiálů pro zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER**. Praha, 2017. 120 s.
72. ČSN EN 10027-2. *Systémy označování ocelí – Část 2: Systémy číselného označování*. Praha: Český normalizační institut, 2016. 24 s Třídící znak 420011.
73. ČSN EN 10216-5. *Bezešvé ocelové trubky pro tlakové účely – Technické dodací podmínky – Část 5: Trubky z korozivzdorné oceli*. Praha: Český normalizační institut, 2014. 48 s Třídící znak 420261.
74. ČSN EN 10216-2+A1. *Bezešvé ocelové trubky pro tlakové účaly – Technické dodací podmínky – Část 2: Trubky z nelegovaných a legovaných ocelí se stanovenými vlastnostmi při zvýšených teplotách*. Praha: Český normalizační institut, 2020. 56 s. Třídící znak 420261.
75. **NORMATIVNĚ TECHNICKÁ DOKUMENTACE ASOCIACE STROJNÍCH INŽENÝRŮ. Sekce I.: Svařování zařízení a potrubí jaderných elektráren typu VVER**. Praha, 2018. 152 s.
76. Metody atomové spektrometrie [online]. [cit. 2021-05-31]. Dostupné z: https://web.vscht.cz/~koplkr/6_FA_atomov%C3%A1_%20spektrometrie.pdf
77. Spalovací analyzátor [online]. [cit. 2021-05-31]. Dostupné z: <https://www.skoda-storyboard.com/cs/inovace-cs/mezi-uhlikem-a-sirou/attachment/laboratory5-2/>

78. Jiskrový spektrometr Q4 TASMAN [online]. [cit. 2021-05-31]. Dostupné z: https://www.bas.cz/bruker-quantron/q4_tasman.php
79. Spalovací analyzátor G4 ICARUS Series 2 – pro analýzu uhlík síra [online]. [cit. 2021-05-31]. Dostupné z: https://www.spektrometry.cz/analyzatory/spalovaci_analyzator_c_s_g4_icarus_hf_typ_c.php
80. PNAE G-7-010-89. Equipment and Piping of Nuclear Power Installations. Weld Joints and Weld *Overlays*. *Rules of inspection*. Moskva, 2000. 91 s.
81. GOST 2246-70 [online]. [cit. 2021-04-25]. Dostupné z: https://ussa.su/gosts/GOST_2246_Provoloka_svarochnaya.PDF
82. Welding of austenitic stainless steel [online]. [cit. 2021-04-25]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/job-knowledge/welding-of-austenitic-stainless-steel-103>
83. Svařitelnost materiálu [online]. [cit. 2021-04-25]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/10326477-Svaritelnost-materialu.html>
84. ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021. 76 s. Třídící znak 420310.
85. ČSN EN ISO 6892-2. *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 2: Zkušební metoda za zvýšené teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021. 24 s. Třídící znak 420310.
86. ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. 32 s. Třídící znak 420374.
87. ASTM E381-20. *Standard Method of Macroetch Testing Steel Bars, Billets, Blooms, and Forgings*. ASTM International, United States, 2020. 5 s.
88. ASTM E340-15. *Standard Practice for Macroetching Metals and Alloys*. ASTM International, United States, 2015. 11 s.
89. ČSN ISO 4967. *Ocel – Stanovení obsahu nekovových vměstků – Mikrografická metoda využívající normovaná zobrazení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. 40 s. Třídící znak 420471.
90. ČSN EN ISO 643. *Ocel – Mikrografické stanovení zdánlivé velikosti zrn*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021. 24 s. Třídící znak 420462.
91. Ae 16110/Dok, Rev. 06. *ŠKODA JS – Technické podmínky na dodávku těsnícího drátu pro hlavní dělicí rovinu tlakových nádob reaktorů VVER z materiálu NI 99,6*. 2020. 17 s.
92. ČSN EN ISO 15609-4. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Stanovení postupu svařování – Část 4: Laserové svařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010. 16 s. Třídící znak 050312.
93. ČSN EN ISO 15614-11. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů – Zkouška postupu svařování – Část 11: Elektronové a laserové svařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2003. 32 s. Třídící znak 050313.

94. Picosecond thin-disk laser platform PERLA for multi-beam micromachining [online]. [cit. 2021-04-22]. Dostupné z: <https://www.hilase.cz/wp-content/uploads/OSA-CONTINUUM-Picosecond-thin-disk-laser-platform-PERLA-for-multi-beam-micromachining.pdf>
95. Základy laserové techniky [online]. [cit. 2021-03-21]. Dostupné z: www.isibrno.cz/cs/vykonovy-laser-ipg-yls2000
96. Diskový laser TruDisk [online]. [cit. 2021-03-21]. Dostupné z: https://www.trumpf.com/cs_CZ/produkty/laser/diskovy-laser/trudisk/
97. OTS Optics. [online]. [cit. 2021-03-21]. Dostupné z: <https://www.laserline.com/de-int/ots-optiken/>
98. TPE 10-40/1771/2014-JE. *Všeobecné technické podmínky pro montážní svařování potrubí elektráren typu VVER*. 2014, 39 s.
99. PK 1514-72. *Pravidla kontroly svarových spojů a navařů uzlů a konstrukcí jaderných elektráren, zkušebních a výzkumných jaderných reaktorů a zařízení* (překlad z ruského jazyka). Moskva: Metallurgia, 1974.
100. OP 1513-72 *Základní předpisy pro svařování a navařování uzlů konstrukcí jaderných elektráren, experimentálních a výzkumných jaderných reaktorů a souborů*. Praha: Ústř. inf. středisko pro jaderný program, 1976. 166 s.
101. **NORMATIVNĚ TECHNICKÁ DOKUMENTACE ASOCIACE STROJNÍCH INŽENÝRŮ. Sekce VII.: NDT kontroly jaderných elektráren typu VVER**. Praha, 2020. 87 s.
102. ČSN EN ISO 17637. *Nedestruktivní zkoušení svarů – Vizuální kontrola tavných svarů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. 16 s. Třídící znak 051180.
103. VT- 19-JE-002. *Instrukce VT*. Interní dokument ČEZ, a. s. 4 s
104. ČSN EN ISO 3452-1. *Nedestruktivní zkoušení – Kapilární zkouška. Část 1, Obecné zásady*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. 24 s. Třídící znak 010518.
105. Kolektiv autorů. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování*. 1. vydání. Ostrava: ZEROSS – svářečské nakladatelství, 2000. 217 s. ISBN 80-85771-72-1.
106. PT-19-JE-0002. *Instrukce PT*. Interní dokument ČEZ, a. s. 4 s
107. ČSN EN ISO 17636-1. *Nedestruktivní zkoušení svarů – Radiografické zkoušení. Část 1, Metody rentgenového a gama záření využívající film*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. 36 s. Třídící znak 051150.
108. JANDURA, Václav a Tomáš ZAVADIL. *Nedestruktivní zkoušení, základní kurz*. Praha: ATG s.r.o., 2017. Dokument No.: S-NDT-0.90, 282 s.
109. ČSN EN ISO 19232-1. *Nedestruktivní zkoušení svarů – Kvalita obrazu radiogramů. Část 1, Stanovení hodnot kvality obrazu drátkovými měrkami*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014. 12 s. Třídící znak 015031.
110. UT-19-JE-0001. *Instrukce UT*. Interní dokument ČEZ, a. s. 4 s

111. ČSN EN ISO 13588. *Nedestruktivní zkoušení svarů – Zkoušení ultrazvukem – Využití automatizované techniky phased array*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020. 32 s. Třídící znak 051175.
112. Kolektiv autorů. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování*. Učební texty pro mezinárodní/evropské svářečské inženýry a technology (I/EWE, I/EWT). DOM-ZO-13, s.r.o 2017. 404 s.
113. MOLLIKOVA, Eva. *Zkoušení materiálů a výrobků*. Interaktivní výukový materiál. VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství, 2005.
114. GOST 6996-66. [online]. [cit. 2021-04-31]. Dostupné z: <https://docs.cntd.ru/document/1200003544>
115. ČSN EN ISO 4136. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Příčná zkouška tahem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. 16 s. Třídící znak 051121.
116. ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021. 76 s. Třídící znak 420310.
117. 5980 Series. [online]. [cit. 2021-05-08]. Dostupné z: <https://www.instron.us/en-us/products/testing-systems/universal-testing-systems/high-force-universal-testing-systems/5980-series-floor-models>
118. ČSN EN ISO 6892-2. *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 2: Zkušební metoda za zvýšené teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. 24 s. Třídící znak 420310.
119. ČSN EN ISO 17639. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů – Makroskopická a mikroskopická kontrola svarů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014. 12 s. Třídící znak 051128.
120. PLUHAŘ, Jaroslav. *Nauka o materiálech*. Praha: SNTL, 1989, 549 s.
121. KUCHAR, L. a J. DRÁPALA. *Segregační jevy při krystalizaci a jejich vliv na strukturní charakteristiky krystalů*. [online]. [cit. 2021-05-19]. Dostupné z: https://csacg.fzu.cz/func/viewpdf.php?file=2002_12Kuchar.pdf
122. *Svařování austenitických materiálů s feritickými*. Sborník TDS Brno SMS, 2008. 10s.
123. Elektronová mikroskopie. Metalografie [online]. [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: http://vyvoj.csvs.cz/projekty/2014_veda_pro_zivot/data/11_KA3_Jaromir_Cais_2_Elektronova_%20mikroskopie_a_%20EDS_%20analyza_metodicka_prirucka.pdf
124. Energiově disperzní spektrometrie (EDS) [online]. [cit. 2021-05-04]. Dostupné z: <https://matca.cz/technologie/analyticke-metody/eds/>
125. ISO 22826. *Destructive tests on welds in metallic materials – Hardness testing of narrow joints welded by laser and electron beam (Vickers and Knoop hardness tests)*. International Organization for Standardization (ISO). 2021. 24 s.
126. Příručka svářeče. Pro svařování v ochranné atmosféře a tepelné dělení plamenem. [online]. [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: http://www.airproducts.cz/~media/Files/PDF/industries/metals/CZ_Priruckasvarece.pdf?la=cs-CZ

127. Volba ochranného plynu pro svařování [online]. [cit. 2021-05-16]. Dostupné z: https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv/volba-ochranneho-plynu-pro-svarovani_17636.html
128. BENKO, Bernard a kol. Laserové technológie. Technická universita, Bratislava 2000, ISBN 80-227-1425-9.
129. ČSN ISO 690. Informace a dokumentace – Pravidla pro bibliografické odkazy a citace informačních zdrojů. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011. 40 s.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A (A ₅)	Tažnost	[%]
b	Hloubka ohniska	[mm]
CE	Ekvivalent uhlíku	[-]
C _{TE}	Ekvivalent chromu	[-]
f _{1,2}	Frekvence vlnění	[Hz]
FN	Feritové číslo	[-]
h	Planckova konstanta	[J·s]
M ²	Faktor kvality svazku	[-]
Ni _E	Ekvivalent niklu	[-]
P	Výkon laserového svazku	[W]
Q	Tepelný příkon	[kJ·mm ⁻¹]
R _{eH}	Smluvní mez kluzu horní	[MPa]
R _m	Pevnost v tahu	[MPa]
R _{p0,2}	Smluvní mez kluzu při plastické deformaci 0,2 %	[MPa]
v	Rychlost svařování	[mm·s ⁻¹]
w ₀	Poloměr pasu svazku	[mm]
Z	Kontrakce	[%]
z _R	Rayleighova vzdálenost	[mm]
λ	Vlnová délka	[m]
θ	Polovina divergence svazku	[mrad]
η	Účinnost metody svařování	[-]
A	Austenit	
BBP	Beam Parameter Product	
BW	Butt Weld (tupý svar)	
C	Uhlík	
	The European Committee for Standardization (Evropský výbor pro normalizaci)	
CEN		
CW	Kontinuální režim vedení svazku	
ČSN	Česká státní norma	
EBW	Elektron Beam Welding (svařování elektronovým paprskem)	
EN	European Norm (evropská norma)	
F	Ferit	
FP	Feriticko-perlitický	
	Сертификат соответствия ГОСТ (Osvědčení o shodě; národní ruský standard)	
GOST		
HSS	Heterogenní svarový spoj	
	International Institute of Welding (mezinárodní svářečský institut)	
IIW		
	International Standard Organisation (mezinárodní organizace pro normalizaci)	
ISO		
JE	Jaderná elektrárna	
LBW	Laser Beam Welding (svařování laserovým paprskem)	
M	Martenzit	
	Metal Inert Gas (Obloukové svařování tavící se elektrodou v inertním plynu)	
MIG		
MKK	Mezikrystalová koroze	

MTF STU	Materiálovotechnologická fakulta Slovenské technické univerzity
NDT	Non Destructive Testing
NTD A.S.I.	Normativně technická dokumentace Asociace strojních inženýrů
OP	Oborový předpis
PK	Pravidla kontroly
PM	Přídavný materiál
PNAE G	Federální normy a pravidla v oblasti využití atomové energie
PT	Penetration Testing (kapilární zkouška)
PW	Pulsní režim vedení svazku
pWPS	Preliminary Welding Procedure Specification (předběžná specifikace postupu svařování)
RT	Radiography Testing (prozařovací zkouška)
SEM	Skenovací elektronová mikroskopie
SK	Svarový kov
TaRC	Tréninkové a Realizační Centrum
TIG / WIG	Tungsten Inert Gas Welding / Wolfram Inert Gas (Obloukové svařování netavící se elektrodou v inertním plynu)
TNI	Technical Standards Interpretations
TOO	Tepelně ovlivněná oblast
TPE	Technické podmínky
ÚPT AV	
ČR	Ústav přístrojové techniky Akademie věd České republiky
UT-PA	Ultrasonic Testing – Phased Array (ultrazvuková zkouška)
VT	Visual Testing (vizuální kontrola)
WRC	Welding Research Council
YLS	Ytterbium fiber Laser (vláknový laser)
ZK	Zkušební (vzorek)
ZM	Základní materiál
α	Ferit
δ	δ Ferit
γ	Austenit

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Schéma pasu svazku [9, 10]	12
Obr. 2: Interakce fotonů [10, 11]	13
Obr. 3: Schéma optického rezonátoru [10]	14
Obr. 4: Aktivní prostředí vybraných typů laserů [19]	15
Obr. 5: Závislost hustoty výkonu a geometrie housenky na technologii svařování [22].....	16
Obr. 6: Režimy laserového svařování [10]	16
Obr. 7: Kroky vedoucí k formování keyhole [26]	17
Obr. 8: Dynamika keyhole [28]	17
Obr. 9: Tvar keyhole v příčném směru [28]	18
Obr. 10: Schéma přenosu výkonu paprsku laseru [24]].....	18
Obr. 11: Schéma vedení svazku [41]	19
Obr. 12: Tvorba pórů v keyhole [46]	20
Obr. 13: Vliv rychlosti svařování na pórovitost svaru [23, 32]	21
Obr. 14: Zředění SK, upraveno dle [58]	22
Obr. 15: Závislost rychlosti EBW a výsledné struktury svaru [58].....	24
Obr. 16: Průběh difúze uhlíku za zvýšené teploty (550 °C) [64]	25
Obr. 17: ZM A, lept Lučavka, 200×	28
Obr. 18: ZM F-P, lept 10% Nital, 200×.....	28
Obr. 19: Upravený Schäfflerův diagram [9, 56, 82, 83]	29
Obr. 20: Příprava svarových ploch	31
Obr. 21: Pikosekundový Yb:YAG laser na ÚPT	32
Obr. 22: Detail optiky	31
Obr. 23: Přípravek pro sestavení vzorku na ÚPT	32
Obr. 24: Vláknový laser na ÚPT v Brně.....	33
Obr. 25: Laser na ÚPT s wobblovací hlavou	33
Obr. 26: Diskový laser na MTF v Trnavě.....	33
Obr. 27: Vláknový laser v Lasertherm Plzeň.....	33
Obr. 28: PT vz. č 11 (vlevo) a č. 8 (vpravo)	36
Obr. 29: Indikace 509 u vz. č. 26.....	36
Obr. 30: Indikace 2018 u vz. č. 20.....	36
Obr. 31: Povrchový pór u vz. č. 20.....	36
Obr. 32: Zbroušení Ni kroužku u vz. č. 19 a 20	36
Obr. 33: Opakovaná PT u vz. č. 19 a 20	36
Obr. 34: Radiogramy těles č. 17 a 18, pohled A.....	37
Obr. 35: Radiogram vz. č. 23.....	37
Obr. 36: UT-PA Vz. č. 18 ze strany A materiálu.....	38
Obr. 37: UT-PA Vz. č. 18 ze strany FP materiálu	38
Obr. 38: Zkušební tělesa před tahovou zkouškou za studena	39
Obr. 39: Zařízení INSTRON 5989	40
Obr. 40: Vz. č. 26 po zkoušce tahem při 20 °C	40
Obr. 41: Průběh tahové zkoušky za pokojové teploty	40
Obr. 42: Snímače teploty	41
Obr. 43: Ustavování tělesa v indukční peci	41
Obr. 44: Zkušební těleso pro tahovou zkoušku za zvýšené teploty	41
Obr. 45: Vz. č. 3 po zkoušce tahem při 350 °C	42
Obr. 46: Průběh tahové zkoušky za zvýšené teploty	42
Obr. 47: Kráterová trhlina, vz. č. 6; 50×	43
Obr. 48: Podhousenková trhlina, vz. č. 6; 200×	43

Obr. 49: Podélná trhlina, vz. č. 5; 100×	43
Obr. 50: Příčná trhlina, vz. č. 6; 200×	43
Obr. 51: Vz. 2A; 100×	44
Obr. 52: Vz. 3A; 100×	44
Obr. 53: Vz. 4A; 100×	44
Obr. 54: Vz. 5A; 100×	44
Obr. 55: Vz. 6A; 100×	44
Obr. 56: Vz. 7B; 100×	44
Obr. 57: Vz. 10B; 100×	45
Obr. 58: Vz. 11B; 100×	45
Obr. 59: Vz. 12B; 100×	45
Obr. 60: Vz. 26B; 100×	45
Obr. 61: Vz. 14A; 100×	46
Obr. 62: Vz. 15B; 100×	46
Obr. 63: Vz. 16A; 100×	46
Obr. 64: Vz. 17B; 100×	46
Obr. 65: Vz. 18B; 100×	46
Obr. 66: Vz. 19B; 100×	46
Obr. 67: Vz. 20B; 100×	46
Obr. 68: Vz. 21A; 100×	47
Obr. 69: Vz. 22A; 100×	47
Obr. 70: Vz. 23A; 100×	47
Obr. 71: Vz. 24A; 100×	47
Obr. 72: Vz. 25A; 100×	47
Obr. 73: Vz. 21B rozhraní FP – SK; 300×	48
Obr. 74: Vz. 21A rozhraní SK – A; 300×	48
Obr. 75: Vz. 4A epitaxiální růst; 1000×	48
Obr. 76: Vz. 17A celulární růst; 1000×	48
Obr. 77: Vz. 3A střed SK (krycí); 200×	49
Obr. 78: Vz. 3A střed SK – A (krycí); 200×	49
Obr. 79: Vz. 5A FP – SK (krycí); 200×	49
Obr. 80: Vz. 5A SK – A (krycí); 200×	49
Obr. 81: Vz. 18A SK (krycí); δ ferit kořen; 500×	50
Obr. 82: Vz. 23B SK (krycí); δ ferit kořen; 500×	50
Obr. 83: Vz. 26A SK – A; elektrolyt; 1000×	50
Obr. 84: Vz. 26A SK – A; δ ferit; 1000×	50
Obr. 85: Vz. 6A SK – A; lučavka; 300×	50
Obr. 86: Vz. 6A SK – A; lučavka; 1000×	50
Obr. 87: Vz. 3 SK – δ ferit; 1000×	55
Obr. 88: Vz. 4B mikrotvrdość; 500×	56
Obr. 89: Vz. 22B mikrotvrdość; 500×	56

SEZNAM TABULEK A GRAFŮ

Tab. 01: Zkušební vzorky	26
Tab. 02: Chemické složení oceli 1.4541 v hm. % srovnáno s ČSN EN 10216-5:2014.....	27
Tab. 03: Chemické složení oceli 1.0425 v hm. % srovnáno s ČSN EN 10216-2:2014.....	27
Tab. 04: Chemické složení Sv-07Ch25N13 v hm % srovnáno s PN AE G-7-010-89	28
Tab. 05: Srovnání mechanických vlastností oceli 1.4541 s ČSN EN 10216-5:2014	29
Tab. 06: Srovnání mechanických vlastností oceli 1.0425 s ČSN EN 10216-2:2014	30
Tab. 07: Mechanické vlastnosti Sv-07Ch25N13 dle GOST 2246-70	30
Tab. 08: Mechanické vlastnosti Ni 99,6 dle Ae 16110/Dok, Rev. 06:2020	30
Tab. 09: Svařovací parametry	34
Tab. 10: Přehled nedestruktivního zkoušení.....	35
Tab. 11: Přehled destruktivního zkoušení.....	39
Tab. 12: Vyhodnocení tahové zkoušky za pokojové teploty	41
Tab. 13: Vyhodnocení tahové zkoušky za zvýšené teploty.....	42
Graf 1: Liniová analýza obsahu vybraných prvků vz. č. 3	51
Graf 2: Liniová analýza obsahu vybraných prvků vz. č. 23	52
Graf 3: Liniová analýza obsahu vybraných prvků vz. č. 21	52
Graf 4: Liniová analýza obsahu chromu.....	53
Graf 5: Liniová analýza obsahu niklu.....	53
Graf 6: Liniová analýza obsahu titanu	54
Graf 7: Liniová analýza obsahu manganu	54
Graf 8: Průběh mikrotvrdosti u vz. č. 15B.....	56
Graf 9: Průběh mikrotvrdosti u vz. č. 16C.....	56

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 01 Přehled vzorků a základních parametrů laserového svařování
- Příloha 02 Inspekční certifikáty základních materiálů
- Příloha 03 Inspekční certifikát Sv-07 prům. 1,0 mm
- Příloha 04 Inspekční certifikát Sv-07 prům. 1,2 mm
- Příloha 05 Protokol o zkoušce materiálu 1.4541
- Příloha 06 Protokol o zkoušce materiálu 1.0425
- Příloha 07 Protokol o zkoušce Ni drátu prům 5,05 mm
- Příloha 08 SEM
- Příloha 09 Vzorek č. 2 hodnocení
- Příloha 10 Vzorek č. 3 hodnocení
- Příloha 11 Vzorek č. 4 hodnocení
- Příloha 12 Vzorek č. 5 hodnocení
- Příloha 13 Vzorek č. 6 hodnocení
- Příloha 14 Vzorek č. 7 hodnocení
- Příloha 15 Vzorek č. 8 hodnocení
- Příloha 16 Vzorek č. 9 hodnocení
- Příloha 17 Vzorek č. 10 hodnocení
- Příloha 18 Vzorek č. 11 hodnocení
- Příloha 19 Vzorek č. 12 hodnocení
- Příloha 20 Vzorek č. 14 hodnocení
- Příloha 21 Vzorek č. 15 hodnocení
- Příloha 22 Vzorek č. 16 hodnocení
- Příloha 23 Vzorek č. 17 hodnocení
- Příloha 24 Vzorek č. 18 hodnocení
- Příloha 25 Vzorek č. 19 hodnocení
- Příloha 26 Vzorek č. 20 hodnocení
- Příloha 27 Vzorek č. 21 hodnocení
- Příloha 28 Vzorek č. 22 hodnocení
- Příloha 29 Vzorek č. 23 hodnocení
- Příloha 30 Vzorek č. 24 hodnocení
- Příloha 31 Vzorek č. 25 hodnocení
- Příloha 32 Vzorek č. 26 hodnocení