



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

VLIV TLOUŠŤKY PLECHU NA TVRDOST MATERIÁLU SVAROVÉHO SPOJE

THICKNESS OF SHEET AND HARDNESS OF WELDED JOINS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Daniel Valášek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Eva Molliková, Ph.D., Paed IGIP

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

| | |
|-------------------|---|
| Ústav: | Ústav materiálových věd a inženýrství |
| Student: | Daniel Valášek |
| Studijní program: | Strojírenství |
| Studijní obor: | Základy strojního inženýrství |
| Vedoucí práce: | Ing. Eva Mollíková, Ph.D., Paed IGIP |
| Akademický rok: | 2018/19 |

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

Vliv tloušťky plechu na tvrdost materiálu svarového spoje

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student ve své závěrečné práci pojedná o vlivu tloušťky svařovaného plechu na tvrdost materiálu svarového spoje – s ohledem na to, že při svařování tenkých plechů dosahuje tvrdost vyšších než požadovaných hodnot, při svařování plechů tlustších je tvrdost v požadovaných mezích. Kromě úvodní rešerše problému budou uvedeny výsledky experimentů a posléze bude formulován závěr.

Cíle bakalářské práce:

- provést rešerši problematiky,
- definovat experimentální materiály,
- uvést postupy svařování,
- popsat zkoušky provedené na svarových spojích,
- diskutovat výsledky experimentů ve vztahu k tloušťce použitých plechů,
- formulovat závěry.

Seznam doporučené literatury:

ASKELAND, Donald and Pradeep FULAY. The Science and Engineering of Materials. 5th ed. UK: Thomson, 2006. ISBN 0-534-55396-6.

CALLISTER, William. Material Science and Engineering, An Introduction. GB: John Willey and Sons, 2003. ISBN: 0-471-22471-5.

GIBSON, Stuart W. Advanced Welding. Hampshire: MacMillan, 1997, 311 s. ISBN 0-333-65384-X.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

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

Abstrakt

Tato práce se zabývá vlivem tloušťky, výkonu laseru a typu materiálu na výslednou tvrdost svarového spoje vzniklého pomocí laserového svařování konstrukčních ocelí. Kromě popisu technologie svařování a popisu experimentu jsou v práci uvedeny také výsledky měření tvrdosti spolu s fotografiemi mikrostruktury svarových spojů ze všech oblastí svaru a jejich zhodnocení.

Klíčová slova

Tvrdost, laserové svařování, konstrukční oceli, tloušťka

Abstract

Theme of this bachelor's thesis is to determine the effect of material thickness, laser beam power and the material itself on hardness of the weld joint created by laser welding of construction steels. In addition to description of welding technology, this thesis also includes description of the undertaken experiment and its results which include photographs of microstructure from all weld joint zones and photograph evaluation.

Keywords

Hardness, laser welding, construction steels, thickness

VALÁŠEK, D. *Vliv tloušťky plechu na tvrdost materiálu svarového spoje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2019. 67 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Eva Molliková Ph.D. Paed IGIP.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Vliv tloušťky plechu na tvrdost materiálu svarového spoje vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, které jsou součástí této práce.

V Brně dne:

Podpis:

Poděkování

V této části práce bych rád poděkoval paní Ing. Evě Mollikové Ph. D. Paed IGIP za cenné rady, poznámky a vedení při zpracování této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Michalu Loskotovi za příležitost vypracovat tuto bakalářskou práci v rámci firmy BT-CZ a za cenné rady a poznámky ohledně technologické části práce. Také bych rád poděkoval pracovníkům Zkušební laboratoře BT-CZ za jejich asistenci při přípravě metalografických vzorků. Na závěr bych rád poděkoval své rodině a přátelům za podporu během tvorby této bakalářské práce.

Obsah

| | | |
|-------|---------------------------------------|----|
| 1 | Cíle práce..... | 1 |
| 2 | Úvod..... | 2 |
| 3 | Teoretická část..... | 3 |
| 3.1 | Svařování..... | 3 |
| 3.1.1 | Rozdělení svařování..... | 3 |
| 3.1.2 | Key hole..... | 4 |
| 3.1.3 | Laserové svařování..... | 4 |
| 3.1.4 | Elektronové svařování..... | 7 |
| 3.1.5 | Plasmové svařování..... | 8 |
| 3.2 | Příprava metalografických vzorků..... | 10 |
| 3.2.1 | Odběr vzorku..... | 10 |
| 3.2.2 | Preparace..... | 10 |
| 3.2.3 | Broušení..... | 11 |
| 3.2.4 | Leštění..... | 12 |
| 3.2.5 | Leptání..... | 13 |
| 3.3 | Tvrdost a její měření..... | 15 |
| 3.3.1 | Tvrdost podle Vickerse..... | 15 |
| 3.3.2 | Měření tvrdosti svarů..... | 16 |
| 4 | Experimentální část..... | 17 |
| 4.1 | Výběr materiálu..... | 17 |
| 4.1.1 | S500MC..... | 17 |
| 4.1.2 | S355J2C + N..... | 17 |
| 4.2 | Svařování..... | 18 |
| 4.2.1 | Laser..... | 18 |
| 4.2.2 | Přídavný materiál..... | 19 |
| 4.2.3 | Parametry při svařování..... | 20 |
| 4.3 | Příprava metalografických vzorků..... | 20 |
| 4.3.1 | Řezání..... | 22 |
| 4.3.2 | Lisování..... | 22 |
| 4.3.3 | Broušení a leštění..... | 23 |
| 4.3.4 | Leptání..... | 24 |
| 4.4 | Měření tvrdosti..... | 25 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4.5 | Měření průvarů a jejich porovnání s výpočtem | 25 |
| 5 | Výsledky experimentů..... | 27 |
| 5.1 | Zjištěná makrostruktura, tvrdost a mikrostruktura svarového spoje | 27 |
| 5.1.1 | Vzorek A1 (tloušťka 2 mm, výkon 2 kW, materiál S500MC)..... | 28 |
| 5.1.2 | Vzorek A2 (tloušťka 2 mm, výkon 3 kW, materiál S500MC)..... | 29 |
| 5.1.3 | Vzorek A3 (tloušťka 2 mm, výkon 4 kW, materiál S500MC)..... | 30 |
| 5.1.4 | Vzorek B1 (tloušťka 2 mm, výkon 2 kW, materiál S355J2C+N)..... | 31 |
| 5.1.5 | Vzorek B2 (tloušťka 2 mm, výkon 3 kW, materiál S355J2C+N)..... | 32 |
| 5.1.6 | Vzorek B3 (tloušťka 2 mm, výkon 4 kW, materiál S355J2C+N)..... | 33 |
| 5.1.7 | Vzorek C1 (tloušťka 4 mm, výkon 3 kW, materiál S500MC)..... | 34 |
| 5.1.8 | Vzorek C2 (tloušťka 4 mm, výkon 4 kW, materiál S500MC)..... | 35 |
| 5.1.9 | Vzorek C3 (tloušťka 4 mm, výkon 5 kW, materiál S500MC)..... | 36 |
| 5.1.10 | Vzorek D1 (tloušťka 4 mm, výkon 3 kW, materiál S355J2C+N)..... | 37 |
| 5.1.11 | Vzorek D2 (tloušťka 4 mm, výkon 4 kW, materiál S355J2C+N)..... | 38 |
| 5.1.12 | Vzorek D3 (tloušťka 4 mm, výkon 5 kW, materiál S355J2C+N)..... | 39 |
| 5.2 | Zjištěná a predikovaná hloubka průvarů | 40 |
| 6 | Diskuze výsledků | 41 |
| 6.1 | Diskuze makrostruktury, tvrdosti a mikrostruktury svarového spoje..... | 41 |
| 6.1.1 | Vzorek A1 (tloušťka 2 mm, výkon 2 kW, materiál S500MC)..... | 41 |
| 6.1.2 | Vzorek A2 (tloušťka 2 mm, výkon 3 kW, materiál S500MC)..... | 41 |
| 6.1.3 | Vzorek A3 (tloušťka 2 mm, výkon 4 kW, materiál S500MC)..... | 42 |
| 6.1.4 | Vzorek B1 (tloušťka 2 mm, výkon 2 kW, materiál S355J2C + N)..... | 42 |
| 6.1.5 | Vzorek B2 (tloušťka 2 mm, výkon 3 kW, materiál S355J2C + N)..... | 43 |
| 6.1.6 | Vzorek B3 (tloušťka 2 mm, výkon 2 kW, materiál S355J2C + N)..... | 43 |
| 6.1.7 | Vzorek C1 (tloušťka 4 mm, výkon 3 kW, materiál S500MC)..... | 44 |
| 6.1.8 | Vzorek C2 (tloušťka 4 mm, výkon 4 kW, materiál S500MC)..... | 44 |
| 6.1.9 | Vzorek C3 (tloušťka 4 mm, výkon 5 kW, materiál S500MC)..... | 45 |
| 6.1.10 | Vzorek D1 (tloušťka 4 mm, výkon 3 kW, materiál S355J2C + N)..... | 46 |
| 6.1.11 | Vzorek D2 (tloušťka 4 mm, výkon 4 kW, materiál S355J2C + N)..... | 46 |
| 6.1.12 | Vzorek D3 (tloušťka 4 mm, výkon 5 kW, materiál S355J2C + N)..... | 47 |
| 6.2 | Shrnutí poznatků..... | 48 |
| 6.2.1 | Vliv výkonu laseru | 48 |
| 6.2.2 | Vliv tloušťky | 50 |

| | | |
|-------|--|----|
| 6.2.3 | Vliv materiálu..... | 52 |
| 6.2.4 | Zhodnocení svarů | 52 |
| 6.3 | Diskuze vypočtených hodnot průvarů | 53 |
| 7 | Závěr..... | 55 |
| 8 | Literatura | 56 |

1 Cíle práce

Cílem této bakalářské práce je analyzovat vliv tloušťky plechu, výkonu laseru a vliv použitého materiálu na výslednou tvrdost svarového spoje. Pro úspěšné splnění tohoto cíle je potřeba zejména:

- provést rešerši postupů svařování
- definovat experimentální materiály použité při svařování
- popsat a následně provést metalografickou přípravu vzorku
- naměřit tvrdost na zkoumaných vzorcích
- uvést výsledky experimentů a porovnat výsledky v diskuzi
- v závěru zhodnotit vliv výše specifikovaných faktorů na tvrdost svaru

Tato bakalářská práce si klade za cíl ověřit nebo vyvrátit hypotézu, která byla vypořádána ve firmě BT-CZ, a to že při svařování tenkých plechů dochází k vyššímu nárůstu tvrdosti než u plechů větších tloušťek. Další cíl, který byl navrhnout firmou, je ověření použitelnosti výpočtového vztahu Metzbowera pro výpočty hloubek průvarů zadaných experimentálních materiálů.

2 Úvod

Tato bakalářská práce byla zpracována ve spolupráci s firmou Bombardier Transportation Czech Republic a.s. (BT-CZ) sídlící v České Lípě. Bombardier Transportation Czech Republic a.s. je součástí kanadského koncernu Bombardier Inc., který se zabývá leteckou a vlakovou přepravou a má pobočky v 28 zemích po celém světě. Bombardier Transportation se konkrétně zaměřuje na vývoj a výrobu vlaků, tramvají, rychlovlaků a metra. Areál firmy BT-CZ nacházející se v České Lípě má dlouholetou historii týkající se výroby železničních vozů sahající až do roku 1918. Firma Bombardier Transportation areál zakoupila v roce 2008. Od té doby se v České Lípě vyrábějí podvozky, oplechování a části kabin vlaků, které se poté převážejí do jiných poboček k finální montáži. Podvozky vlakových souprav a části kabin se vyrábějí z plechů, které jsou spojovány pomocí svařování. Firma má novou svařovací halu vybavenou sestavou pro laserové svařování. [1] [2]

Jelikož laserové svařování je rozdílné od svařovacích metod dříve používaných ve firmě, ovlivňuje materiál a jeho mechanické vlastnosti jinak než dříve používané metody svařování. Jedna z těchto mechanických vlastností je tvrdost materiálu, respektive tvrdost svaru. Cílem této práce je zjistit, jaký vliv na tvrdost svaru má tloušťka a typ materiálu a také výkon laseru použitý při svařování.

3 Teoretická část

3.1 Svařování

Svařování lze definovat jako proces, při kterém dochází ke vzniku svaru. Svar je definován jako nerozebíratelné spojení dvou původně nespojených částí, k jehož vzniku dochází vlivem působení teploty vyšší, než teplota tavení materiálu. [3]

Základním principem svařování je spojení dvou částí ze základního materiálu pomocí svaru. Svařovat je možno buď s použitím přídavného materiálu anebo bez použití přídavného materiálu. V případě použití přídavného materiálu lze svařovat i součásti, které jsou od sebe vzdálené i několik milimetrů, jelikož přídavný materiál zaplní danou mezeru. Jako přídavný je obvykle používán materiál s lepšími mechanickými vlastnostmi, než má základní materiál, neboť ve svarovém spoji je v důsledku změněné struktury jiná reakce/odezva materiálu na zatížení.

3.1.1 Rozdělení svařování

Svařování lze rozdělit na dvě hlavní skupiny: [3]

- 1) Tavné
 - Plamenné svařování
 - Obloukové svařování
 - Speciální metody tavného svařování
- 2) Tlakové
 - Třecí svařování
 - Odporové svařování
 - Ultrazvukové svařování

Při tavném svařování dochází k dodání energie ve formě tepla základním materiálům, resp. základnímu a přídavnému materiálu, přičemž dochází k jejich natavení a promísení tavenin. Po přerušení přívodu energie dochází k rychlému ochlazení taveniny a k jejímu tuhnutí, což má za následek spojení dvou původně nespojených částí pomocí nově vzniklého svaru. [3]

V nově vzniklém svařeném materiálu je možno rozlišit tři oblasti:

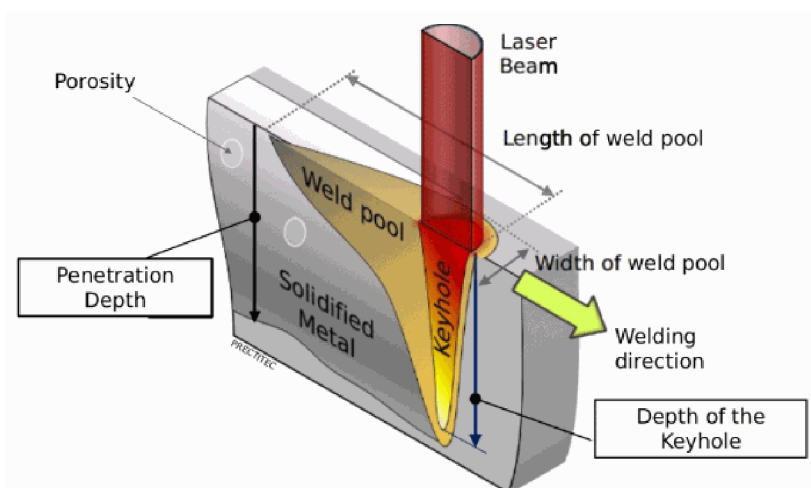
- strukturně nezměněný původní základní materiál (ZM)
- tepelně ovlivněnou oblast (TOO) se částečně změněnou strukturou, v důsledku ohřevu a ochlazení při svařování, v níž však nedošlo k natavení materiálu
- oblast svarového kovu (SK), v níž byl základní i přídavný materiál relativně rychle ohřát nad teplotu tání, zcela roztaven, promíchán a opět relativně rychle ochlazen

Při tlakovém svařování dochází k přiblížení materiálů na tak malou vzdálenost, že dochází k působení meziatomových sil mezi svařovanými částmi. [3]

Speciální metody tavného svařování zahrnují tři druhy svařování, a to laserové svařování, plasmové svařování a elektronové svařování. [3] Všechny tři budou zmíněny, ale největší pozornost bude věnována laserovému svařování.

3.1.2 Key hole

Všechny tři metody speciálního tavného svařování se vyznačují jevem zvaným Key hole (anglicky klíčová dírka). Tyto tři metody se jsou typické vysokou koncentrací předané energie na jednotku plochy na svařovaném materiálu. Takto vysoká hodnota energie koncentrovaná do poměrně malé oblasti způsobí vznik kavity v materiálu. Vysoká teplota paprsku způsobí odpařování částic materiálu a tyto výpary zabrání uzavření kavity okolo paprsku. Díky vzniku kavity je možné dosáhnout hlubokého průvaru ve svařovaném materiálu, což umožňuje svařovat například plechy velkých tlouštěk. Jelikož je tato energie soustředěná pouze na malé ploše, vzniká v porovnání s jinými metodami svařování poměrně úzká TOO, což je pozitivní. Při posuvu svařovacího paprsku dochází k postupnému tuhnutí nataveného materiálu a tavení dalšího materiálu ve směru pohybu. Při pohledu shora svým vzhledem tento postupný proces připomíná klíčovou díрку, podle čehož byl i pojmenován (viz obrázek 3.1 [29]). Tohoto jevu se využívá taky při laserovém, elektronovém či plasmovém řezání materiálu. [4] [5]



Obrázek 3.1 – Svařování klíčovou dírkou [29]

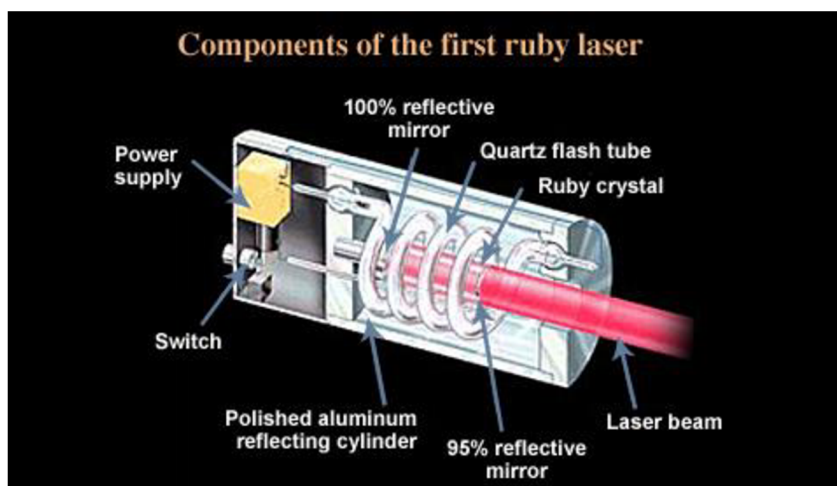
3.1.3 Laserové svařování

Laserové svařování využívá k zahřátí materiálu (dodání aktivační energie) zesílení světla pomocí stimulované emise záření, jak plyne z anglických slov, která tvoří zkratku LASER (Light of Amplification by Stimulated Emission of Radiation). V průmyslu a svařování se hojně využívají pevnolátkové, plynové a vláknové lasery. Mimo to existují i lasery chemické nebo kapalinové, ty však ke svařování používány nejsou. [6] [7]

3.1.3.1 Pevnolátkové lasery

První laser byl vyroben v roce 1960 Američanem Theodorem Mainmanem a jednalo se o laser pevnolátkový. [6] Tento laser se skládal ze synteticky vyrobené, průhledné rubínové tyče,

xenonové výbojky a dvou zrcadel, z nichž jedno bylo postříbřené (viz obr. 3.2 [30]). Tento laser se nazývá rubínový laser a jeho princip je následující. Výbojka se rozsvítí, a tím nabije některé atomy uvnitř rubínové tyče. Tyto nabité atomy vyzáří fotony, část těchto fotonů se začne pohybovat mezi dvěma zrcadly umístěnými na koncích tyče (pohyb probíhá v ose tyče). Tento pohyb vyvolá vlivem srážek s dalšími atomy vyzáření fotonů ze zasažených atomů. Tyto fotony spolu s prvotními fotony se nadále pohybují, vytvářejí pomocí srážek další fotony a následně opustí rubínovou tyč skrz polopropustné postříbřené zrcadlo jako monochromatický koherentní paprsek neboli laser. [4] [6] [7] [8]



Obrázek 3.2 – Stavba rubínového laseru [30]

Rubínový laser už se v dnešní době téměř nepoužívá, jelikož jeho účinnost je velmi malá, a tudíž se nehodí pro průmyslové aplikace. Místo něj se používají pevnolátkové lasery založené na principu kombinace neodymu a skla (Nd-sklo) anebo neodymu, yttria, hliníku a granátu (Nd-YAG) spolu s kryptonovými výbojkami. Tyto typy laserů se využívají v průmyslu ke svařování, vrtání a řezání kovů. Jejich účinnost je vyšší než u rubínového laseru a je možné ji ještě zvýšit pomocí polovodičových prvků, jako jsou diody. Jedná se o žádaný jev, jelikož bez diod vykazuje např. Nd-YAG laser účinnost pouze 5 %, zatímco s využitím diod jeho účinnost stoupá na 10 nebo v některých případech až 20 %. Jedna z největších výhod je, že laserový paprsek pevnolátkového laseru je možné pomocí optických kabelů dovést i za překážky, což umožňuje svařování ve špatně dosažitelných pozicích. [6] [9] [10] [11]

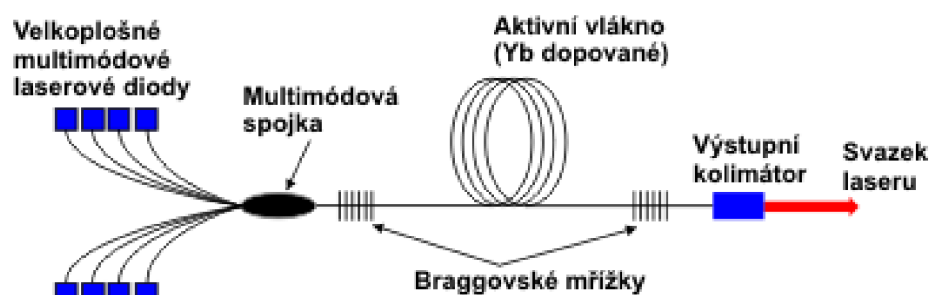
3.1.3.2 Plynové lasery

Plynový laser byl vynalezen v roce 1964 indickým vědcem N. Patelem. [4] Tento laser se skládá ze skleněné trubice, která je naplněna reakčním plynem, nejčastěji směsí oxidu uhličitého (CO₂), dusíku (N₂) a helia (He), a dvou zrcadel, z nichž jedno je polopropustné a druhé nepropustné (stejně jako u pevnolátkových laserů). Plynové lasery využívají elektrického proudu k excitaci atomů a následnému vyzáření fotonů ze směsi plynů. Tyto fotony začnou narážet do okolních atomů, které vyzáří další fotony během probíhající řetězové reakce v identickém procesu jako u pevnolátkových laserů. Účinnost plynových laserů je v porovnání s pevnolátkovými vyšší a pohybuje se mezi 10 ÷ 15 %. Jejich nevýhodou oproti pevnolátkovým

laserům je skutečnost, že jejich záření nelze vést pomocí optických vláken, ale pouze pomocí zrcadel, což je mnohem náročnější na údržbu a kalibraci. [4] [6] [9] [10] [11]

3.1.3.3 Vláknové lasery

První návrh vláknového laseru se objevil v 60. letech 20. století, ale narozdíl od dvou předchozích typů se nedočkal rychlého rozvoje a následného použití v průmyslových podmínkách. Větší pozornosti se vláknovému laseru dostalo až v 80. letech spolu s rozvojem optických vláken, která jsou pro tento typ laseru klíčová. [12] Vláknový laser se skládá z křemíkového optického vlákna dopovaného jedním z prvků vzácných zemin (erbiem, ytterbiem nebo thuliem), diod na vstupu, přeměňujících elektrickou energii na laserové záření, Braggovských mřížek a výstupního kolimátoru (obr. 3.3 [31]). Optické vlákno slouží k zesilování signálu, jenž jím prochází, a Braggovské mřížky slouží ke stejnému účelu jako dvě zrcadla (jedno nepropustné a druhé polopropustné) u pevnolátkových laserů. [9] [12]



Obrázek 3.3 – Schéma vláknového laseru [31]

Hlavní výhodou vláknových laserů oproti např. YAG nebo CO₂ laserům je jejich vyšší účinnost, která se pohybuje mezi 25 až 35 %, což umožňuje efektivnější využití vkládané energie. Dalšími výhodami je dlouhá životnost, jednoduchost, vysoká kvalita svazku a možnost skládat vláknové lasery do sestav za účelem dosažení vyšších výkonů. Stejně jako u pevnolátkových laserů lze paprsek vláknových laserů vést pomocí optických vláken. Tyto vlastnosti jsou ideální právě pro svařování a jsou důvodem, proč se vláknové lasery stávají v průmyslu stále populárnější. [9] [12]

Výhody

Parametry svařování laserem (např. výkon, rychlost svařování či ohniskovou vzdálenost) lze přesně nastavit. Výkon lze regulovat pomocí elektrické energie vpouštěné do laseru a parametry týkající se rychlosti posuvu a trajektorie lze naprogramovat do instrukcí robotického ramena. Robotická ramena v kombinaci s vláknovými či pevnolátkovými lasery umožňují využít strojové přesnosti pro přesné provedení vstupních parametrů a optická vlákna pro svařování i v obtížných pozicích (u plynových laserů je nutné použít zrcadla). Nastavením vhodných parametrů a jejich přesným dodržením je možné dosáhnout kvalitních svarů a malé tepelně ovlivněné oblasti, což znamená, že změny ve struktuře materiálu a deformace vlivem teploty jsou omezené pouze do těsného okolí svarového spoje. Pokud je laser umístěn na robotickém rameni, je proces laserového svařování možno řídit na dálku pomocí předem připraveného

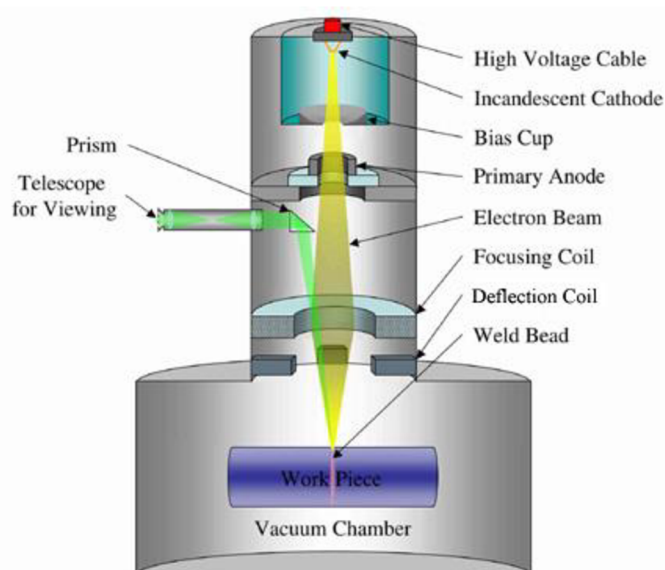
programu, ve kterém jsou nadefinovány parametry svařování a trajektorie. Robotické rameno s laserem zadané instrukce automaticky po spuštění provede. Řízení na dálku umožňuje personálu být mimo dosah záření, a vyhnout se tak jakékoliv kontaminaci. Laserové svařování je velmi přesné, což umožňuje svařovat i mikročipy nebo jinou mikroelektroniku. Provoz laseru je oproti jiným svařovacím metodám, jako je např. svařování plasmou, velmi tichý. Také umožňuje svařování materiálů s magnetickými vlastnostmi. [4] [6]

Nevýhody

Účinnosti současných laserů jsou stále malé a většina dodané energie není účinně využívána. Navíc část energie vyzářené laserem může být v případě vysoce reflektivních materiálů odražena, což způsobí další zmenšení celkové energie, která je absorbována materiálem. Laserové svařování vyžaduje do určité míry úpravu budoucích svarových ploch před svařováním a svařovaná součást musí být pevně uchycena, aby se nenarušila přesnost parametrů a s tím také kvalita svaru. [6]

3.1.4 Elektronové svařování

Elektronové svařování využívá k zahřátí materiálu energii vzniklou dopadem elektronů na svařovaný materiál. Sestava elektronového svařování se skládá ze záporně nabitě katody (většinou wolframový drát), kladně nabitě anody a usměřovacích cívek (obr. 3.4 [32]). Elektrony se uvolňují z katody a jsou přitahovány k anodě. Elektrony mezi katodou a anodou jsou urychlovány pomocí vysokého napětí. Rychlost elektronů je tak velká, že proletí skrz anodu a pokračují dále v pohybu. Za anodou se nacházejí magnetické usměřovací cívky, které usměrní tok elektronů a fokusují ho do jednoho bodu. Elektrony dopadají do zaměřeného bodu, při dopadu dochází k odražení části elektronů a zbývající elektrony pronikají do materiálu. Elektrony, které pronikly dovnitř materiálu, postupně ztrácejí svou kinetickou energii, kterou předávají atomům svařovaného materiálu ve formě tepla. Celý proces elektronového svařování musí probíhat ve vakuu, a to z několika důvodů. Přítomnost molekul vzduchu na dráze mezi generátorem elektronů a svařovaným materiálem by způsobovala nižší efektivitu, protože by docházelo ke srážkám mezi elektrony a molekulami vzduchu, což by mělo za následek zpomalení proudu elektronů. Dále přítomnost vakua chrání nově vzniklý svar před oxidací a vznikem nečistot, takže není nutné používat jinou ochranu atmosféru. Přítomnost vakua také zabraňuje vzniku elektrického oblouku (elektrických výbojů) mezi elektrodami. Při elektronovém svařování se může využívat přídavného materiálu, ale není to nutnou podmínkou. [4] [6]



Obrázek 3.4 – Sestava na svařování elektronovým paprskem [32]

Výhody

Při elektronovém svařování lze dosáhnout vzniku velmi kvalitních svarů. Dále je možno přesně ovlivňovat parametry svařování jako výkon paprsku a fokusace elektronového toku pomocí regulace vypouštěného elektrického proudu do katody a zaostřovacích cívek. Možnost nastavení proudu elektronů umožňuje dosažení hlubokého průvaru s minimálním TOO a minimální deformací v okolí svaru. Jelikož se celý proces svařování odehrává ve vakuu, je možno svařovat i chemicky aktivní kovy jako titan (Ti), zirkonium (Zr) nebo molybden (Mo). Bez vakua by tyto kovy reagovaly se vzduchem a došlo by k vytvoření nečistot a zhoršení mechanických vlastností svaru. Elektronové svařování se provádí strojově, což umožňuje větší přesnosti než manuální svařování. [6]

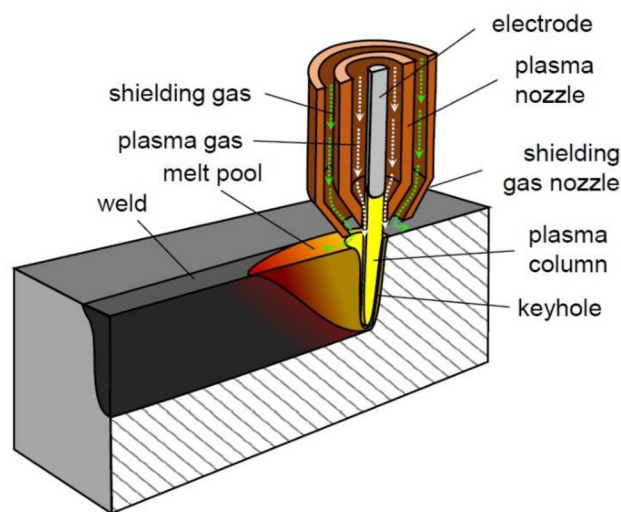
Nevýhody

Pořizovací cena celé svařovací sestavy a potřebné vakuové komory je velmi vysoká, tudíž představuje velkou počáteční investici a je vhodná spíše pro oblasti, kde převyšuje požadavek na kvalitu jednotlivých svarů nad jejich kvantitou. Při elektronovém svařování dochází ke vzniku rentgenového záření, z čehož vyplývá, že komora musí být opatřena ochranným pláštěm, aby nedošlo k ozáření obsluhy. Další nevýhodou je nutnost přesného opracování svarových ploch a jejich očištění před svařováním (např. odmaštění). [4] [6]

3.1.5 Plasmové svařování

Plasma neboli ionizovaný plyn je čtvrté skupenství hmoty. Při ionizaci plynu dojde k uvolnění jeho valenčních elektronů z orbitalů a plyn začíná vést elektrický proud. Tento proces je energeticky náročný, a proto se při plasmovém svařování využívá k ionizaci plynu elektrický oblouk, který dodává dostatečné množství energie (tepla). Ionizovaný plyn se při dopadu na materiál spojuje na atomární úrovni na celé atomy a zbylou energii předává materiálu, který je zahříván. Při svařování plasmou se používají až tři svařovací plyny. Jedná se o plasmový plyn, který se ionizuje, fokusační plyn, který zajišťuje zúžení paprsku a jeho následné lepší

zaměření, a ochranný plyn, který slouží jako ochranná atmosféra před oxidací. Sestava plasmového svařování se skládá z netavicí se wolframové elektrody a dvou (popřípadě tří) přívodů svařovacích plynů (viz obr. 3.5 [33]). Pokud se využívá přídatný materiál, tak do sestavy přibývá ještě podavač drátu (přídatného materiálu). Plasmové svařování je možno provádět buď ručně s plasmovým hořákem anebo s pomocí robotického ramene se sestavou na plasmové svařování. Svařování plasmou lze použít u celé řady materiálů, např. u různých druhů ocelí, mědi, titanu, niklu a jejich slitin. Navíc lze plasmové svařování využít u materiálů, které nelze svařovat běžnými technologiemi; převážně se jedná o vysoce legované žáruvzdorné a korozivzdorné oceli. [4] [6] [13]



Obrázek 3.5 – Sestava plasmového svařování [33]

Výhody

Jelikož šířka proudu plasmy je větší než šířka laserového či elektronového paprsku, lze svařovat části od sebe vzdálené o větší mezeru než u dvou předchozích způsobů svařování. Dále materiál svařovaný plasmou nepotřebuje (do určitých rozměrů) technologické úpravy jako sražení hran anebo zjemnění drsnosti budoucích svarových ploch. [13]

Nevýhody

Zařízení pro plasmové svařování jsou drahá na údržbu. Dále je svařování plasmou velmi hlučné a vzniká při něm kouř a škodlivé plyny, které je třeba odvádět z pracoviště a případně i filtrovat. V případě použití ručních plasmových hořáků jsou tato zařízení obtížně ovladatelná a manipulace s nimi je pro obsluhu fyzicky náročná. Z tohoto důvodu je lepší přecházet na mechanizované sestavy plasmového svařování. [6] [13]

3.2 Příprava metalografických vzorků

Struktura kovů je složena z mnoha fází. Rozdílná struktura materiálu znamená rozdílné vlastnosti. Aby bylo možné pozorovat strukturu materiálu, je třeba nejprve připravit metalografický vzorek. Metalografický vzorek je část kovové součásti oddělená vhodným způsobem tak, aby byl vzorek charakteristický pro danou součást a zpracována tak, aby bylo možné pozorovat mikrostrukturu, popř. makrostrukturu vzorku. [14]

3.2.1 Odběr vzorku

Metalografický vzorek se připravuje ze vzorku odebraného ze zkoumané součásti. Odběr je nutné provádět tak, aby si vzorek zachoval stejnou strukturu, jako má materiál součásti (vzorek musí být charakteristický pro daný materiál), ze které je odebírán; to znamená, že při odebírání nesmí být vzorek příliš tepelně namáhán (např. při řezání vzorku je třeba intenzivně chladit, aby nedošlo ke změně struktury vlivem tepla) ani mechanicky příliš zatížen (např. stříháním u plechů), aby nedošlo ke změně jeho struktury a byl stále charakteristický pro zkoumanou součást. V případě nestejnorodosti struktury materiálu (např. materiál po tváření – protažení zrn v jednom směru) je třeba ze zkoumané součásti odebrat více vzorků. Vzorky bývají odebírány z míst, kde hrozí riziko lomu nebo jiného poškození, anebo v místě, kde proběhla nějaká technologická operace (např. v místě svaru). Nejčastější forma odběru je vyříznutí vzorku ze součásti pomocí pilového kotouče. Pokud je vyříznutý vzorek moc velký, lze ho zmenšit v laboratoři na metalografické pile. [14] [15]

3.2.2 Preparace

Dále probíhá preparace vzorku. Preparací se zvětší pracovní plocha celého vzorku tak, aby se s ním dalo snadněji manipulovat a hlavně, aby se mohl v dalších krocích rovnoměrně brousit po celé ploše. [14]

Druhy preparace:

- **Zalévání za studena**

Vzorek je vložen do formy o požadovaném tvaru zkoumanou plochou na dno formy. Následně se smíchají jednotlivé složky zalévací pryskyřice a vzorek se zalije tekutou pryskyřicí (epoxidovou, akrylátovou nebo polyesterovou). Po zalití dochází k polymeraci a pryskyřice tuhne podle typu pryskyřice od několika minut až po 24 hodin. Zalévání za studena se využívá u vzorků, které nesmí být vystaveny vysoké teplotě a tlaku anebo jsou příliš velké na to, aby se vešly do lisovací komory. [15] [16] [17]

- **Zalisování za tepla**

K zalisování za tepla se využívají jednokomorové či vícekomorové elektrohydraulické lis. Vzorek se položí do komory lisu a zasype se pryskyřicí ve formě prášku (je možné použít i dva druhy prášku na jeden vzorek). Lis v sobě většinou mají zabudovaný dávkovač, který zajišťuje, že každý vzorek bude zasypán nastaveným objemem pryskyřice. Poté se zapne lis a vzorek se za vysoké teploty (100 ÷ 180 °C) a tlakové síly (30 ÷ 50 kN) zalisuje. Proces zapékání a následného ochlazení zabere přibližně

10 minut. Jedná se o rychlejší a díky automatizaci procesu snadnější proces než zalévání za studena. Zalisování za tepla se používá u vzorků, kde nehrozí poškození struktury vlivem vysoké teploty anebo tlaku. [15] [16]

- **Vakuová impregnace**

Při vakuové impregnaci dochází k zalévání vzorků a jejich vytvrzení za sníženého tlaku. Vzorek se vloží do komory, která je větší než u lisování za tepla. Pomocí dávkovacího systému se každá forma v komoře naplní nastaveným množstvím tekuté pryskyřice (zde je využívána pouze epoxidová pryskyřice), poté se přístroj zapne a dochází k vytvrzování pryskyřice po dobu přibližně 8 hodin. Vakuová impregnace se využívá u vzorků, které vykazují vysokou pórovitost anebo obsahují trhliny. [16]

3.2.3 Broušení

Při broušení dochází k odstranění rýh a jiných nerovností na povrchu vzniklých při odběru (řezání materiálu). Při broušení je odebírán materiál pomocí brusných kotoučů. Broušení probíhá v několika krocích, přičemž nejprve je použit hrubozrnný brusný kotouč a poté se s každým dalším krokem používá kotouč s jemnějšími zrny. Je důležité, aby při výměně kotoučů došlo k omytí jak vzorků, tak zařízení, aby nedošlo k přenosu hrubších zrn na jemnější kotouč. Přenos hrubších zrn by způsobil poničení kotouče a poškrábání broušeného vzorku. Kromě brusných kotoučů obsahujících částice SiC, Si₃N₄, Al₂O₃, ZrO₂, B₄C nebo diamantu různých rozměrů (od 250 až po 10 mikrometrů) lze také používat brusné papíry obsahující částice SiC nebo Al₂O₃. Výhoda brusných kotoučů oproti brusnému papíru je jejich menší opotřebení, a tedy delší životnost. Při broušení je nutné vzorek intenzivně chladit, aby nedošlo k tepelné modifikaci struktury nebo vzniku tzv. Beilbyho vrstvy (viz níže). [14] [16]

Beilbyho vrstva

Beilbyho vrstva (někdy zvaná pouze B-vrstva) je vrstva deformačně zpevněného materiálu na povrchu broušeného/leštěného vzorku. Vzniká při příliš vysoké rychlosti broušení (větší teplota) a při příliš velkém přitlaku (větší deformace), když není vzorek dostatečně chlazen. Čím méně je vzorek chlazen, tím tlustší Beilbyho vrstva vzniká (běžná tloušťka je několik desetin milimetru). B-vrstva znemožňuje pozorování struktury materiálu, proto je nutné ji odstranit. Odstraňování se provádí broušením/leštěním s intenzivnějším chlazením a upravenými parametry. Beilbyho vrstva vzniká u broušení vždy, ale chlazením můžeme omezit její tloušťku na co nejmenší. [15] [17]

Druhy broušení:

- **Ruční**

Při ručním broušením je třeba dbát na to, aby byl vzorek v kontaktu s brusným papírem celou svou plochou. Ručně je možno brousit jak za mokra, tak za sucha a používá se brusný papír. Chlazení zde není nutné, protože při ručním broušení nedochází ke vzniku tak vysokých teplot, jako u jiných způsobů broušení. Nejprve je vzorek ručně broušen na brusném papíru v stále v jednom směru, po výměně brusného papíru (za jemnější) a opláchnutí je vzorek broušen kolmo na předchozí směr. Vzorek je broušen tak dlouho,

dokud nezmizí drážky a rýhy vzniklé při broušení v předchozím směru. Tento proces se opakuje, dokud vybroušená plocha nevyhovuje zadaným požadavkům. [14]

- **Mechanické**

Při mechanickém broušení se využívá metalografických brusek. Tyto brusky mají rotující kotouč s brusným papírem uložený ve vodorovné rovině. Na tento kotouč je broušený vzorek ručně přitlačován, zatímco je chlazen vodou. Chlazení je u tohoto způsobu broušení už nezbytné, jelikož při rychlosti otáčení 30 až 150 ot/min by mohlo dojít k tepelné změně struktury nebo vzniku Beilbyho vrstvy. Při výměně brusného papíru za jemnější se vzorek oplachuje a poté otáčí o 90 stupňů stejně jako u ručního broušení. [15]

- **Poloautomatické**

Při poloautomatickém broušení se využívá stejného zařízení (metalografické brusky) jako u mechanického broušení, ale tato bruska je navíc opatřena otočnou hlavou a displejem s uživatelským rozhraním. Na displeji je možno nastavit parametry broušení, jako velikost přitlaku vzorku na brusný papír (popř. kotouč), což zaručuje lepší reprodukovatelnost vzorků než předchozí dva druhy broušení. Na otočné hlavě je zabudovaný unašeč, který umožňuje broušení více vzorků najednou (většinou 3 nebo 5). Unašeč rotuje v opačném směru, než rotuje plocha s brusným papírem (popř. kotoučem). Kvůli vysokým otáčkám je při poloautomatickém broušení nutné používat chlazení (z výše zmíněných důvodů). Při výměně brusného papíru (popř. kotouče) je nutné jak vzorky, tak unašeč důkladně opláchnout. [15] [16]

- **Automatické**

Automatické broušení využívá metalografických brusek se stejnou stavbou jako poloautomatické. Postup a princip broušení je také stejný jako u poloautomatického broušení. Automatické brusky navíc disponují pokročilejším uživatelským rozhraním, které umožňuje nastavit určité kombinace přitlaků a časů do programů pro určité materiály. Toto umožňuje nejlepší reprodukovatelnost ze všech druhů broušení, jelikož pro daný materiál je možno použít stejné parametry (včetně doby broušení) jako u předchozí skupiny vzorků ze stejného materiálu. [16]

3.2.4 Leštění

Leštění následuje po broušení a dochází při něm k odstranění rýh vzniklých při procesu broušení. Jedná se o proces, při kterém se odebírá minimum materiálu a při kterém se vlivem deformace značně zvyšuje kvalita povrchu (snižuje drsnost). Leštění usnadňuje následné leptání a po leštění je možno pozorovat na vzorku pod mikroskopem různé makroskopické vady, nikoliv však jeho mikrostrukturu. [15]

Druhy leštění:

- **Mechanické**

Mechanické leštění je nejběžnější druh leštění a je podobné jako broušení. Také může probíhat ve více krocích při využití více leštících kotoučů. Leštění probíhá buď na metalografických leštičkách, které zaručují zvolený přitlak a otáčky, stejně jako u broušení, anebo manuálně. Místo brusných kotoučů jsou do procesu leštění zaváděny

leštící suspenze nebo pasty spolu se smáčedlem. Tato leštící média obsahují částice diamantů daných velikostí (desítky až desetiny mikrometrů), Al_2O_3 , Cr_2O_3 nebo MgO . Tyto suspenze se buď ručně anebo pomocí dávkovače nanášejí na leštící kotouč, který je vyroben z textilu (satén, umělé hedvábí nebo případně jiné syntetické textilie). Díky nižším otáčkám a nižšímu přítlaku není třeba intenzivního chlazení jako u broušení a k ochlazení stačí suspenze se smáčedlem. Na povrchu vzorku vzniká v průběhu operace tenká Beilbyho vrstva, která musí být později odstraněna. Mezi jednotlivými kroky leštění je nutné opět opláchnout jak vzorek, tak unašeč (pokud ho používáme), aby nedošlo ke znehodnocení vzorku a poškození kotouče. [14] [16]

- **Mechanicko-chemické**

Mechanicko-chemické leštění probíhá vždy až po předchozím mechanickém leštění a bývá posledním krokem před přechodem na leptání. Jedná se o kombinaci mechanického leštění a chemického naleptávání. Probíhá na metalografických leštičkách vybavených automatickým dávkovačem leštícího média. Jako leštící médium se podle typu materiálu používá nejčastěji koloidní roztok SiO_2 nebo Al_2O_3 . Mechanicko-chemické leštění se provádí pouze jedenkrát oproti vícekrokovému procesu u pouze mechanického leštění. [16]

- **Elektrolytické**

Elektrolytické leštění probíhá vždy až po předchozím mechanickém leštění. Provádí se na automatizovaných přístrojích přímo určených pro tento druh leštění. Při tomto typu leštění je leštěný vzorek plně ponořen v elektrolytu (roztoky kyselin nebo hydroxidů) a je zapojen jako anoda. Po připojení vzorku a nastavení potřebných parametrů přístroje dochází k průchodu elektrického proudu mezi katodou (ocelová deska) umístěnou v nádrži a vzorkem. Průchod elektrického proudu skrz vzorek způsobí vytvoření tenké vrstvy korozních produktů na povrchu vzorku. Tato vrstva zakrývá povrchové výstupky a zaplňuje prohlubně na povrchu vzorku, přičemž postupně dochází k rozpouštění výstupků a vyhlazování povrchu. Při elektrolytickém leštění není materiál tepelně ani mechanicky výrazně namáhán, tudíž nevzniká Beilbyho vrstva. Nevýhodou je komplikovanost a neuniverzálnost procesu a také nežádoucí naleptání vzorku, které může mít za následek poškození sledované struktury. Po leštění je vzorek omyt od elektrolytu nejprve vodou a následně etanolem a poté je vysušen. [14] [15] [16]

3.2.5 Leptání

Leptání je finální operací přípravy metalografického vzorku a po naleptání už je možno pozorovat mikrostrukturu materiálu. Při leptání dochází k odstranění Beilbyho vrstvy, která vznikla při předchozích operacích metalografické přípravy vlivem působení chemikálií. Každý materiál má dané konkrétní leptací činidlo a čas, po který se leptá. [14]

Druhy leptání:

- **Chemické**

Při chemickém leptání je vzorek ponořen do leptadla. Leptadla jsou většinou roztoky kyselin a etanolu. Po uplynutí daného času je vzorek vytažen, opláchnut vodou a etanolem a vysušen. [16]

Na hranice zrn

Jedná se o nejčastější způsob leptání. Leptadlo napadá hranice zrn (kvůli vyšší volné energii atomů v místě dotyku zrn), a tímto dochází ke zviditelnění hranic jednotlivých zrn, která lze dále studovat. [15]

Plošné

Jedná se o způsob leptání využívaný k rozlišení jednotlivých zrn materiálu.

„Různě orientovaná zrna jsou naleptána do různé hloubky, protože každé krystalografické rovině přísluší jiná energie. Důsledkem je vznik různě hlubokých stupňů na původně vyleštěném rovinném povrchu. Světelné paprsky dopadající na tyto stupně se odráží do objektivu s různou intenzitou, a při pozorování světelným mikroskopem se tedy jednotlivá zrna jeví tmavší nebo světlejší., [15]

Selektivní

Jedná se o způsob leptání využívaný k leptání vícesložkových směsí (např. perlitická struktura).

„Fáze přítomné na povrchu vzorku mají různé chemické složení, a proto také odlišně odolávají leptacím činidlům. Některé fáze se rozpouštějí rychleji, jiné pomaleji. Některá leptadla vytvářejí na povrchu vzorku oxidické vrstvy, které mají na zrnech různých fází rozdílnou tloušťku. Tato zrna mají vzhledem k interferenci světla v oxidické vrstvičce různá zbarvení., [16]

- **Elektrolytické**

Elektrolytické leptání se využívá u materiálů, které jsou odolné vůči chemickým leptadlům. Proces elektrolytického leptání je stejný jako u elektrolytického leštění (viz výše). [15]

- **Tepelné**

Tepelné leptání se využívá u nevodivých materiálů (např. keramika). Při tomto druhu leptání vzniká za zvýšené teploty na povrchu vzorku oxidická vrstva. Nad každou částí struktury (zrna, hranice zrn nebo fáze) se vytvoří vrstva jiné tloušťky. Každá tloušťka vrstvy má jinou propustnost světla, a tudíž se ve výsledku pod mikroskopem zobrazí s různým zbarvením. [15]

- **Iontové**

Iontové leptání se využívá u nevodivých materiálů (např. keramika). Probíhá na principu ostřelování povrchu vzorku energií nabitými ionty argonu. Ionty po nárazu předávají energii povrchovým atomům, tato energie je dostatečná na zániknutí vazby a zasažený atom se odpojí od povrchu. Uvolněné atomy jsou odsávány pryč od vzorku. [17]

Výše uvedeným způsobem vyrobený metalografický vzorek je připraven k pozorování mikrostruktury pomocí optické mikroskopie a zaznamenání vnitřní struktury materiálu na metalografickém mikroskopu.

3.3 Tvrdość a její měření

Tvrdość je definována jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Existuje mnoho zkoušek tvrdości, které se dělí podle vzniklé deformace povrchu zkoušeného materiálu (elastické a plastické) a podle způsobu zatěžování v průběhu zkoušky (statické a dynamické). do tří skupin, a to staticko-plastické, dynamicko-plastické a dynamicko-elastické. Detailnější rozdělení metod měření tvrdości je uvedeno v tabulce 3.1. [14] [17]

Tabulka č. 3.1: Rozdělení metod měření tvrdości [17]

| Metody měření tvrdości | | |
|------------------------|---------------------|---------------------|
| Staticko-plastické | Dynamicko-plastické | Dynamicko-elastické |
| Brinell | Poldiho kladívko | Shoreho skleroskop |
| Vickers | Baumannovo kladívko | duroskop |
| Rockwell | | |

3.3.1 Tvrdość podle Vickerse

Zkouška podle Vickerse je založena na principu vtlačování definovaného indentoru do zkoumaného materiálu a měření rozměrů vtisku, který po indentoru zůstal. [17]

Zkouška podle Vickerse je definována normou ČSN EN ISO 6507. Tato norma má tři části, přičemž částí jedna a dvě se věnují klasické tvrdości podle Vickerse a třetí část popisuje určování tzv. mikrotvrdości podle Vickerse. [17] [18]

Průběh zkoušky

Zkouška měření tvrdości probíhá na tvrdoměru, který musí splňovat požadavky dále specifikované ve výše uvedené normě. Diamantový indentor, tj. čtyřboký jehlan s vrcholovým úhlem rovným 136° , je vtlačován do zkoumaného materiálu vlivem zvoleného zatížení. Povrch zkoumaného materiálu musí být řádně očištěn a opracován, proto se měření tvrdości podle Vickerse provádí na metalografických vzorcích. Po proniknutí do materiálu působí zkušební zatížení po stanovenou dobu, která v případě plného zatížení musí být v intervalu 10 až 15 sekund. Poté dochází k odlehčení indentoru a následně probíhá měření uhlopříček vtisku, který zůstal po vtlačení indentoru, jak lze vidět na obrázku 3.6 [34]. K měření uhlopříček se využívá mikroskopů propojených s počítačovým rozhraním. Z délky uhlopříček d_1 a d_2 je určena průměrná hodnota d a ta je použita k výpočtu tvrdości podle níže uvedeného vzorce; je zřejmé, že tvrdość je určena poměrem zatížení (síly) a plochy vtisku. Z tohoto lze vyvodit, že tvrdość má charakter napětí. Moderní tvrdoměry již umožňují celý tento proces částečně automatizovat tak, že po provedení vtisku stačí pouze vycentrovat objektiv připojeného mikroskopu na vtisk a počítačový program změří uhlopříčky vtisku a přepočítá jejich délky spolu se zvoleným zatížením na výslednou hodnotu tvrdości. [14] [17] [18]

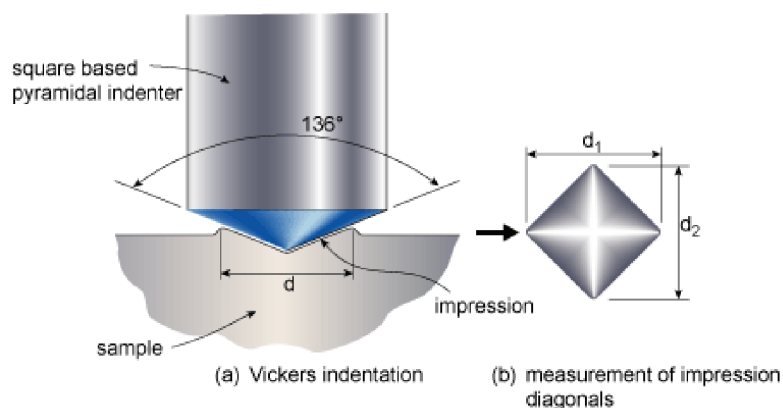
Vztahy pro výpočet tvrdosti podle Vickerse: [17]

$$HV = 0,102 * \frac{2 * F * \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 0,1891 * \frac{F}{d^2}$$

F – zatěžující síla

d – aritmetický průměr uhlopříček

α – vrcholový úhel indentoru (jehlanu)



Obrázek 3.6 – Měření tvrdosti podle Vickerse [34]

Mikrotvrdomost podle Vickerse

Speciálním případem tvrdosti je tzv. mikrotvrdomost, která se měří pouze podle Vickerse. Měření mikrotvrdomosti podle Vickerse probíhá na stejném principu a podle stejného vzorce jako měření tvrdosti podle Vickerse, ale zvolené zatížení při zkoušce musí být menší než HV 0,2 (0,2 kg = 1,961 N). Používaný indentor je taky shodný jako u zkoušky tvrdosti podle Vickerse a používaný tvrdoměr musí být schopen vytvořit dostatečně malé zatížení, aby odpovídalo rozsahu zatížení pro mikrotvrdomost. Opět se využívá kombinace mikroskopu propojeného s počítačem pro usnadnění a zpřesnění měření. [14]

3.3.2 Měření tvrdosti svarů

Měření tvrdosti (případně mikrotvrdomosti) svarů je prováděno v řadách; pro materiály s tloušťkou menší než 5 mm je provedena pouze jedna řada vtisků, zatímco pro materiály s tloušťkou větší než 5 mm jsou prováděny dvě řady vtisků. Každá řada vtisků musí obsahovat vtisky ze všech oblastí svaru, což jsou ZM, TOO a SK. V každé z těchto jmenovaných oblastí musí být provedeny alespoň tři platné vtisky. Pokud nemá být svar vyhodnocen jako rizikový, nesmí hodnota tvrdosti v TOO ani v oblasti SK překročit určitou hodnotu, která je závislá na druhu oceli. Pro uhlíkové oceli a je maximální přípustná hodnota 380 HV. Tyto údaje detailněji popisuje norma ČSN EN 15614-1 o zkouškách postupů svařování. Laserové svařování je popsáno v normě ČSN EN 15614-11; nejsou v ní však uvedeny maximální povolené hodnoty tvrdostí svarů, proto se u laserové svařování v praxi používají hodnoty specifikované v normě ČSN EN 15614-1. [19] [20]

4 Experimentální část

4.1 Výběr materiálu

Pro studium vlivu tloušťky plechu na tvrdost materiálu svarového spoje byly vybrány jako základní materiály oceli S500MC a S355J2C + N ve formě plechů tlouštěk 2 a 4 mm. Tyto materiály a zmíněné tloušťky se běžně používají při svařování podvozků a vnějšího opláštění vozových skříní vlaků ve firmě BT-CZ.

Cílem experimentu bylo ověřit, které kombinace typu materiálů, tlouštěk plechů a svařovacích výkonů vyhovují požadavkům firmy na kvalitu svaru.

4.1.1 S500MC

Jedná se o jemnozrnnou ocel určenou na ocelové konstrukce (S). Hodnota její meze kluzu je minimálně 500 MPa (500). Ocel je termomechanicky válcovaná (M) a vykazuje zvláštní tvařitelnost za studena (C). Termomechanické válcování spočívá v tom, že finální deformace výrobku probíhá pouze v určitém rozmezí teplot, což umožňuje získat určité vlastnosti, které by standardním válcováním ani pozdějším tepelným zpracováním u daného materiálu nebyly dosažitelné. [21]

Tabulka 4.1 udává chemické složení dané oceli. V druhém řádku tabulky jsou uvedené rozsahy chemických prvků podle ČSN EN 10149-2 a ve třetím a čtvrtém řádku jsou pro porovnání uvedeny experimentálně naměřené hodnoty konkrétních plechů, které byly použity na měření tvrdosti.

Tabulka č. 4.1: Chemické složení oceli S500MC [22]

| | C | Mn | Si | P | S | Nb | V | Ti | Mo | B |
|-----------------------------------|-----------|-----------|----------|------------|------------|-----------|-----------|------------|----|---|
| Rozsah z normy [%] | max. 0,12 | max. 1,70 | max. 0,5 | max. 0,025 | max. 0,015 | max. 0,09 | max. 0,20 | max. 0,150 | - | - |
| Naměřené hodnoty pro tl. 2 mm [%] | 0,100 | 0,712 | 0,005 | 0,014 | 0,005 | 0,028 | 0,002 | 0,044 | - | - |
| Naměřené hodnoty pro tl. 4 mm [%] | 0,087 | 0,717 | 0,006 | 0,015 | 0,005 | 0,037 | 0,003 | 0,047 | - | - |

4.1.2 S355J2C + N

Jedná se o ocel určenou na ocelové konstrukce (S). Hodnota její meze kluzu je minimálně 355 MPa (355). Hodnota nárazové práce je 27 J při teplotě $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (J2). Ocel vykazuje zvláštní tvařitelnost za studena (C). Ocel byla tepelně zpracována, a to normalizačním žiháním či normalizačním válcováním při výrobě (+N). [21]

Tabulka 4.2 udává chemické složení dané oceli. V druhém řádku tabulky jsou uvedené rozsahy chemických prvků podle ČSN EN 10025-2 a v třetím a čtvrtém řádku jsou pro porovnání

uvedeny experimentálně naměřené hodnoty konkrétních plechů, které byly použity na měření tvrdosti.

Tabulka č. 4.2: Chemické složení oceli S355J2C + N [23]

| | C | Si | Mn | P | S | N | Cu |
|-----------------------------------|----------|-----------|----------|------------|------------|--------|-----------|
| Rozsah z normy [%] | max. 0,2 | max. 0,55 | max. 1,6 | max. 0,025 | max. 0,025 | max. - | max. 0,55 |
| Naměřené hodnoty pro tl. 2 mm [%] | 0,175 | 0,005 | 1,44 | 0,023 | 0,005 | - | 0,007 |
| Naměřené hodnoty pro tl. 4 mm [%] | 0,150 | 0,009 | 1,32 | 0,012 | 0,005 | - | 0,076 |

4.2 Svařování

Před svařováním dané plechy prošly úpravou. Standardní postup zahrnuje očištění, odmaštění a sražení hran plechu přibližně 25 mm od osy budoucího spoje (svaru). V popisovaném experimentu nebyly spojovány dva plechy, nýbrž došlo pouze k vytvoření návarů na plechy; nebylo proto potřeba srážet hrany, ale pouze plechy očistit a odmastit. [24]

Na každý plech byly navařeny 3 návary (různými výkony laseru) pomocí robotického ramene ABB s laserovou hlavou Precitech IW-52. Proces je zcela automatizovaný, probíhá v odstíněné hale a je pozorován kamerou z kontrolního stanoviště. Odstínění je nutné kvůli ochraně před zářením vznikajícím při laserovém svařování a rovněž pro prevenci úrazu od laseru anebo od robota. Při svařování jsou plechy magneticky upnuté na pojízdné plošině, což zabraňuje tomu, aby během svařování došlo k posuvu anebo zvlnění plechů vlivem tepelné deformace. [24]

Po dokončení svařování laserem nedošlo k žádné následné tepelné úpravě svarů. V praktických aplikacích ve firmě BT-CZ dochází ke zbroušení přečnívajících kořene svaru do roviny základního materiálu, aby při následném nanášení tmelu a laku nenarušoval rovinnost plochy. [24]

4.2.1 Laser

Ke svařování byla využívána laserová sestava skládající se z laserového zdroje IPG YLS-5000, tří laserových hlav Precitech YW-52 (obrázek 4.1 [35]) a podavače drátu (přídavného materiálu) Abicor Binzel Master Feeder. Laserový zdroj IPG YLS-5000 má maximální výkon 5000 W. Jedná se o pevnolátkový vláknový zdroj laseru využívající yterbium, který produkuje infračervený laserový paprsek. Tento paprsek, jenž je pomocí optických vláken doveden ke kolimátoru. V sestavě je při podávání drátu využívána tzv. metoda Cold Wire, což znamená, že drát není před vstupem do laserového paprsku nijak nepřehříván. Podavač drátu se skládá ze dvou podavačů, z nichž jeden tlačí a druhý táhne drát do místa svařování. Laserové hlavy a podavač drátu jsou umístěny na robotickém rameni ABB IRB 6620, které umožňuje pohyb

v šesti osách. Toto rameno je umístěno na portál umožňující posuv celého ramene v podélném směru se svarem a dále obsahuje ještě dvě autonomní osy, které jsou využívány ke korekci (viz níže). Robotické rameno je nezbytné, jelikož zaručuje strojovou přesnost, naprosto nezbytnou u laserového svařování, při němž je nutné udržovat stabilní ohniskovou vzdálenost, konstantní rychlost posuvu a pohyb po přesné trajektorii, čehož lidská ruka není schopná. Na laserové hlavě (kolimátoru) je navíc namontovaná kamera a laserový senzor, který kontroluje svarovou spáru přibližně 180 mm před místem interakce laseru s materiálem a na základě dat získaných z kamery a senzoru systém sám provádí v průběhu svařování úpravy parametrů svařování (např. výkon či rychlost podávání drátu). Stejným způsobem kontroly lze také provádět korekce polohy laserového paprsku ve spáře a upravovat jeho trajektorii za pomoci dvou výše zmíněných autonomních os. Jak zdroj, tak laserová hlava vyžadují v průběhu svařování intenzivní chlazení vodou. [24] [25] [26]



Obrázek 4.1 – Laserový kolimátor Precitech YW-52 [35]

4.2.2 Přídavný materiál

Jako přídavný materiál se při svařování ve firmě BT-CZ používá Sanox29 ve formě drátu. Jeho chemické složení udává tabulka 4.3. Údaje jako chemické složení a mechanické vlastnosti přídavného materiálu byly poskytnuty firmou BT-CZ v inspekčním certifikátu číslo 153845.1. [27]

Tabulka č. 4.3: Chemické složení Sanoxu29 [27]

| | C | Si | Mn | P | S | Cr | Mo | Ni | V | Cu |
|----------------------|--------|-----------|-----------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|
| Rozsah z normy [%] | ≤ 0,12 | 0,40-0,70 | 1,30-1,80 | ≤ 0,015 | ≤ 0,018 | 0,20-0,40 | 0,20-0,30 | 1,20-1,60 | 0,05-0,13 | ≤ 0,35 |
| Naměřené hodnoty [%] | 0,1 | 0,53 | 1,66 | 0,011 | 0,013 | 0,34 | 0,27 | 1,38 | 0,08 | 0,14 |

4.2.3 Parametry při svařování

Na plechy tloušťky 2 mm byly použity výkony 2 kW, 3 kW, 4 kW a na plechy tloušťky 4 mm výkony 3 kW, 4 kW a 5 kW. Nebylo možné všude použít stejný rozsah výkonů, neboť na tloušťku 2 mm byl výkon 5 kW už příliš velký a docházelo k řezání plechu, a ne k jeho svařování, a naopak pro tloušťku 4 mm byl výkon 2 kW pro vytvoření svaru nedostatečný (rozdělení výkonů viz tabulka 4.4).

Tabulka č. 4.4: Použité výkony laseru

| Tloušťka [mm] | Použitý výkon laseru [kW] | | | |
|---------------|---------------------------|---|---|---|
| | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 2 | ✓ | ✓ | ✓ | X |
| 4 | X | ✓ | ✓ | ✓ |

U všech kombinací tloušťky plechů a výkonů laseru byla použita konstantní:

- rychlost posuvu laserové hlavy
- rychlost podávání drátu
- ohnisková vzdálenost
- průměr laserového paprsku

Konkrétní hodnoty použitých parametrů jsou uvedeny v tabulce 4.5. Jako ochranná atmosféra u celého svařování laserem byl použit dusík.

Tabulka č. 4.5: Parametry svařování

| Parametr | Hodnota | Jednotka |
|---------------------------|---------|----------|
| Rychlost podávání drátu | 900 | mm/min |
| Rychlost posuvu | 2100 | mm/min |
| Průměr laserového paprsku | 1,2 | mm |
| Ohnisková vzdálenost | 300 | mm |

4.3 Příprava metalografických vzorků

Po svařování byly z plechů 150 x 400 mm (viz obr. 4.2) odřezány pásy A, B, C, D (viz obr. 4.3), které byly přeneseny do laboratoře. V laboratoři došlo k rozřezání těchto pásů na menší rozměry tak, aby bylo možné umístit 3 vzorky do jedné lisovací komory o průměru 50 mm; označení těchto vzorků je spolu s typem materiálu, tloušťkou plechu a výkonem laseru uvedeno v tab. 4.6. Vzorky byly zalisovány a poté podrobeny broušení, leštění a leptání.



Obrázek 4.2 – Plechy se svary



Obrázek 4.3 – Nařezané pásy A, B, C, D

Tabulka č. 4.6: Označení metalografických vzorků, výkony laseru a tloušťka použitého materiálu

| Tloušťka [mm] | | Materiál | Výkon laseru [kW] | | | |
|---------------|---|-------------|-------------------|----|----|----|
| | | | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 2 | A | S500MC | A1 | A2 | A3 | – |
| | B | S355J2C + N | B1 | B2 | B3 | – |
| 4 | C | S500MC | – | C1 | C2 | C3 |
| | D | S355J2C + N | – | D1 | D2 | D3 |

4.3.1 Řezání

Každý z plechů se svary bylo nutné nařezat a zmenšit na rozměr dostatečně malý na to, aby se vešel do formy na následné zalisování. Proces řezání proběhl na pile Struers Discotom-100 při použití kotouče 30A30 (viz obr. 4.4). Vzorek byl uchycen do svěraku tak, aby se jeho čelisti nedotýkaly svaru (aby nedošlo k deformaci svaru vlivem napětí u tenkých plechů). Následně byl daný vzorek nařezán, a to kolmo ke svarové ploše. Nařezaný vzorek byl umyt vodou a etanolem a vysušen.



Obrázek 4.4 – Pila Struers Discotom-100

4.3.2 Lisování

Vzorek byl vložen do lisu pro zalévání vzorků za horka Struers Citopress-20 (viz obr. 4.5), zkoumanou stranou dolů, zasypan jedenou dávkou tvrdé zalévací hmoty na vzorky (Black Epoxy Resin EPO) a dosypán měkčí doplňovací zalévací hmotou (Multifast Red). Po uzavření lisovací komory byl vzorek zalisováván za vysokého tlaku a teploty po dobu 9,5 minuty. Po zalisování a ochlazení byl vzorek z komory vyjmut, označen a přesunut na broušení.



Obrázek 4.5 – Lis Struers Citopress-20

4.3.3 Broušení a leštění

Broušení a leštění proběhlo na leštičce Struers Tegramin-30 (viz obr. 4.6). Broušení a leštění probíhalo ve čtyřech krocích, v každém kroku byl použit odlišný kotouč (případně suspenze), doba a přítlak, (tyto údaje jsou uvedeny v tabulce 4.7). V kroku číslo 1 dojde k hrubému obroušení vzorkové plochy od nerovností způsobených řezáním. V krocích 2 a 3 dojde k leštění povrchu a v kroku 4 dochází k přípravě na leptání. Po každém kroku byl vzorek umyt pod tekoucí vodou, aby nedocházelo k přenosu hrubších částic a suspenzí do dalšího kroku.

Tabulka č. 4.7: Kroky broušení a leštění

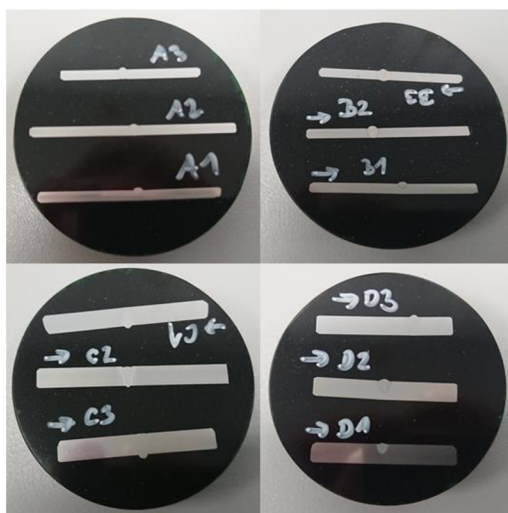
| Číslo kroku | Disk | Brusné/lešticí medium | Chladicí kapalina | Doba [min] | Přítlak [N] |
|-------------|----------------------|---------------------------|-------------------|------------|-------------|
| 1 | Struers MD Piano 220 | - | voda | 3 | 50 |
| 2 | Struers MD Largo | Diamantová suspenze | - | 4 | 40 |
| 3 | ATM Galaxy Sigma | Diamantová suspenze | - | 3 | 30 |
| 4 | ATM Galaxy Omega | Roztok koloidního křemíku | - | 2:40 | 15 |



Obrázek 4.6 – Leštička Struers Tegamin-30

4.3.4 Leptání

Před leptáním byl vzorek ještě jednou umyt vodou a etanolem. Leptání bylo provedeno potíráním vyleštěné plochy 1% roztokem Nitalu (1% HNO₃ + etanol). Na obrázku 4.7 jsou vyobrazeny všechny vzorky (A-D) po ukončení metalografické přípravy.



Obrázek 4.7 – Všechny vzorky po metalografické přípravě

Vzorky zpracované výše uvedeným způsobem byly pozorovány pod mikroskopem Olympus SZ61 (zvětšení 15x). Mikrostruktura byla pozorována pod mikroskopem Olympus BX51M při vhodném zvětšení; přitom byly všechny vzorky detailně nafoceny.

4.4 Měření tvrdosti

Tvrdost byla měřena na metalografických vzorcích pomocí tvrdoměru Struers Durascan-80 (obr. 4.8), který měří tvrdost podle Vickerse. Kvůli malé tloušťce vzorku a také malému rozměru tepelně ovlivněné oblasti (TOO) u některých vzorků (A1, A2) bylo zvoleno zatížení HV 0,1 ($0,1 \text{ kg} = 0,981 \text{ N}$), u vzorků s větší tloušťkou by bylo možné použít větší zatížení, ale z důvodu zachování stejných podmínek u celého měření bylo ponecháno HV 0,1. Tvrdoměr Struers Durascan-80 pracuje částečně automaticky, do naznačených pozic provede vpichy, poté zaznamená přes mikroskop stopy po indentoru, které uživatel následně vycentruje tak, aby se vtisk nacházel mezi horizontálními a vertikálními přímkami. Po vycentrování tvrdoměr přepočítá hodnoty uhlopříček vtisku na hodnotu tvrdosti (popř. mikrotvrdosti) podle Vickerse. Na každém vzorku (A1–D3) byly provedeny tři vtisky v každé z oblastí svaru (ZM, TOO, SK).



Obrázek 4.8 – Tvrdoměr Struers Durascan-80

4.5 Měření průvarů a jejich porovnání s výpočtem

Při laserovém svařování materiálů rozdílných tlouštěk různými výkony laseru dochází k nestejným průvarům materiálu. Určení správných vstupních parametrů pro vytvoření požadovanému průvaru je složité, protože na hloubku průvaru má vliv více parametrů než jen pouze samotný výkon laseru. Mezi další parametry patří rychlost svařování (posuvu), průměr laserového paprsku a materiálové charakteristiky svařovaného materiálu. Ideální nastavení všech těchto parametrů bez předchozích zkušeností s danými materiály a přístroji je složité, tudíž je snaha alespoň část těchto parametrů teoreticky vyhodnotit ještě před svařováním, aby bylo možné zjistit, jakého průvaru lze ve výsledku dosáhnout, a podle toho upravit vstupní parametry. Právě teoretickým výpočtem hloubky průvaru v závislosti na materiálových a technologických charakteristikách se zabývá výpočtový vztah Metzbower, který je uveden níže.

Výpočtový vztah pro hloubku průvaru metodou Metzbower: [28]

$$s = 0,10618 * \left(\frac{P}{\lambda * T_M} \right) * \left(\frac{v_{sv} * d_s}{\kappa} \right)^{-1,2056}$$

s – hloubka průvaru

P – výkon laseru

λ – tepelná konduktivita při pokojové teplotě

T_M – teplota tavení oceli

v_{sv} – rychlost posuvu

d_s – průměr laserového paprsku

κ – tepelná difuzivita při pokojové teplotě

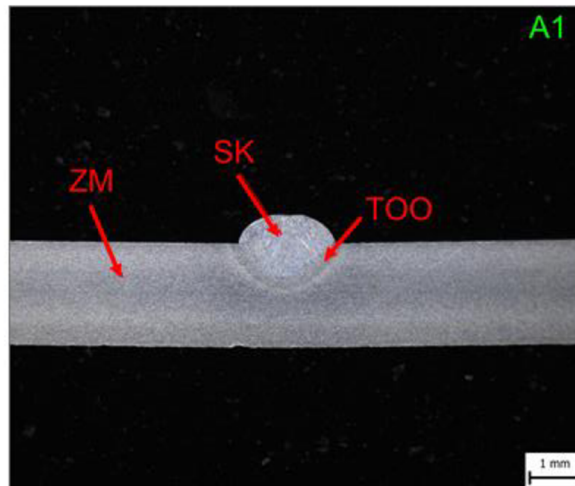
Podle uvedeného vzorce byly pro parametry použité u svařování vzorků a materiálové charakteristiky poskytnuté firmou dopočítány hloubky průvarů pro jednotlivé výkony. V další části práce byla zkoumána shoda hloubky průvaru predikované metodou Metzbower a experimentálně zjištěné na pomoci měření hloubky průvaru na makrosnímčích vzorků se svary zhotovenými pro měření tvrdosti. Získané hodnoty jsou uvedeny v kapitole 5.2 v tab. 5.1.

5 Výsledky experimentů

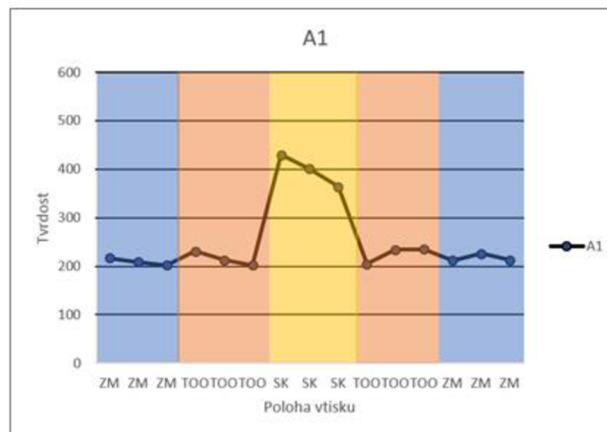
5.1 Zjištěná makrostruktura, tvrdost a mikrostruktura svarového spoje

Výsledky experimentů pro všechny zkušební vzorky A1–D3 jsou pro názornost zpracovány stejnou formou; pro každý vzorek je vždy uvedena fotografie makrostruktury svaru s vyznačenými oblastmi svarového spoje (základní materiál – ZM, tepelně ovlivněná oblast – TOO a svarový kov – SK), graf s naměřenými hodnotami tvrdosti podle Vickerse – HV vyjádřenými křivkou a popisem uvádějícím konkrétní intervaly tvrdostí a fotografie mikrostruktur z oblastí svarového spoje, které zdůvodňují případný nárůst tvrdosti vzorku.

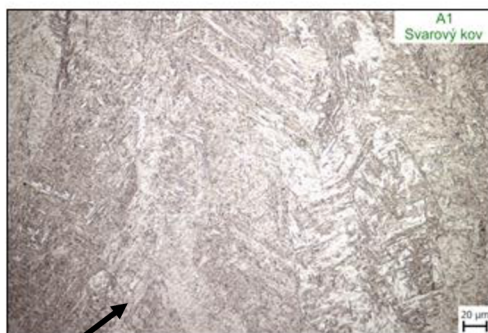
5.1.1 Vzorek A1 (tloušťka 2 mm, výkon 2 kW, materiál S500MC)



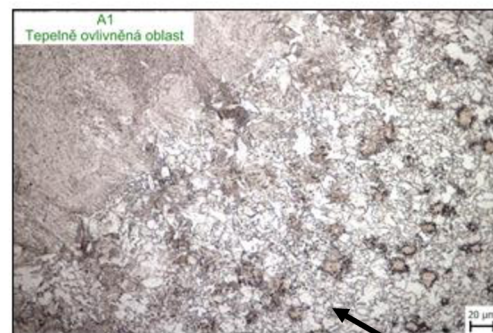
Došlo k velmi malému průvaru. Dále došlo ke vzniku převýšení tedy nahromadění SK nad rovinou ZM. Okolo oblasti SK vznikla velmi úzká TOO.



ZM: bez nárůstu tvrdosti (200 ÷ 230 HV)
 TOO: bez výrazného nárůstu tvrdosti (200 ÷ 240 HV)
 SK: výrazný nárůst tvrdosti (360 ÷ 430 HV)



Martenzit

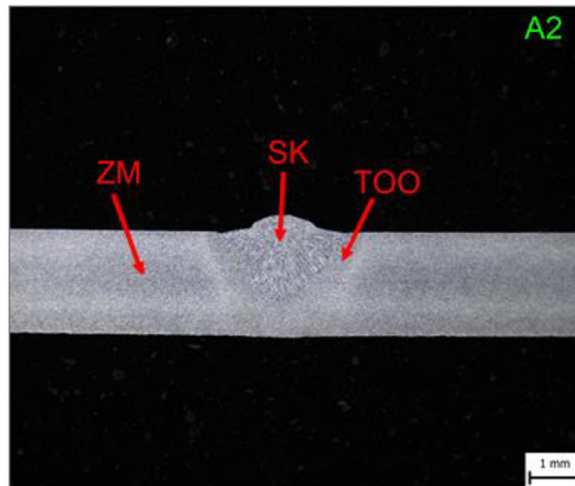


Feriticko-perlitická struktura

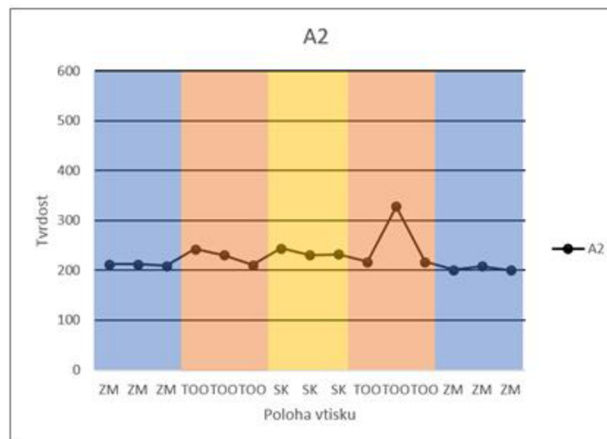


Feriticko-perlitická struktura

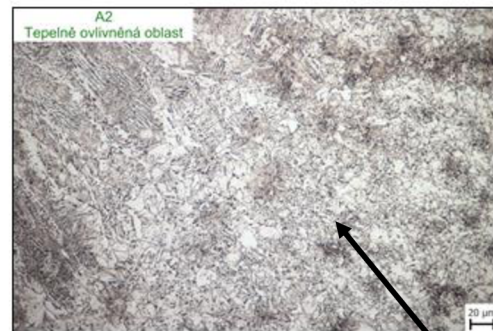
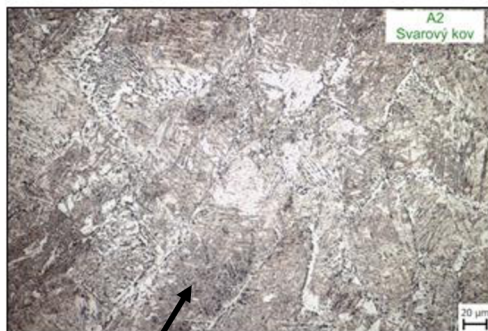
5.1.2 Vzorek A2 (tloušťka 2 mm, výkon 3 kW, materiál S500MC)



Došlo k průvaru do poloviny plechu. Dále nevzniká výrazné převýšení kořene svaru. Okolo oblasti SK vznikla úzká TOO.



ZM: bez nárůstu tvrdosti (200 ÷ 230 HV)
 TOO: mírný nárůst tvrdosti (220 ÷ 250 HV)
 SK: mírný nárůst tvrdosti (220 ÷ 250 HV)

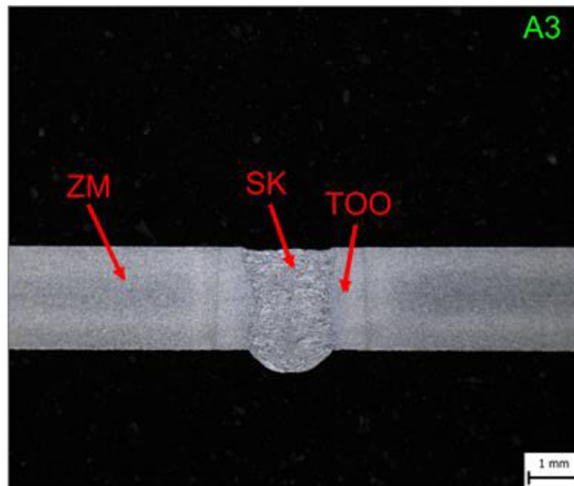


Acikulární ferit + bainit

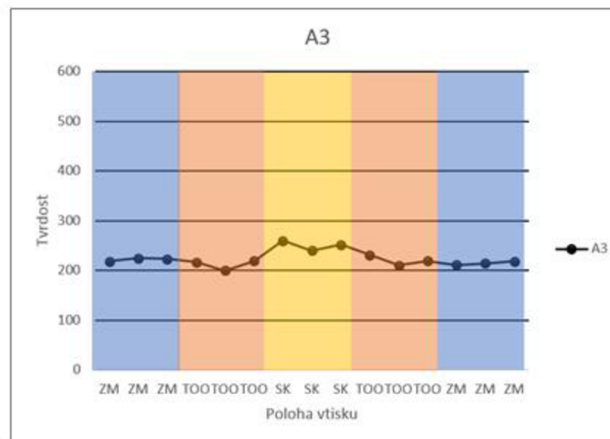
Feriticko-karbidická struktura

Feriticko-perlitická struktura

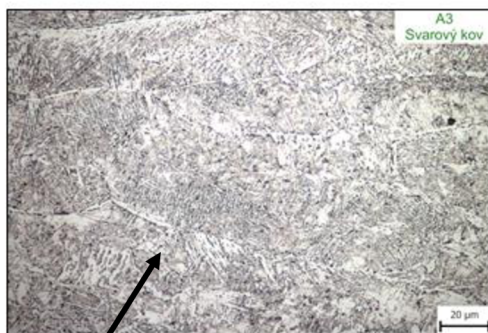
5.1.3 Vzorek A3 (tloušťka 2 mm, výkon 4 kW, materiál S500MC)



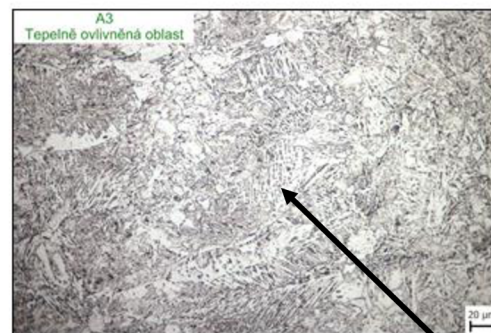
Došlo k plnému průvaru plechu. Při svařování tohoto vzorku nedošlo k převýšení SK, ale zato došlo k protečení SK skrz plech. Okolo SK došlo ke vzniku širší TOO než u obou předchozích svařů a tato TOO je skrz celou tloušťku plechu.



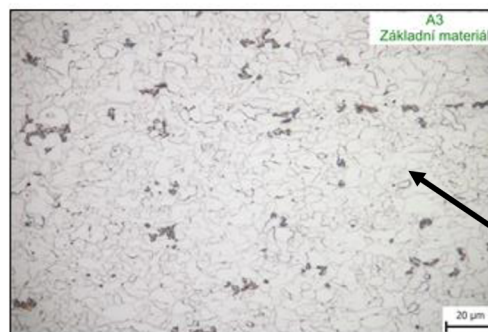
ZM: bez nárůstu tvrdosti (200 ÷ 230 HV)
 TOO: bez nárůstu tvrdosti (200 ÷ 230 HV)
 SK: mírný nárůst tvrdosti (240 ÷ 260 HV)



Bainit +
alotriomorfní ferit po
hranicích zrn

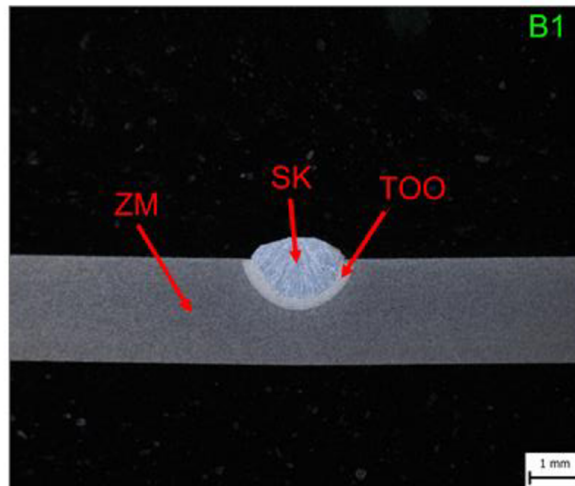


Feriticko-karbidická
struktura +
Bainit

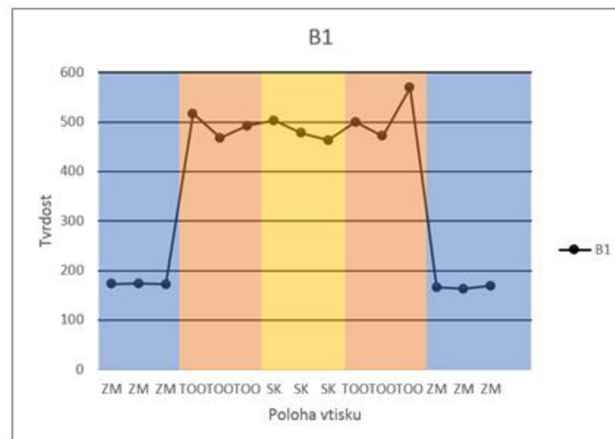


Feriticko-perlitická
struktura

5.1.4 Vzorek B1 (tloušťka 2 mm, výkon 2 kW, materiál S355J2C+N)



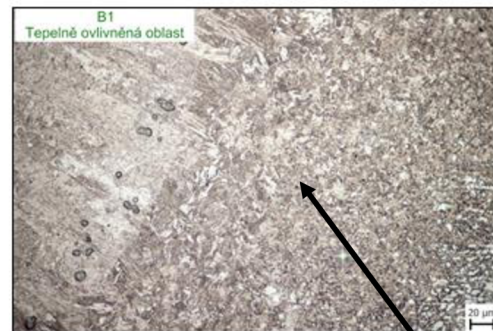
Došlo k minimálnímu průvaru a vzniku převýšení SK nad rovinou ZM. Okolo oblasti SK vznikla velmi úzká TOO.



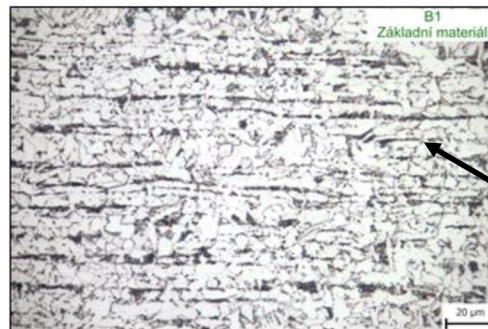
ZM: bez nárůstu tvrdosti (160 ÷ 170 HV)
 TOO: velmi výrazný nárůst tvrdosti (470 ÷ 570 HV)
 SK: velmi výrazný nárůst tvrdosti (460 ÷ 500 HV)



Martenzit + Bainit

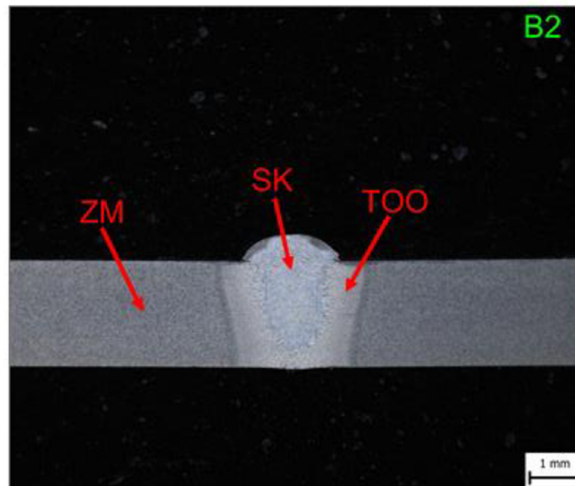


Martenzit + Bainit

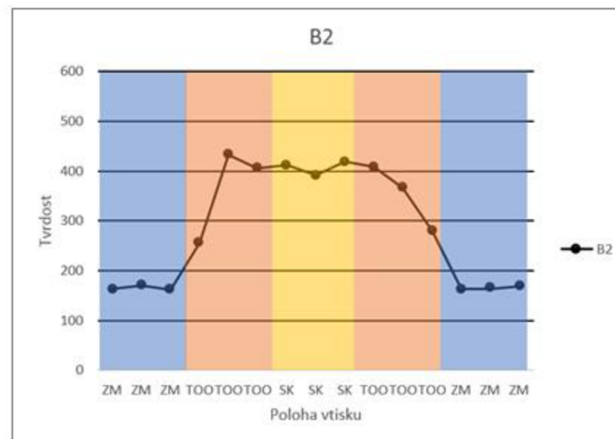


Feriticko-perlitická struktura

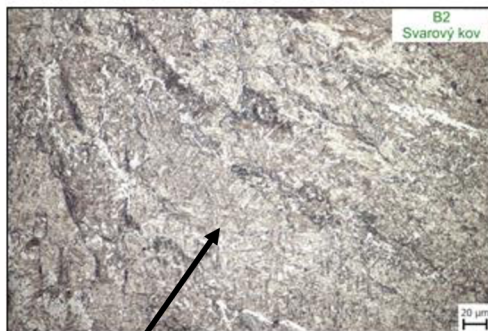
5.1.5 Vzorek B2 (tloušťka 2 mm, výkon 3 kW, materiál S355J2C+N)



Došlo k téměř úplnému průvaru plechu. Dále vzniká převýšení SK nad rovinou ZM. Okolo oblasti SK vznikla široká TOO skrz celou tloušťku plechu.

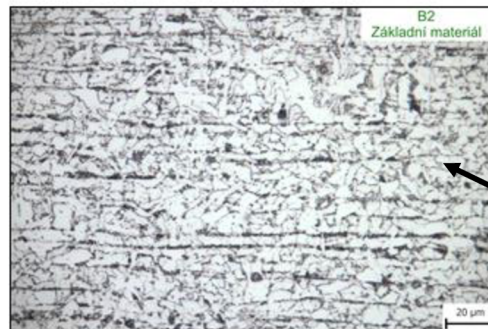


ZM: bez nárůstu tvrdosti (160 ÷ 170 HV)
 TOO: výrazný nárůst tvrdosti (270 ÷ 440 HV)
 SK: výrazný nárůst tvrdosti (390 ÷ 420 HV)



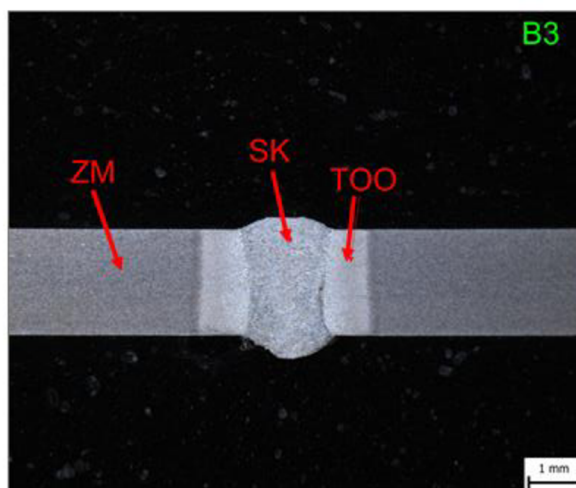
Martenzit + karbidy

Martenzit + Bainit

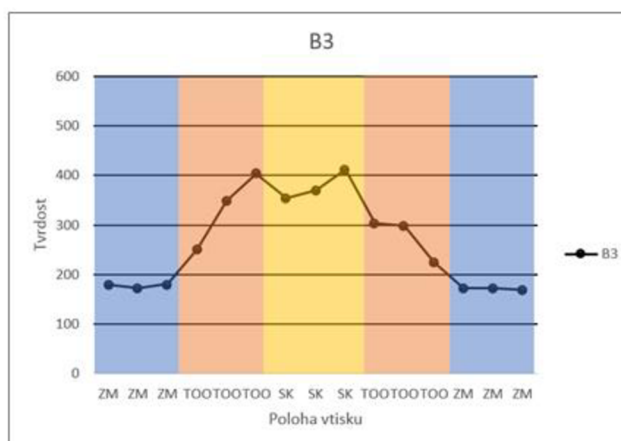


Feriticko-perlitická struktura

5.1.6 Vzorek B3 (tloušťka 2 mm, výkon 4 kW, materiál S355J2C+N)



Došlo k úplnému průvaru plechu. Dále vzniklo mírné převýšení SK nad rovinou ZM a také došlo k protečení SK skrz plech. Okolo oblasti SK vznikla široká TOO skrz celou tloušťku plechu.

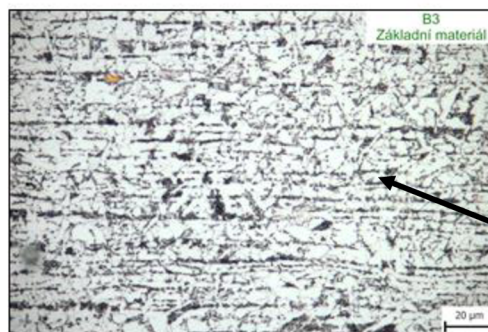


ZM: bez nárůstu tvrdosti (160 ÷ 180 HV)
 TOO: výrazný nárůst tvrdosti (230 ÷ 400 HV)
 SK: výrazný nárůst tvrdosti (350 ÷ 410 HV)



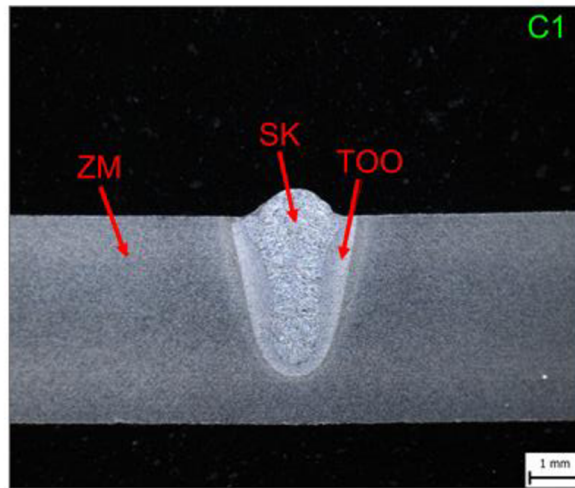
Martenzit
+
Bainit

Martenzit

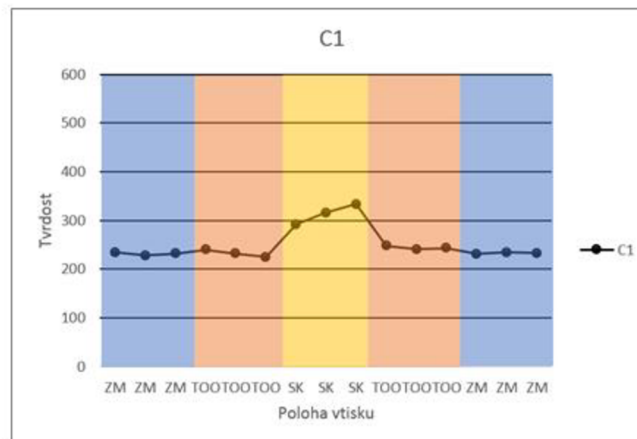


Feriticko-perlitická
struktura

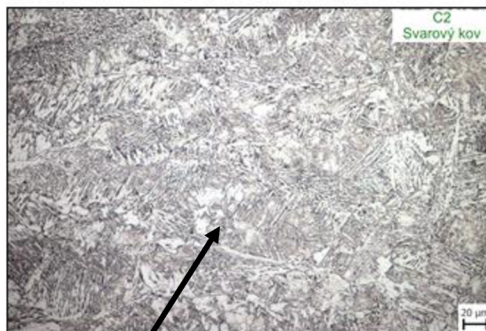
5.1.7 Vzorek C1 (tloušťka 4 mm, výkon 3 kW, materiál S500MC)



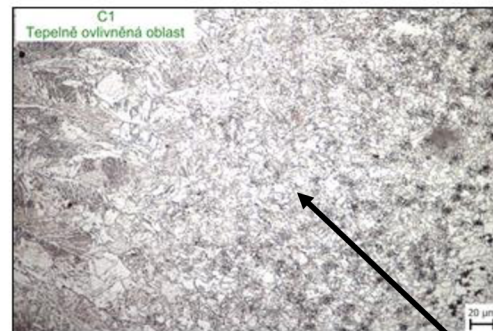
Došlo k průvaru do více než poloviny plechu. Dále vzniklo mírné převýšení SK nad rovinou. Okolo oblasti SK vznikla úzká TOO.



ZM: bez nárůstu tvrdosti (220 ÷ 240 HV)
 TOO: bez výrazného nárůstu tvrdosti (220 ÷ 250 HV)
 SK: mírný nárůst tvrdosti (290 ÷ 330 HV)



Bainit + acikulární ferit

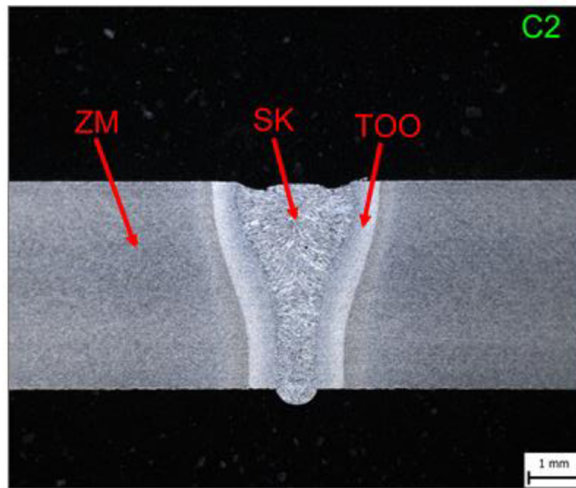


Martenzit + feriticko-perlitická struktura

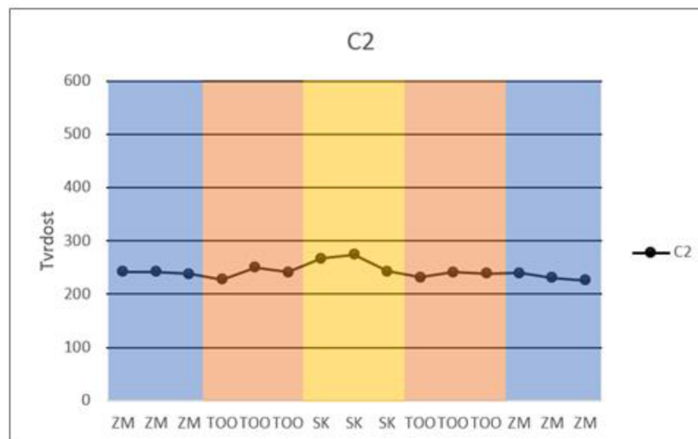


Feriticko-perlitická struktura

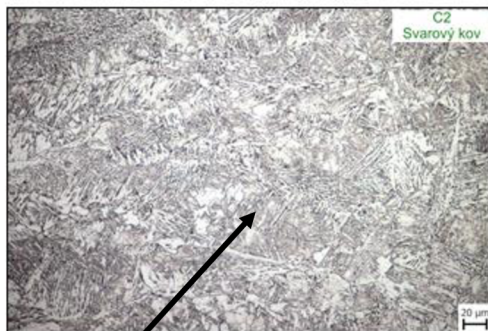
5.1.8 Vzorek C2 (tloušťka 4 mm, výkon 4 kW, materiál S500MC)



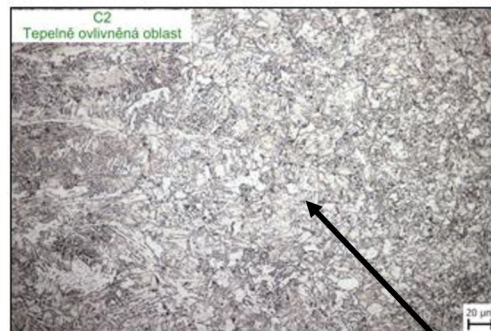
Došlo k plnému průvaru plechu. Dále došlo k mírnému protečení SK skrz plech. Okolo oblasti SK vznikla široká TOO skrz celou tloušťku plechu.



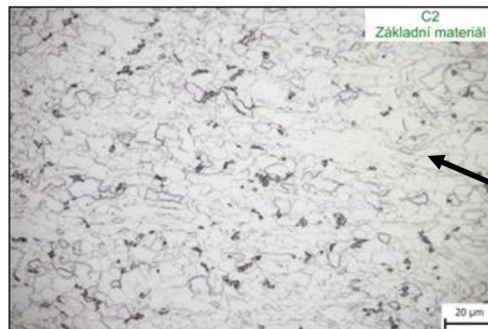
ZM: bez nárůstu tvrdosti (220 ÷ 240 HV)
 TOO: bez výrazného nárůstu tvrdosti (230 ÷ 250 HV)
 SK: mírný nárůst tvrdosti (240 ÷ 270 HV)



Bainit

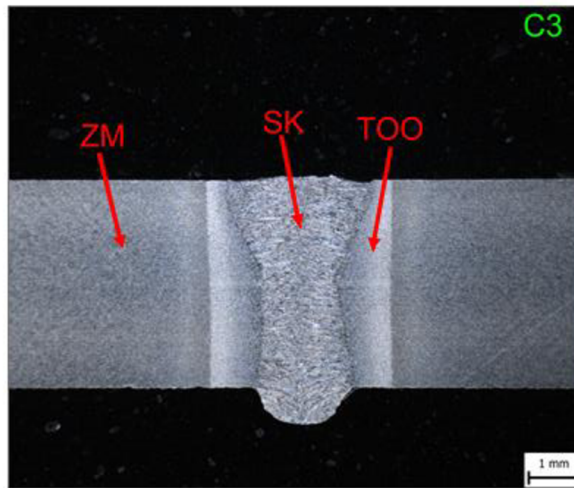


Feriticko-karbidická struktura

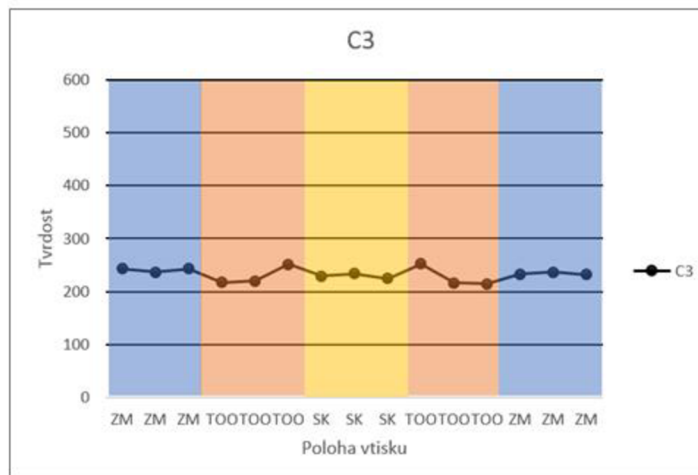


Feriticko-perlitická struktura

5.1.9 Vzorek C3 (tloušťka 4 mm, výkon 5 kW, materiál S500MC)



Došlo k plnému průvaru plechu. Dále došlo k protečení SK skrz plech. Okolo oblasti SK vznikla široká TOO skrz celou tloušťku plechu.



ZM: bez nárůstu tvrdosti (220 ÷ 240 HV)

TOO: bez výrazného nárůstu tvrdosti (220 ÷ 250 HV)

SK: bez výrazného nárůstu tvrdosti (220 ÷ 240 HV)



Acikulární ferit

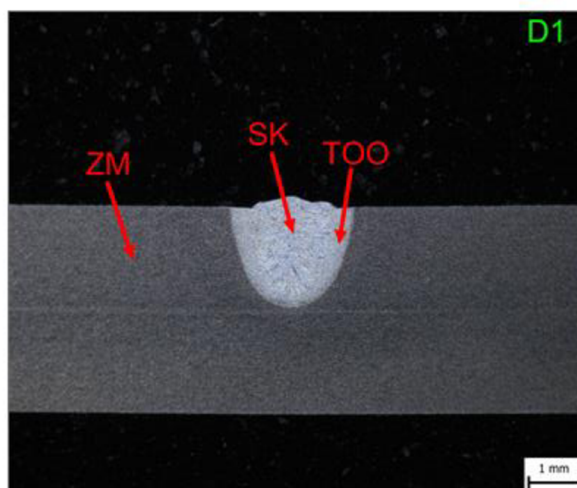


Feriticko-karbidická struktura

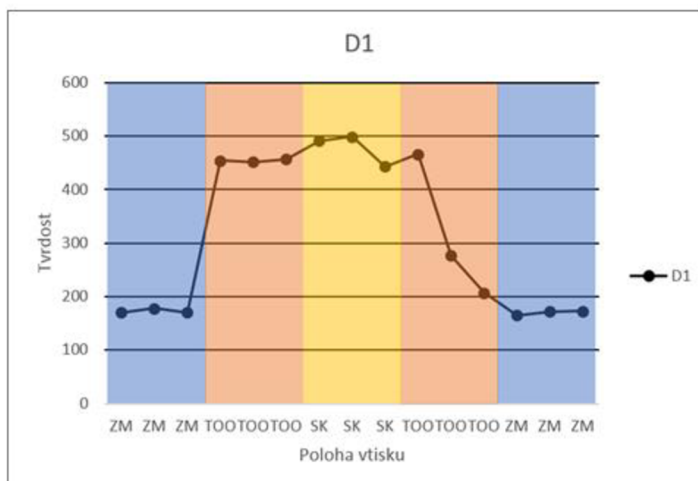


Feriticko-perlitická struktura

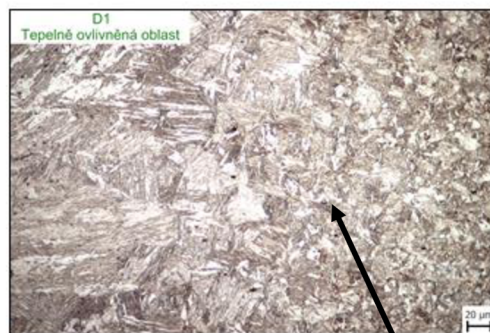
5.1.10 Vzorek D1 (tloušťka 4 mm, výkon 3 kW, materiál S355J2C+N)



Došlo k minimálnímu průvaru a vzniku převýšení SK nad rovinou ZM. Okolo oblasti SK vznikla velmi úzká TOO.



ZM: bez nárůstu tvrdosti (160 ÷ 180 HV)
 TOO: velmi výrazný nárůst tvrdosti (210 ÷ 470 HV)
 SK: velmi výrazný nárůst tvrdosti (450 ÷ 500 HV)



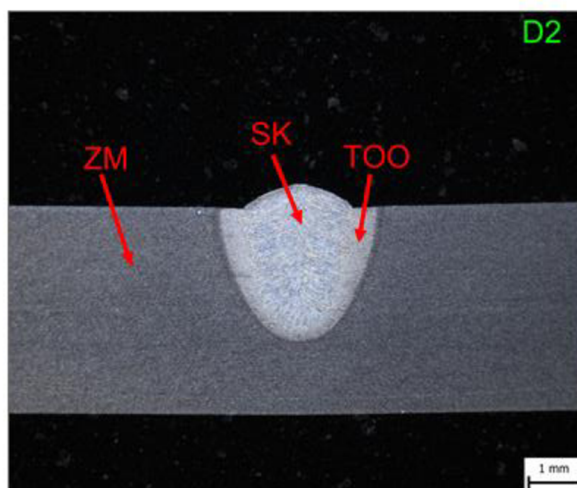
Martenzit

Martenzit

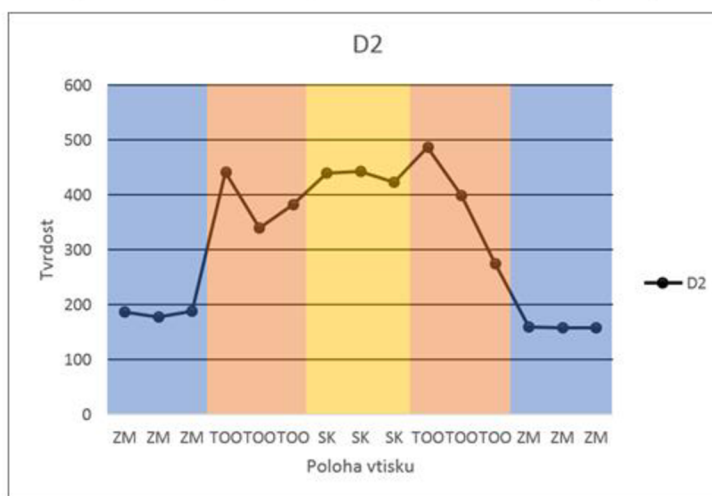


Feriticko-perlitická struktura

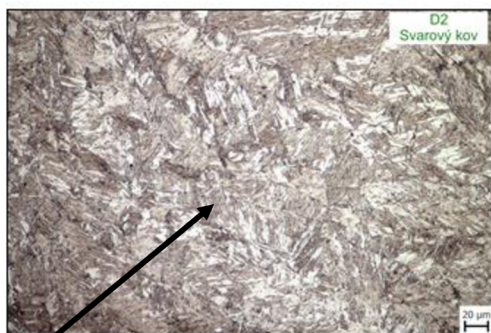
5.1.11 Vzorek D2 (tloušťka 4 mm, výkon 4 kW, materiál S355J2C+N)



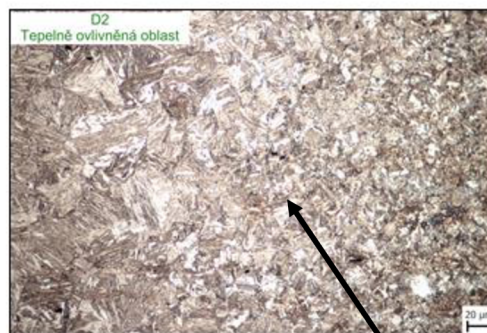
Došlo k průvaru do poloviny plechu a vzniku mírného převýšení SK nad rovinou ZM. Okolo oblasti SK vznikla TOO.



ZM: bez nárůstu tvrdosti (160 ÷ 190 HV)
 TOO: velmi výrazný nárůst tvrdosti (270 ÷ 490 HV)
 SK: výrazný nárůst tvrdosti (420 ÷ 450 HV)



Martenzit

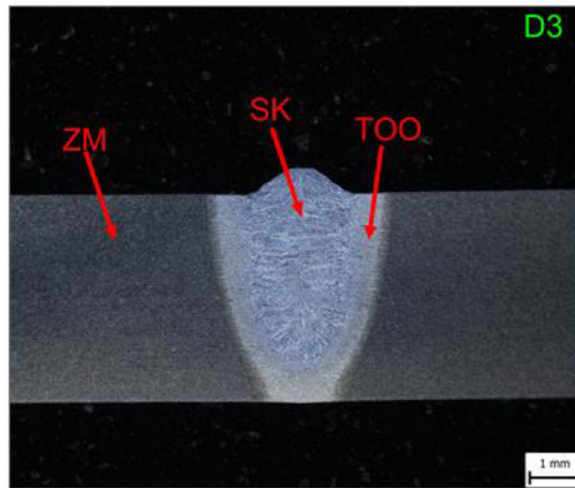


Martenzit

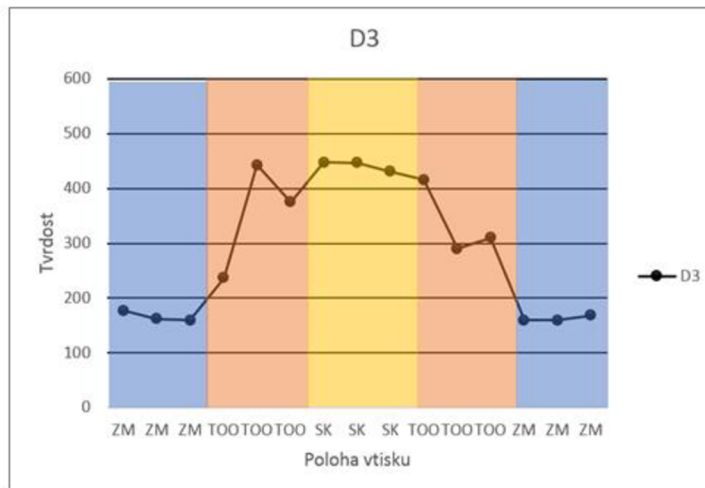


Feriticko-perlitická struktura

5.1.12 Vzorek D3 (tloušťka 4 mm, výkon 5 kW, materiál S355J2C+N)



Došlo k průvaru skrz téměř celý plech a vzniku mírného převýšení SK nad rovinou ZM. Okolo oblasti SK vznikla TOO skrz celou tloušťku plechu.



ZM: bez nárůstu tvrdosti (160 ÷ 180 HV)
 TOO: výrazný nárůst tvrdosti (240 ÷ 440 HV)
 SK: výrazný nárůst tvrdosti (430 ÷ 450 HV)



Martenzit + karbidy



Bainit + Ferit



Feriticko-perlitická struktura

5.2 Zjištěná a predikovaná hloubka průvarů

Hodnoty průvarů naměřené na makrofotografiích svarových spojů jsou spolu s hodnotami průvarů predikovanými podle výpočtového vztahu Metzbowera uvedeny v tabulce 5.1.

Tabulka č. 5.1: Vypočtené a experimentálně zjištěné hloubky průvarů

| Výkon laseru [W] | Vzorek | Experimentálně zjištěný průvar [mm] | Vypočtený průvar [mm] |
|------------------|--------|-------------------------------------|-----------------------|
| 2000 | A1 | 0,65 | 1,93 |
| 3000 | A2 | 1,36 | 2,90 |
| 4000 | A3 | 1,94 | 3,87 |
| 2000 | B1 | 0,75 | 1,12 |
| 3000 | B2 | 1,67 | 1,68 |
| 4000 | B3 | 2,00 | 2,24 |
| 3000 | C1 | 2,84 | 2,90 |
| 4000 | C2 | 3,90 | 3,87 |
| 5000 | C3 | 3,91 | 4,83 |
| 3000 | D1 | 1,67 | 1,68 |
| 4000 | D2 | 2,28 | 2,24 |
| 5000 | D3 | 3,36 | 2,81 |

Z dat z výše uvedené tabulky byly zpracovány grafy, které zobrazují hodnoty hloubky průvarů u jednotlivých ocelí v závislosti na výkonu použitého laseru. Tyto grafy jsou vloženy v kapitole 6.3.

6 Diskuze výsledků

6.1 Diskuze makrostruktury, tvrdosti a mikrostruktury svarového spoje

6.1.1 Vzorek A1 (tloušťka 2 mm, výkon 2 kW, materiál S500MC)

Na makrosnímku svarového spoje vzorku A1 (str. 28) je patrné, že za daných technologických podmínek došlo k velmi malému průvaru zapříčiněnému nízkým výkonem svařovacího laseru, a v důsledku toho malým množstvím tepla vneseného do materiálu. Nízký výkon laseru zapříčiňuje také vznik úzké TOO, protože teplo předávané ze svarového kovu do okolního materiálu je minimální.

V ZM je zachována původní feriticko-perlitická struktura, neboť není laserovým paprskem ovlivněna; tvrdost ZM se pohybuje v intervalu $200 \div 230$ HV.

V TOO již došlo k přenosu tepla od laseru na materiál, ale toto teplo nebylo nedostatečné na to, aby pozměnilo strukturu, tudíž si TOO zachovává feriticko-perlitickou strukturu. V důsledku toho nedochází k výraznému nárůstu tvrdosti proti ZM; tvrdost se pohybuje v intervalu $200 \div 240$ HV.

V oblasti SK došlo vlivem tepla od laseru k natavení a promíchání původního kovu ze ZM a kovu přídatného materiálu. Toto mělo za následek zvýšení obsahu uhlíku ve SK (kterého je v oceli S500MC jinak poměrně málo). Po natavení SK a následném rychlém ochlazení materiálu (po posunutí svařovací hlavy mimo svar) došlo k uzamčení uhlíku ve struktuře a přeměně struktury na martenzitickou. Martenzitická struktura se vyznačuje svou tvrdostí, což souhlasí s výrazným nárůstem tvrdosti v této oblasti; a to až na hodnoty $360 \div 430$ HV.

6.1.2 Vzorek A2 (tloušťka 2 mm, výkon 3 kW, materiál S500MC)

Na makrosnímku svarového spoje vzorku A2 (str. 29) lze vidět, že za daných technologických podmínek došlo k průvaru přibližně do poloviny plechu. Zvýšení hloubky průvaru je zapříčiněno použitím vyššího výkonu laseru (3 kW), což zvýšilo množství tepla dodávané do materiálu. Více dodávaného tepla do SK také způsobilo vznik úzké TOO, která je ale širší než u vzorku A1.

V ZM je zachována původní feriticko-perlitická struktura, neboť není laserovým paprskem ovlivněna; tvrdost ZM se pohybuje v rozmezí $200 \div 230$ HV.

V TOO již došlo k přenosu tepla od laseru na materiál, vyšší výkon laserového paprsku způsobil přenos více tepla do TOO než u předchozího vzorku. Více tepla v TOO způsobilo změnu původní feriticko-perlitické struktury na feriticko-karbidickou. Tato změna měla za následek mírný nárůst tvrdosti v TOO; tvrdost se pohybuje v intervalu $220 \div 250$ HV. Nárůst tvrdosti u druhého vtisku v druhé sadě hodnot u TOO je pravděpodobně způsoben vměstkem nebo vtiskem v místě karbidu.

Jelikož ocel S500MC obsahuje pouze velmi malé množství uhlíku a při vyšším výkonu došlo k promíchání více nataveného ZM s přídatným materiálem, tak po rychlém zahřátí a ochlazení

materiálu nedošlo v oblasti SK ke vzniku martenzitické struktury jako v předchozím případě, ale ke vzniku bainitické struktury a také acikulárního feritu. Jedná se o specifický typ feritu, který vzniká uvnitř zrna na precipitátech a vyznačuje se dobrou houževnatostí. Jak bainit, tak acikulární ferit se nevyznačují výraznou tvrdostí ani křehkostí, což potvrzuje i naměřená hodnota tvrdosti v oblasti SK, kde nedochází k výrazným nárůstům tvrdosti oproti ZM; hodnoty tvrdostí se nachází v intervalu 220 ÷ 250 HV.

6.1.3 Vzorek A3 (tloušťka 2 mm, výkon 4 kW, materiál S500MC)

Na makrosnímku svarového spoje vzorku A3 (str. 30) je patrné, že za daných technologických podmínek došlo k plnému průvaru plechu. Výkon laseru a vnesené teplo byly tedy dostatečné na plné provaření plechu. Při svařování došlo k protečení SK kovu skrz plech, což znamená, že už nebylo možné použít vyšší výkon, jelikož by došlo k nařezání plechu namísto jeho svaření. Jelikož vyšším výkonem (4 kW) bylo dodáno více tepla než u předchozích vzorků, tak okolo SK došlo ke vzniku širší TOO než u obou předchozích svarů a tato TOO je skrz celou tloušťku plechu.

V ZM je zachována původní feriticko-perlitická struktura, neboť není laserovým paprskem ovlivněna; tvrdost ZM se pohybuje v intervalu 200 ÷ 230 HV.

Více tepla vzniklého z laserového paprsku v TOO způsobilo změnu původní feriticko-perlitické struktury na feriticko-karbidickou, podobně jako v předchozím případě, ale navíc také došlo ke vzniku bainitické struktury. V TOO nedošlo k výraznému nárůstu tvrdosti; tvrdost se pohybuje v intervalu 200 ÷ 230 HV.

Jelikož ocel S500MC obsahuje pouze velmi malé množství uhlíku a při vyšším výkonu došlo k promíchání více nataveného ZM s přídavným materiálem, tak po rychlém zahřátí a ochlazení materiálu nedošlo v oblasti SK ke vzniku martenzitické struktury, ale ke vzniku bainitické struktury (stejně jako u vzorku A2) a také vzniku alotriomorfního feritu po hranicích zrn. Jedná se o typ feritu, který je podobný acikulárnímu feritu, ale místo uvnitř zrna vzniká na hranicích původních austenitických zrn. Tyto struktury potvrzují mírný nárůst tvrdosti v oblasti SK; a to do rozmezí hodnot 240 ÷ 260 HV.

6.1.4 Vzorek B1 (tloušťka 2 mm, výkon 2 kW, materiál S355J2C + N)

Na makrosnímku svarového spoje vzorku B1 (str. 31) je patrné, že za daných technologických podmínek došlo k minimálnímu průvaru zapříčiněnému nízkým výkonem svařovacího laseru a v důsledku toho malým množstvím tepla vneseného do materiálu. Plech tedy nebyl plně provařen. Tento nízký výkon (a s ním i nízké přenesené teplo) způsobuje také vznik velmi úzké TOO okolo oblasti SK.

V ZM je zachována původní feriticko-perlitická struktura, neboť není laserovým paprskem ovlivněna; tvrdost ZM se pohybuje v intervalu 160 ÷ 170 HV.

Teplo vzniklé působením laserového paprsku spolu s vyšším obsahem uhlíku v oceli S355J2C + N způsobilo po ochlazení přeměnu struktury v TOO z feriticko-perlitické na bainit

a martenzit, který konkrétně u tohoto vzorku dosahuje velmi vysokých hodnot tvrdostí; a to až na hodnoty pohybující se v intervalu 470 ÷ 570 HV.

V oblasti SK došlo k promísení původního ZM a přídavného materiálu, což v tomto malém objemu mělo za následek další zvýšení koncentrace uhlíku ve SK. Vlivem prudkého ochlazení oblasti SK při odjezdu svařovací hlavy vznikla v této oblasti martenzitická struktura s velmi vysokou tvrdostí a na okrajích bainitická struktura. Vliv na výslednou strukturu a tvrdost má také tloušťka plechu. Jelikož je plech tlustý pouze 2 mm, teplo naakumulované během přejezdu svařovací hlavy s laserovým paprskem o výkonu pouhé 2 kW se rychle vytrácí do studeného ZM a do okolí, což má za následek rychlé ochlazení TOO a SK. Martenzit v oblasti SK je (stejně jako v TOO) velmi tvrdý a jeho tvrdost dosahuje hodnot 460 ÷ 500 HV.

6.1.5 Vzorek B2 (tloušťka 2 mm, výkon 3 kW, materiál S355J2C + N)

Na makrosnímku svarového spoje vzorku B2 (str. 32) lze vidět, že za daných technologických podmínek došlo k téměř úplnému průvaru plechu. Použití vyššího výkonu laseru (3 kW), a tedy i vyššího vneseného tepla umožnilo dosáhnout hlubšího a lepšího průvaru než u vzorku B1, ale průvar stále není skrz celý plech. Více vneseného tepla také způsobilo vznik široké TOO (v porovnání s předchozím vzorkem) skrz celou tloušťku plechu.

V ZM je zachována původní feriticko-perlitická struktura, neboť není laserovým paprskem ovlivněna; tvrdost ZM se pohybuje v intervalu 160 ÷ 170 HV.

Teplo vzniklé od působení laserového paprsku spolu s vyšším obsahem uhlíku v oceli S355J2C + N způsobilo po ohřátí a rychlém ochlazení přeměnu struktury v TOO z feriticko-perlitické na martenzit a bainit. Struktury v této oblasti dosahují vysokých tvrdostí, ale tyto hodnoty nejsou tak extrémní jako u vzorku B1; jedná se o hodnoty spadající do intervalu 270 ÷ 440 HV. Velký rozsah intervalu tvrdosti v TOO je způsoben rozdílnou polohou vtisku v relativně široké TOO – čím blíže ke SK je vtisk, tím vyšší je jeho tvrdost.

V oblasti SK nastala přeměna struktury na martenzit spolu s karbidy. Tato struktura vznikla po natažení kovu a jeho následném rychlém ochlazení za přítomnosti vyšších koncentrací uhlíku. Hodnoty tvrdostí martenzitu ve SK jsou vysoké, ale nedosahují tak extrémních hodnot jako u vzorku B1; hodnoty v oblasti SK spadají do rozmezí 390 ÷ 420 HV. Toto je pravděpodobně způsobeno tím, že vyšší výkon vnesl do materiálu více tepla než u vzorku B1 a došlo k pomalejšímu chladnutí kovu.

6.1.6 Vzorek B3 (tloušťka 2 mm, výkon 2 kW, materiál S355J2C + N)

Na makrosnímku svarového spoje vzorku B3 (str. 33) je patrné, že za daných technologických podmínek došlo k úplnému průvaru plechu. Výkon laseru a vnesené teplo byly tedy dostatečné na plné provaření plechu. Při svařování došlo k protečení SK kovu skrz plech, což znamená, že už nebylo možné použít vyšší výkon, jelikož by došlo k nařezání plechu namísto jeho svaření. Okolo oblasti SK vznikla, vlivem přenosu více tepla ze SK, širší TOO než u obou předchozích svarů a tato TOO je skrz celou tloušťku plechu.

V ZM je zachována původní feriticko-perlitická struktura, neboť není laserovým paprskem ovlivněna; tvrdost ZM se pohybuje v intervalu 160 ÷ 170 HV.

Teplo vzniklé od působení laserového paprsku spolu s vyšším obsahem uhlíku v oceli S355J2C + N způsobilo přeměnu struktury v TOO z feriticko-perlitické na martenzit. Martenzitická struktura vzniklá v důsledku ohřevu a následného rychlého ochlazení kovu v TOO vykazuje vysoké hodnoty tvrdosti; tyto hodnoty se pohybují v intervalu 230 ÷ 400 HV. Velký rozsah intervalu tvrdosti v TOO je způsoben rozdílnou polohou vtisku v relativně široké TOO – čím blíže ke SK je vtisk, tím vyšší je jeho tvrdost.

V oblasti SK nastala přeměna struktury na martenzit a bainit spolu s karbidy vyloučenými po hranicích zrn. Tato struktura vznikla po natavení kovu a jeho následném rychlém ochlazení za přítomnosti vyšších koncentrací uhlíku (oproti oceli S500MC). Hodnoty tvrdostí martenzitu ve SK jsou vysoké, ale nedosahují tak extrémních hodnot jako u vzorku B1; tyto hodnoty spadají do rozmezí hodnot 350 ÷ 410 HV. Důvod nižší tvrdosti vzorku B3 oproti vzorku B1 je stejný jako u vzorku B2 a souvisí s vneseným teplem.

6.1.7 Vzorek C1 (tloušťka 4 mm, výkon 3 kW, materiál S500MC)

Na makrosnímku svarového spoje vzorku C1 (str. 34) lze vidět, že za daných technologických podmínek došlo k průvaru do více než poloviny plechu. Teplo přenášené z nataveného SK mělo za následek vznik úzké TOO okolo oblasti SK.

V ZM je zachována původní feriticko-perlitická struktura, neboť není laserovým paprskem ovlivněna; tvrdost ZM se pohybuje v intervalu 220 ÷ 240 HV.

V TOO již došlo k přenosu tepla od laseru na materiál, ale toto teplo bylo nedostatečné na změnu struktury, skoro v celé TOO se stále nachází feriticko-perlitická struktura, a to kromě okraje bližšího ke SK, kde nastala vlivem přenášeného tepla a následného ochlazení přeměna struktury na jemný martenzit. Toto zjištění odpovídá naměřeným hodnotám tvrdostí, které v TOO nezaznamenaly žádný výrazný nárůst; hodnoty se pohybují v rozmezí 220 ÷ 250 HV.

Jelikož ocel S500MC obsahuje pouze velmi malé množství uhlíku a při použití výkonu 3 kW (více než u prvních vzorků tloušťky 2 mm) došlo k promíchání více nataveného ZM s přídatným materiálem, tak po rychlém zahřátí a ochlazení materiálu došlo v oblasti SK ke vzniku bainitické struktury, acikulárního feritu a v určitých místech lze pozorovat i Widmanstattenovu strukturu. Vznik těchto struktur je dán převážně nízkým obsahem uhlíku ve SK a také pomalejším chladnutím materiálu, které nebylo tak rychlé (protože bylo do materiálu vneseno více tepla než u prvních vzorků tloušťky 2 mm), aby spustilo martenzitickou přeměnu. Tyto struktury potvrzují mírný nárůst tvrdosti v oblasti SK; a to do rozmezí hodnot 290 ÷ 330 HV.

6.1.8 Vzorek C2 (tloušťka 4 mm, výkon 4 kW, materiál S500MC)

Na makrosnímku svarového spoje vzorku C2 (str. 35) je patrné, že za daných technologických podmínek došlo k plnému průvaru plechu. Výkon laseru a vnesené teplo byly tedy dostatečné

na plné provaření plechu. Při svařování také došlo k protečení SK skrz plech, ale v tomto případě se jedná o minimální protečení, takže lze použít vyšší výkon. Okolo oblasti SK vznikla, vlivem přenosu více tepla ze SK, širší TOO než u předchozího vzorku (C1), a tato TOO prochází skrz celou tloušťku plechu.

V ZM je zachována původní feriticko-perlitická struktura, neboť není laserovým paprskem ovlivněna; tvrdost ZM se pohybuje v intervalu 220 ÷ 240 HV.

V TOO již došlo k přenosu tepla od laseru na materiál, vyšší výkon laserového paprsku způsobil přenos více tepla do TOO než u předchozího vzorku. Více tepla v TOO způsobilo přeměnu původní feriticko-perlitické struktury na feriticko-karbidickou. Tato přeměna měla za následek mírný nárůst tvrdosti v TOO; tvrdost se pohybuje v intervalu 230 ÷ 250 HV.

Jelikož ocel S500MC obsahuje pouze velmi malé množství uhlíku a použitý výkon a vnesené teplo byly opět vyšší, což stejně jako v předchozím případě znamená pomalejší chladnutí materiálu, tak vlivem těchto faktorů došlo v oblasti SK ke vzniku bainitické struktury a místy lze pozorovat i Widmanstattenovu strukturu. Přítomnost bainitu v oblasti SK zapříčiňuje mírný nárůst hodnot tvrdosti oproti ZM; a to na hodnoty 240 ÷ 270 HV.

6.1.9 Vzorek C3 (tloušťka 4 mm, výkon 5 kW, materiál S500MC)

Na makrosnímku svarového spoje vzorku C3 (str. 36) je patrné, že za daných technologických podmínek došlo k plnému průvaru plechu. Výkon laseru a vnesené teplo byly tedy dostatečné na plné provaření plechu. Při svařování došlo k protečení SK kovu skrz plech, což znamená, že už nebylo možné použít vyšší výkon, jelikož by došlo k nařezání plechu namísto jeho svaření. Navíc laser používaný ke svařování zkušebních vzorků neumožňuje použít vyšší výkon než 5 kW. Jelikož vyšším výkonem (5 kW) bylo dodáno více tepla než u obou předchozích vzorků, tak okolo SK došlo ke vzniku širší TOO než u obou předchozích svarů, a tato TOO prochází skrz celou tloušťku plechu.

V ZM je zachována původní feriticko-perlitická struktura, neboť není laserovým paprskem ovlivněna; tvrdost ZM se pohybuje v intervalu 220 ÷ 240 HV.

V TOO již došlo k přenosu tepla od laseru na materiál, vyšší výkon laserového paprsku způsobil přenos více tepla do TOO než u předchozího vzorku. Více tepla v TOO (stejně jako u předchozího vzorku) a pomalejší chladnutí (vlivem vyššího výkonu) způsobilo přeměnu původní feriticko-perlitické struktury na feriticko-karbidickou. Přítomnost těchto struktur nevykazuje výrazný nárůst tvrdosti; tvrdost se pohybuje v intervalu 220 ÷ 250 HV.

Jelikož ocel S500MC obsahuje pouze velmi malé množství uhlíku a použitý výkon a vnesené teplo byly opět vyšší, což stejně jako v předchozím případě znamená pomalejší chladnutí materiálu, tak v tomto případě už nedošlo v oblasti SK ke vzniku bainitu, ale acikulárního feritu. Acikulární ferit nevykazuje zvýšenou tvrdost, což potvrzují i naměřené hodnoty tvrdosti, kde nedochází k žádnému nárůstu tvrdosti oproti ZM a tvrdost se nachází v rozmezí 220 ÷ 240 HV.

6.1.10 Vzorek D1 (tloušťka 4 mm, výkon 3 kW, materiál S355J2C + N)

Na makrosnímku svarového spoje vzorku D1 (str. 37) je patrné, že za daných technologických podmínek došlo k minimálnímu průvaru zapříčiněnému nízkým výkonem svařovacího laseru a v důsledku toho malým množstvím tepla vneseného do materiálu. Nízký výkon laseru zapříčiňuje také vznik úzké TOO okolo oblasti SK, protože teplo předávané ze svarového kovu do okolního materiálu je minimální.

V ZM je zachována původní feriticko-perlitická struktura, neboť není laserovým paprskem ovlivněna; tvrdost ZM se pohybuje v intervalu $160 \div 180$ HV.

Teplo vzniklé od působení laserového paprsku spolu s vyšším obsahem uhlíku v oceli S355J2C + N způsobilo přeměnu struktury v TOO z feriticko-perlitické na martenzit. Martenzitická struktura vzniklá v důsledku ohřevu a následného rychlého ochlazení kovu s dostatečným obsahem uhlíku v TOO vykazuje vysoké hodnoty tvrdosti; tyto hodnoty se pohybují v intervalu $210 \div 470$ HV. Jelikož bylo do materiálu vneseno více tepla tak plech by měl chladnout pomaleji, ale plech tloušťky 4 mm ztrácí teplo rychleji, než plech tloušťky 2 mm, tudíž stále došlo k rychlému ochlazení. Velký rozsah intervalu tvrdosti v TOO je způsoben rozdílnou polohou vtisku v úzké TOO, kde byl problém umístit tři vtisky v dostatečných rozestupech vedle sebe, tudíž se poslední vtisk v druhé části TOO nacházel už na okraji TOO, a proto je jeho tvrdost nižší než u zbylých vtisků.

V oblasti SK nastala přeměna struktury na martenzitickou. Tato struktura vznikla po natavení kovu a jeho následném rychlém ochlazení za přítomnosti vyšších koncentrací uhlíku. Martenzit je velmi tvrdá struktura, což souhlasí s naměřenými hodnotami v oblasti SK; tyto hodnoty se pohybují v intervalu $450 \div 500$ HV.

6.1.11 Vzorek D2 (tloušťka 4 mm, výkon 4 kW, materiál S355J2C + N)

Na makrosnímku svarového spoje vzorku D2 (str. 38) lze vidět, že za daných technologických podmínek došlo k průvaru přibližně do poloviny plechu. Toto je zapříčiněno nízkým výkonem svařovacího laseru, a v důsledku toho malým množstvím tepla vneseného do materiálu (které je vyšší než v předchozím případě, ale stále nedostatečné). Více vneseného tepla způsobilo vznik širší TOO než u předchozího vzorku okolo oblasti SK.

V ZM je zachována původní feriticko-perlitická struktura, neboť není laserovým paprskem ovlivněna; tvrdost ZM se pohybuje v intervalu $160 \div 190$ HV.

Teplo vzniklé od působení laserového paprsku spolu s vyšším obsahem uhlíku v oceli S355J2C + N způsobilo přeměnu struktury v TOO z feriticko-perlitické na martenzit, stejně jako u vzorku D1. Martenzitická struktura vzniklá v důsledku ohřevu a následného rychlého ochlazení kovu v TOO vykazuje vysoké hodnoty tvrdosti, což potvrzuje vysoký nárůst tvrdosti v této oblasti; hodnoty tvrdostí se pohybují v intervalu $270 \div 490$ HV. Velký rozsah intervalu tvrdosti v TOO je způsoben rozdílnou polohou vtisku v relativně široké TOO – čím blíže ke SK je vtisk, tím vyšší je jeho tvrdost. Tento jev neplatí v první sadě hodnot pro TOO (viz graf str. 38) pravděpodobně z důvodu vtisku v místě měkčího martenzitu s nižším

obsahem uhlíku anebo zbytkového austenitu, který se vyskytuje ve strukturách společně s martenzitem.

V oblasti SK nastala přeměna struktury na martenzitickou stejně jako u předchozího vzorku (D1). Tato struktura vznikla po natavení kovu a jeho následném rychlém ochlazení za přítomnosti vyšších koncentrací uhlíku. Martenzit se vyznačuje svou tvrdostí a křehkostí, což potvrzuje vysoký nárůst tvrdosti v oblasti SK; hodnoty tvrdosti se nachází v intervalu $420 \div 450$ HV. Jelikož větším výkonem bylo dodáno více tepla než u předchozího vzorku, a tím pádem došlo k pomalejšímu ochlazení, tak hodnoty tvrdosti jsou menší než u předchozího vzorku.

6.1.12 Vzorek D3 (tloušťka 4 mm, výkon 5 kW, materiál S355J2C + N)

Na makrosnímku svarového spoje vzorku D3 (str. 39) lze vidět, že za daných technologických podmínek došlo k téměř úplnému průvaru plechu. Okolo oblasti SK vznikla, vlivem přenosu více tepla ze SK, širší TOO než u obou předchozích svarů a tato TOO je skrz celou tloušťku plechu.

V ZM je zachována původní feriticko-perlitická struktura, neboť není laserovým paprskem ovlivněna; tvrdost ZM se pohybuje v intervalu $160 \div 180$ HV.

Teplo vzniklé od působení laserového paprsku na oblast SK spolu s vyšším obsahem uhlíku v oceli S355J2C + N způsobilo přeměnu struktury v TOO z feriticko-perlitické na martenzit, bainit a část struktury zůstala feritická. Martenzitická struktura vzniklá v důsledku ohřevu a následného rychlého ochlazení kovu v TOO vykazuje vysoké hodnoty tvrdosti, což potvrzuje vysoký nárůst tvrdosti v této oblasti; hodnoty tvrdostí se pohybují v intervalu $240 \div 440$ HV. Teplo přenesené ze SK je větší než v předchozím případě, což má za následek pomalejší chladnutí a tím pádem nižší tvrdost v TOO než u vzorku D2. Velký rozsah intervalu tvrdosti v TOO je způsoben rozdílnou polohou vtisku v relativně široké TOO – čím blíže ke SK je vtisk, tím vyšší je jeho tvrdost. Tento jev neplatí v první sadě hodnot pro TOO (viz graf str. 39) pravděpodobně z důvodu vtisku v místě měkčího martenzitu s nižším obsahem uhlíku anebo zbytkového austenitu, který se vyskytuje ve strukturách společně s martenzitem, popř. již zmíněná část struktury obsahující zrna feritu.

V oblasti SK nastala přeměna struktury na martenzitickou stejně jako u SK dvou předchozích vzorků (D1 a D2). Tato struktura vznikla po natavení kovu a jeho následném rychlém ochlazení za přítomnosti vyšších koncentrací uhlíku. Martenzit je velmi tvrdá a křehká struktura, což souhlasí s vysokými naměřenými hodnotami tvrdosti v oblasti SK; tyto hodnoty se pohybují v intervalu $430 \div 450$ HV.

6.2 Shrnutí poznatků

Zjištěné výsledky experimentů, tj. intervaly hodnot dosažených tvrdostí a struktury zkoumaných vzorků, jsou pro plechy tloušťky 2 mm uvedeny v tabulce 6.1 a pro plechy tloušťky 4 mm v tabulce 6.2.

Na základě zjištěných výsledků je možno popsat způsob, kterým jednotlivé parametry působí na tvrdost svarového spoje.

Tabulka č. 6.1: Struktury a číselné hodnoty tvrdostí ve svarech u plechu tloušťky 2 mm

| Tloušťka | | 2 mm | | | | | |
|----------|-----------|--------------|--------------|-----------------|--------------|--------------|--------------|
| Materiál | | S500MC | | | S355J2C+N | | |
| Vzorek | | A1 | A2 | A3 | B1 | B2 | B3 |
| ZM | Tvrdost | 200 ÷ 230 HV | 200 ÷ 230 HV | 200 ÷ 230 HV | 160 ÷ 170 HV | 160 ÷ 170 HV | 160 ÷ 180 HV |
| | Struktura | F + P | | | F + P | | |
| TOO | Tvrdost | 200 ÷ 240 HV | 200 ÷ 250 HV | 200 ÷ 230 HV | 470 ÷ 570 HV | 270 ÷ 440 HV | 230 ÷ 400 HV |
| | Struktura | F + P | F + karbidy | F + karbidy + B | M + B | M + B | M |
| SK | Tvrdost | 360 ÷ 430 HV | 200 ÷ 250 HV | 240 ÷ 260 HV | 460 ÷ 500 HV | 390 ÷ 420 HV | 350 ÷ 410 HV |
| | Struktura | M | F (ac) + B | B + F (at) | M + B | M + karbidy | M + B |

Tabulka č. 6.2: Struktury a číselné hodnoty tvrdostí ve svarech u plechu tloušťky 4 mm

| Tloušťka | | 4 mm | | | | | |
|----------|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Materiál | | S500MC | | | S355J2C+N | | |
| Vzorek | | C1 | C2 | C3 | D1 | D2 | D3 |
| ZM | Tvrdost | 220 ÷ 240 HV | 220 ÷ 240 HV | 220 ÷ 240 HV | 160 ÷ 180 HV | 160 ÷ 190 HV | 160 ÷ 180 HV |
| | Struktura | F + P | | | F + P | | |
| TOO | Tvrdost | 220 ÷ 250 HV | 230 ÷ 250 HV | 220 ÷ 250 HV | 210 ÷ 470 HV | 270 ÷ 490 HV | 240 ÷ 440 HV |
| | Struktura | M + F + P | F + karbidy | F + karbidy | M | M | B + F |
| SK | Tvrdost | 290 ÷ 330 HV | 240 ÷ 270 HV | 220 ÷ 240 HV | 450 ÷ 500 HV | 420 ÷ 450 HV | 430 ÷ 450 HV |
| | Struktura | B + F (ac) | B | F (ac) | M | M | M + karbidy |

6.2.1 Vliv výkonu laseru

Výkon laseru souvisí s tepelným příkonem, který je dodáván do materiálu a je definován jako podíl výkonu laseru a rychlosti posuvu laserové soupravy (rychlosti svařování). Jelikož rychlost posuvu byla u všech svařovaných vzorků konstantní, tak proměnným parametrem ovlivňujícím teplo vnesené do svarového spoje je výkon.

S rostoucím výkonem roste teplo dodávané do materiálu a s ním také hloubka průvaru. Nízké výkony, což znamená hodnoty 2 kW pro tloušťku 2 mm a 3 kW pro tloušťku 4 mm, způsobují rychlý ohřev, ale vlivem nedostatku vneseného tepla také prudké ochlazení svaru, což má za následek vznik martenzitu (u vzorku A1 a D1), martenzitu a bainitu (u vzorku B1) a bainitu

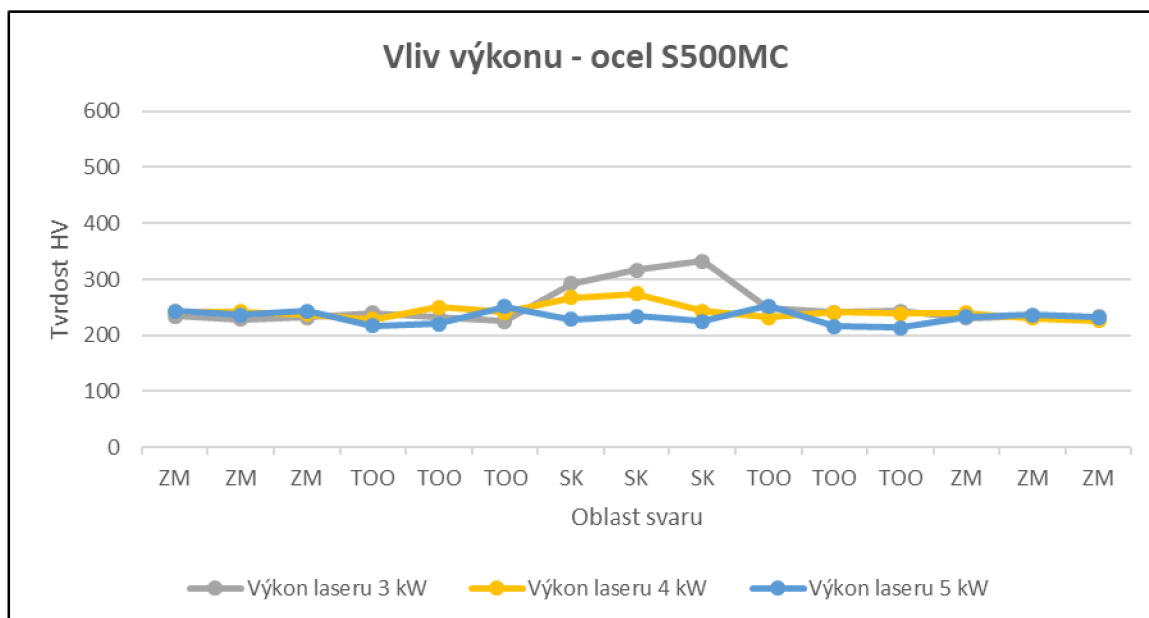
(u vzorku C1). Všechny tyto struktury způsobují nárůsty tvrdosti v oblasti SK a v případě oceli S355J2C + N také v TOO. Nízké výkony jsou také nevhodné z toho důvodu, že ani v jednom případě při použití nízkých výkonů nedošlo k plnému provaření plechu.

Při použití středních výkonů, což znamená hodnoty 3 kW pro tloušťku 2 mm a 4 kW pro tloušťku 4 mm, dochází k hlubšímu a lepšímu průvaru, ale až na vzorek C1 nedošlo v žádném jiném případě k plnému provaření plechu. Použitím středního výkonu dochází k dodání více tepla do materiálu a pomalejšímu chladnutí, což má za následek menší nárůst tvrdosti u vzorků B2 a D2 než v případě použití nízkých výkonů, ale hodnoty tvrdostí byly stále velmi vysoké. U vzorků A2 a C2 nedochází při použití středních výkonů k žádnému výraznému nárůstu tvrdosti.

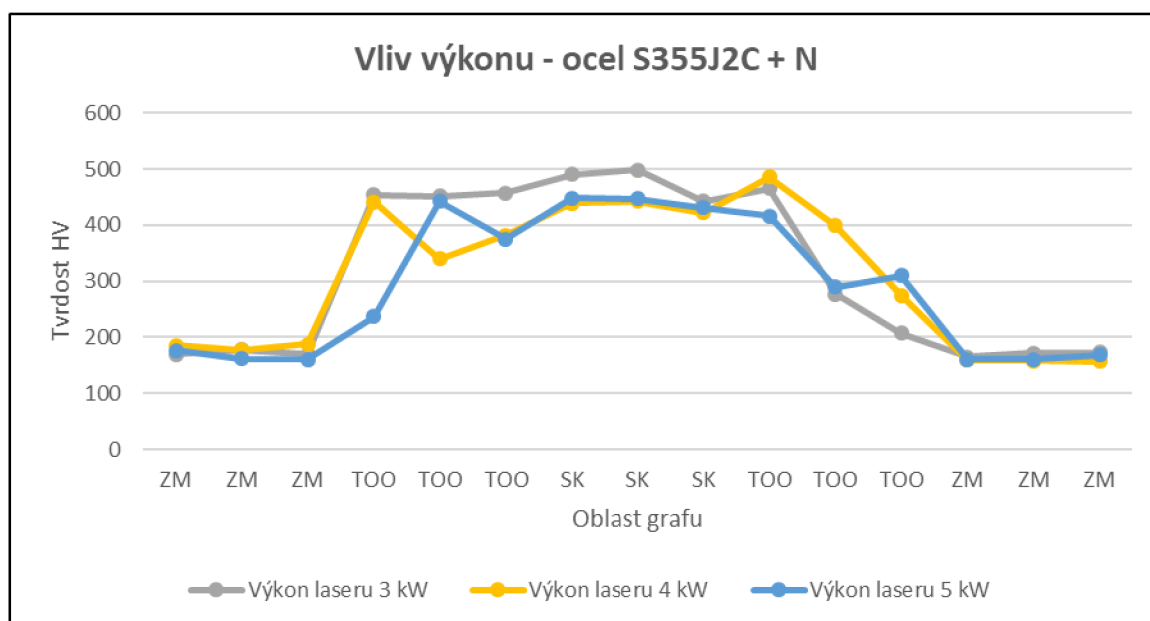
Použití vysokých výkonů, což znamená hodnoty 4 kW pro tloušťku 2 mm a 5 kW pro tloušťku 4 mm, se projevilo jako nejlepší možnost s ohledem na hloubku průvaru, jelikož u všech vzorků s těmito výkony až na vzorek D3 došlo k plnému provaření plechu. Vyšší výkony způsobily u vzorků A3 pouze mírný nárůst tvrdosti oproti ZM a u vzorku C3 nedošlo k nárůstu tvrdosti vůbec. U vzorku B3 a D3 použití vysokých výkonů vedlo ke snížení tvrdosti v TOO, ale hodnoty tvrdosti těchto vzorků byly stále vysoké.

Pro lepší názornost vlivu samotného výkonu laseru na výslednou tvrdost svaru byly pro každou ocel vyneseny hodnoty tvrdosti tří vzorků, lišících se pouze použitým výkonem laseru do níže uvedených grafů. Pro ocel S500MC se jedná o vzorky C1, C2 a C3 a pro ocel S355J2C + N se jedná o vzorky D1, D2 a D3.

Graf č. 6.1: Vliv výkonu na tvrdost svarového spoje pro ocel S500MC



Graf č. 6.2: Vliv výkonu na tvrdost svarového spoje pro ocel S355J2C + N



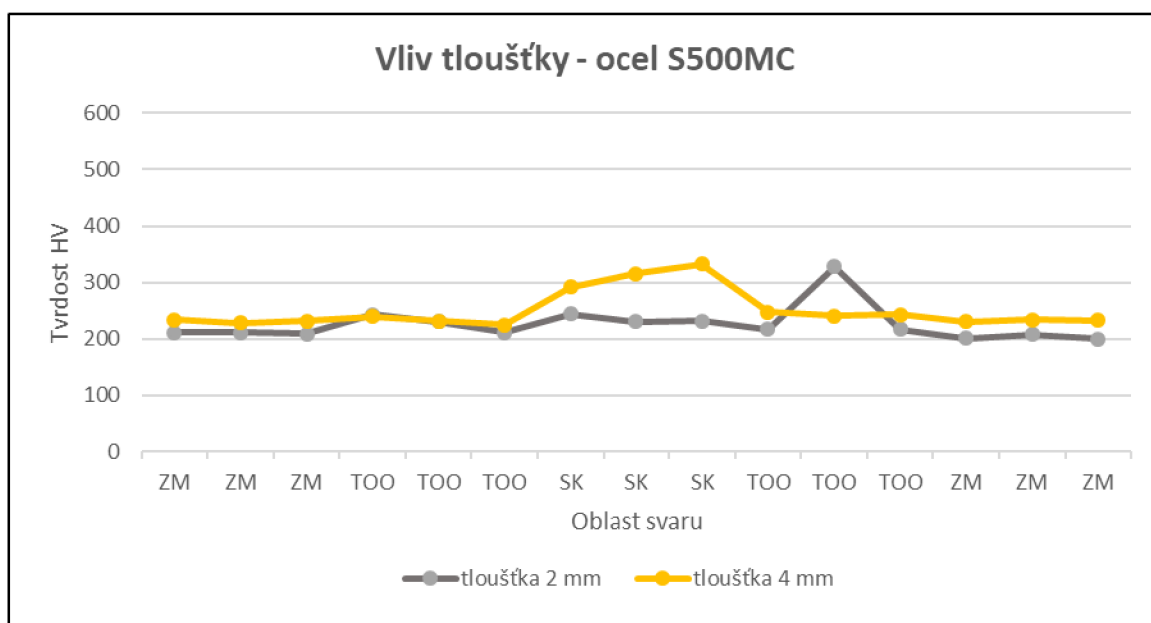
Z výše zmíněných grafů lze vidět, že jak u oceli S500MC, tak u oceli S355J2C + N došlo s navyšováním výkonu laseru k mírnému poklesu tvrdosti. Toto je způsobeno tím, že při vyšším výkonu je do materiálu vneseno více tepla, materiál tedy pomaleji chladne a při pomalejším chladnutí vznikají struktury s nižší tvrdostí.

6.2.2 Vliv tloušťky

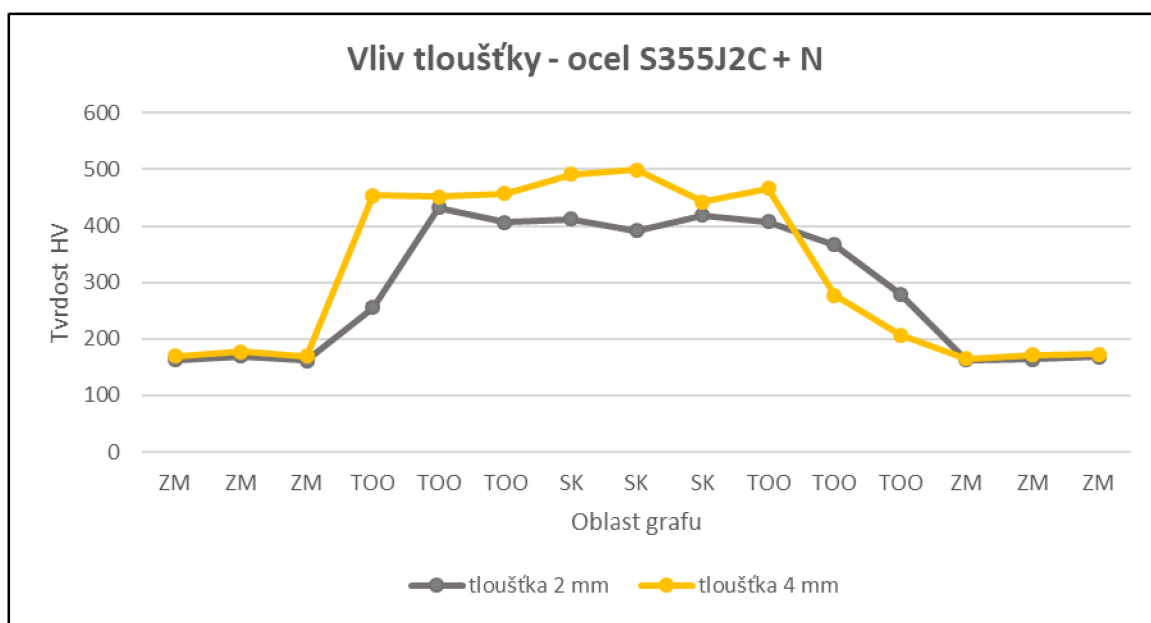
Při použití plechu tloušťky 2 mm došlo u vzorků A1 a B1 k vysokému nárůstu tvrdosti, což bylo způsobeno rychlým ohřátím a následným ochlazením vlivem ztrát tepla v materiálu a z materiálu do okolí. Tyto vzorky nelze porovnávat s ohledem na tvrdost, protože výkon 2 kW nebyl u plechu tloušťky 4 mm použit, protože jeho efekt na plech byl nedostatečný. Z tohoto důvodu by nebylo možné porovnávat zmíněné vzorky pouze s tloušťkou jako jediným proměnným parametrem. Stejná situace platí pro vzorky C3 a D3, u kterých byl použit výkon 5 kW, který nemohl být použit pro tloušťky 2 mm, protože jak již bylo zmíněno, by došlo k rozřezání plechu místo k jeho svaření. U vzorku C3, který má tloušťku plechu 4 mm, nedochází k výrazným nárůstům tvrdosti a u vzorku D3, rovněž tloušťky 4 mm, dochází k výrazným nárůstům tvrdosti oproti ZM.

Mezi zkoumanými vzorky A2, A3 a B2, B3 a vzorky C1, C2 a D1, D2 je jediným proměnným parametrem tloušťka. Všechny hodnoty tvrdosti vzorků A2, A3, C1 a C2 zaznamenávají pouze mírný nebo žádný nárůst tvrdosti v oblasti SK a TOO oproti tvrdosti ZM. Zatímco u vzorků B2, B3, D1 a D2 nastal výrazný nárůst tvrdosti oproti ZM jak v TOO, tak v oblasti SK. Nejvyšší tvrdost měl vzorek B1, který je tloušťky 2 mm, ale u toho neexistuje ekvivalent se stejným materiálem a stejným výkonem laseru, takže ho do porovnání nelze zahrnout. Pro lepší porovnání vlivu samotné tloušťky byly do grafů pro každou ocel vyneseny naměřené hodnoty tvrdosti pro dva vzorky lišící se v zkoumaných parametrech pouze tloušťkou. U oceli S500MC se jedná o vzorky A2 a C1 a u oceli S355J2C + N se jedná o vzorky B2 a D1.

Graf č. 6.3: Vliv tloušťky na tvrdost svarového spoje pro ocel S500MC



Graf č. 6.4: Vliv tloušťky na tvrdost svarového spoje pro ocel S355J2C + N



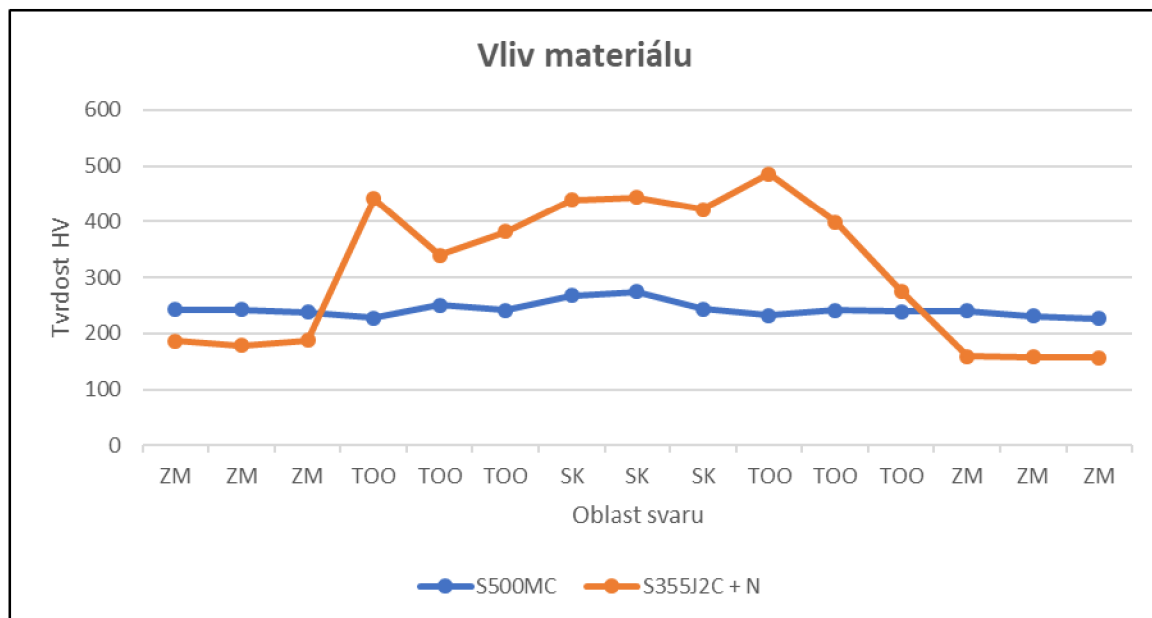
Z uvedených grafů je patrné, že u obou ocelí dochází s rostoucí tloušťkou k nárůstu tvrdosti. Tato závislost se prokázala pravdivá u všech vzorků, které lze porovnávat s ohledem pouze na měnící se tloušťku. U vzorků C1 a C2 (tloušťka 4 mm) byla naměřena větší tvrdost než u vzorků A2 a A3 (tloušťka 2 mm) a stejný jev lze pozorovat také mezi vzorky D1 a D2 a vzorky B2 a B3. Z výše uvedených grafů a porovnání je možné stanovit, že při použití stejného materiálu a shodného výkonu vychází větší tvrdost u zkoumaných vzorků s větší tloušťkou. Tento jev je způsoben tím, že u plechu s větší tloušťkou dochází při použití stejného výkonu laseru k rychlejšímu chladnutí materiálu než u plechu s menší tloušťkou vlivem ztrát tepla při šíření do materiálu.

6.2.3 Vliv materiálu

Materiál se ukázal být faktorem, který měl na tvrdost největší vliv. Vzorky z oceli S355J2C + N (jedná se vzorky řady B a D) obsahující podle příslušné normy max. 0,2 % uhlíku (viz tab. 4.2) se ukázaly jako mnohem více náchylné na nárůst tvrdosti v důsledku svařování. Vzorky řady B a D vykazovaly v TOO a v oblasti SK oproti vzorkům řady A a C tvrdost vyšší o 100 až 200 HV. Toto je způsobeno především vznikem martenzitu ve strukturách vzorků řady B a D, který vznikl, za dostatečné koncentrace uhlíku, v důsledku rychlého zahřátí a ochlazení materiálu při svařování (přejezdu svařovací soupravy s laserem). Nejvyšší hodnota tvrdosti byla u vzorku B1 a dosahovala až 570 HV. Naopak u oceli S500MC (jedná se o vzorky řady A a C), která obsahuje podle normy maximálně 0,12 % uhlíku (viz tab. 4.1), nedošlo až na vzorek A1 ke vzniku tvrdé martenzitické struktury z důvodu právě nedostatku uhlíku. Většina struktur vzniklých v důsledku svařování vzorků řady A a C byly bainitická, feriticko-perlitická a feriticko-karbidická struktura, popř. se skládala z acikulárního či alotriomorfního feritu. Žádná z těchto struktur nevykazuje takové hodnoty tvrdostí jako martenzit, a proto u vzorků řady A a C nebyly naměřeny tak vysoké hodnoty tvrdosti jako u vzorků řady B a D.

Pro lepší přehlednost byly hodnoty tvrdostí od dvou vzorků (C2 a D2) lišících se pouze typem použité oceli vyneseny do níže uvedeného grafu. Z tohoto grafu je patrné, že svary zhotovené s použitím oceli S355J2C + N dosahují mnohem vyšších hodnot tvrdosti než svary využívající jako ZM ocel S500MC.

Graf č. 6.5: Vliv použité oceli na výslednou tvrdost svarového spoje



6.2.4 Zhodnocení svarů

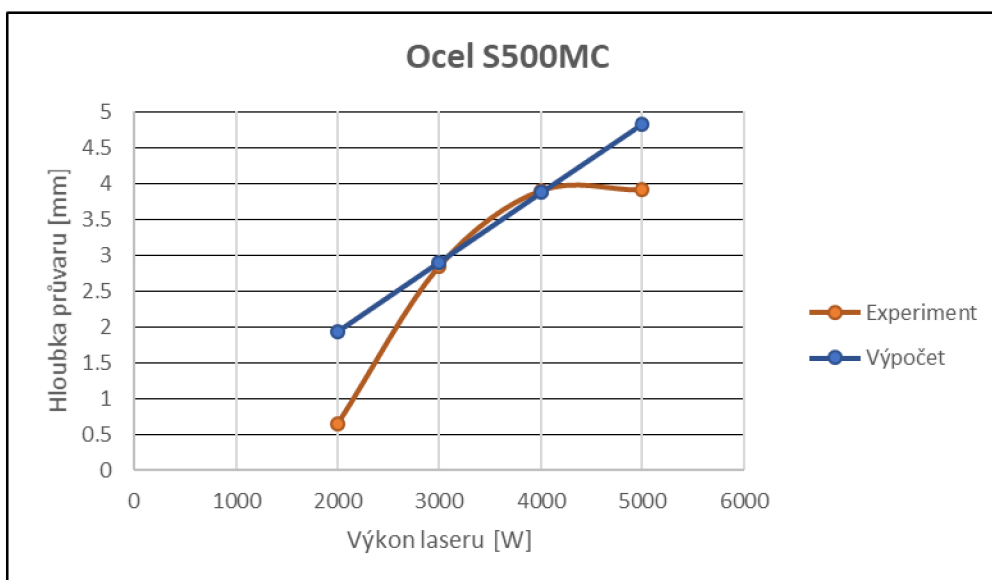
Hranice maximální povolené tvrdosti není u svarů zhotovených pomocí laserového svařování v normě ČSN EN 15614-11 definována (více viz kapitola Tvrdost a její měření). Při použití hodnoty tvrdosti 380 HV z normy ČSN EN 15614-1 o obloukovém svařování by naměřené hodnoty tvrdostí u vzorků A1, B1, B2, B3, D1, D2 a D3 v TOO anebo v oblasti SK přesahovaly

tuto hranici, ale jelikož se jedná o laserové svařování, tak nelze jednoznačně rozhodnout, zda by tyto hodnoty tvrdostí byly rizikové.

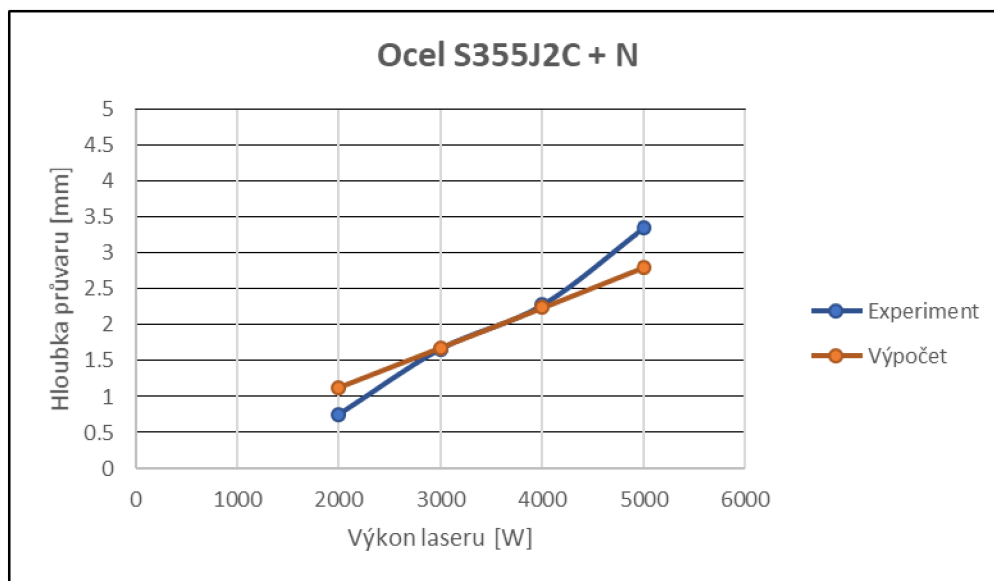
6.3 Diskuze vypočtených hodnot průvarů

Z tabulky 5.1 lze vyčíst, že pro vzorky B2, C1, C2, D1, D2 se experimentálně zjištěné hodnoty hloubek průvarů shodují s vypočtenými hodnotami podle vzorce Metzbowera v řádech desetín milimetru. U vzorků B3 a C3 došlo k plnému průvaru plechu, tudíž nebylo možné experimentálně zjistit, k jak hlubokému průvaru by došlo v případě, že by plech byl větší tloušťky, a o platnosti vzorce tedy nelze pro tyto vzorky rozhodnout. Pro vzorky A1, A2, A3, B1 a D3 se vzorec ukázal jako neplatný. Oblasti použitelnosti vzorce se liší podle použité oceli a vyjadřují je níže uvedené grafy.

Graf č. 6.6: Porovnání experimentálně naměřené hloubky průvarů s hloubkou průvaru získanou z výpočtu podle vztahu Metzbowera pro ocel S500MC



Graf č. 6.7: Porovnání experimentálně naměřené hloubky průvarů s hloubkou průvaru získanou z výpočtu podle vztahu Metzbower pro ocel S355J2C + N.



Na uvedených grafech lze vidět, že vzorec je použitelný pro obě oceli v rozmezí výkonů laseru mezi 3 a 4 kW. Jak je zřejmé z grafů i tabulky hodnot, vzorec se neprokázal funkční při použití výkonu laseru 2 kW. Toto je pravděpodobně způsobeno tím, že vzorec neuvažuje teplo spotřebované na natavení přídavného materiálu, který byl při svařování používán, a také neuvažuje ztráty energie laserového paprsku způsobené vlivem odrazivosti povrchu materiálu. Tyto zmíněné faktory v praxi snížily teplo dodávané paprskem, a jelikož použitý výkon byl malý, tyto ztráty měly na hloubku průvaru výrazný vliv. Metzbowerův vztah také nezahrnuje vliv tloušťky plechu na průvar, což bylo problematické převážně u oceli S500MC, která vykazovala různé hloubky průvarů pro plech tloušťky 2 mm a 4 mm. Tloušťka plechu, jak již bylo zmíněno, souvisí s rychlostí chladnutí materiálu – čím rychleji materiál chladne, tím více energie je potřeba dodat, abychom dosáhli hlubšího průvaru. Ocel S355J2C + N vykazovala stejné hloubky průvarů nezávisle na tloušťce v oblasti použitelnosti vzorce reprezentované výše uvedeným grafem.

7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo ověřit, jaký vliv má tloušťka materiálu, výkon laseru a druh materiálu na výslednou tvrdost svaru. Na základě výsledků z provedeného experimentu lze uvést následující tvrzení.

Bylo zjištěno, že s rostoucím výkonem laseru dochází k poklesu tvrdosti svarů. Použití vyššího výkonu znamená vyšší tepelný příkon, což má za následek dodání více tepla a pomalejší chladnutí materiálu, v důsledku kterého dochází ke vzniku struktur s nižší tvrdostí. S ohledem na nižší tvrdost a lepší průvar je vhodnější používat tepelný příkon alespoň 857 J/cm.

Tloušťka materiálu má prokazatelně vliv na jeho tvrdost. Po vyhodnocení experimentu se prokázalo, že s rostoucí tloušťkou dochází k nárůstu tvrdosti svaru. Toto zapříčiňuje skutečnost, že plech větší tloušťky chladne rychleji než plech menší tloušťky a s vyšší rychlostí ochlazování dochází v materiálu ke vzniku struktur s vyšší tvrdostí. Tento výsledek vyvrací původní hypotézu, že při svařování plechů s menší tloušťkou dochází k vyšším nárůstům tvrdosti než u svařování plechů s větší tloušťkou.

Faktor, který měl na výslednou tvrdost materiálu největší vliv, byl druh materiálu, respektive jeho chemické složení. Ocel S355J2C + N vykazovala větší nárůsty tvrdosti ve svarovém spoji než ocel S500MC, a to o 100 až 200 HV. Toto je způsobeno vyšším obsahem uhlíku v oceli S355J2C + N, který je při rychlém ochlazení svaru uzamčen ve struktuře, čímž ve svaru vzniká martenzit.

V této závěrečné práci byla také posuzována funkčnost vztahu Metzbowera pro výpočet hloubky průvaru pro různé výkony laseru. Bylo vyzpozorováno, že tento vztah se shoduje se skutečným průvarem v případě použití výkonů v rozsahu 3 ÷ 4 kW. Pro výkon nižší než 3 kW byl výpočtový vztah nefunkční. Rozsah experimentu byl v tomto ohledu omezený pouze na proměnnou hodnotu výkonu. Bylo by možné zkoumat vliv i jiných proměnných parametrů zmíněného vzorce, jako je např. rychlost posuvu či průměr laserového paprsku, ale to už by přesahovalo zadání a rozsah této závěrečné práce.

8 Literatura

[1] *Bombardier* [online]. ©2019 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z:

<https://rail.bombardier.com/en.html>

[2] Historie. *Bombardier* [online]. ©2019 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z:

<http://www.bombardier.trudo.cz/historie.php>

[3] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II část svařování díl 1 Základní metody tavného svařování: Syllabus přednášek* [online]. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Odbor svařování a povrchových úprav, 2006 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_2_specialni_metody_svarovani_kubicek.pdf

[4] KUBÍČEK, Jaroslav. *Technologie II část svařování díl 2 Speciální metody tavného svařování tlakové svařování: Syllabus přednášek* [online]. 1. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Odbor svařování a povrchových úprav, 2006 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/svarovani/img/opory/5te_technologie_2_specialni_metody_svarovani_kubicek.pdf

[5] KOŘÁN, Pavel. Seriál na téma lasery - Laserové svařování I (laser welding). In: *LAO-lasery a optika* [online]. LAO - průmyslové systémy, 2014, 15.7.2011 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134>

[6] GIBSON, Stuart W. *Advanced Welding*. Hampshire: MacMillan, 1997, 311 s. ISBN 0-333-65384-X.

[7] NOVÁK, Miroslav a Pavel KOŘÁN. Seriál na téma lasery - Základní princip laseru a jejich dělení. In: *LAO-lasery a optika* [online]. LAO - průmyslové systémy, 2014, 15.3.2011 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---zakladni-princtip-laseru-127>

[8] SATTEL, Sam. How do lasers work. *Autodesk* [online]. 2016 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/how-lasers-work/>

[9] NOVÁK, Miroslav a Pavel KOŘÁN. Seriál na téma lasery - Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. In: *LAO-lasery a optika* [online]. LAO - průmyslové systémy, 2014, 15.3.2011 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu-128>

[10] ČSN EN 1011-6: *Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 6: Laserové svařování*. Praha: Český normalizační institut, 2019.

[11] ŠEBESTOVÁ, Hana. *Vybrané aspekty laserového svařování* [online]. Olomouc, 2012 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z:

https://theses.cz/id/98ehx6/disertace_sebestova_vybrane_aspekty_laseroveho_svarovani.pdf.

Disertační práce. Univerzita Palackého v Olomouci. Vedoucí práce Prof. RNDr. Miroslav Hrabovský, DrSc.

[12] PETERKA, Pavel a kol. *Vláknové lasery* [online]. 1. Praha: Academia, 2014 [cit. 2019-05-19]. Věda kolem nás. Dostupné z: http://www.vedakolemna.cz/miranda2/m2/sys/galerie-download/vkn_002_2014_web.pdf?0.4956516915733742

[13] BARTÁK, Jiří a kolektiv. *Svařování kovů v praxi: materiály, výpočty, technologie, požadavky na jakost, bezpečnost práce*. 1. 1. Praha: Dashöfer, 2012. ISSN 1805-2835.

[14] *Zkoušení materiálů a výrobků: Studijní opory* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/zmv/Index.html>

[15] ŠEBESTOVÁ, Hana. Základy přípravy vzorků pro optickou metalografii. In: *Portál moderní fyziky* [online]. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2008 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/texty/znm2-1.pdf>

[16] *Příprava a hodnocení metalografických vzorků: Studijní opory* [online]. Brno: ÚMVI FSI Vysoké učení technické v Brně [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://imse.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/phmv/index.php>

[17] *Nauka o materiálu - Distanční výuka* [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: <http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/opory/nomd/Index.html>

[18] *ČSN EN ISO 6507-1: Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2018.

[19] *ČSN EN ISO 15614-1: Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 1: Obloukové a plamenové svařování ocelí a obloukové svařování niklu a slitin niklu*. Praha: Český normalizační institut, 2018.

[20] *ČSN EN ISO 15614-11: Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 11: Elektronové a laserové svařování*. Praha: Český normalizační institut, 2003.

[21] *ČSN EN 10027-1: Systémy označování ocelí - Část 1: Stavba značek ocelí*. Praha: Český normalizační institut, 2017.

[22] *ČSN EN 10149-2: Ploché výrobky válcované za tepla z ocelí s vyšší mezí kluzu pro tváření za studena - Část 2: Technické dodací podmínky pro termomechanicky válcované oceli*. Praha: Český normalizační institut, 2014.

[23] *ČSN EN 10025-2: Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí - Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli*. Praha: Český normalizační institut, 2005.

[24] LOSKOT, Michal. Osobní konzultace, Česká Lípa 1.2.2019.

- [25] Welding head YW52 - basic model. *Precitech* [online]. Precitec Group, 2019 [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.precitec.de/en/products/joining-technology/processing-heads/yw52/#tab1>
- [26] YLS-5000. *Gophotonics* [online]. GoPhotonics, 2017 [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: <https://www.gophotonics.com/products/lasers/ipg-photonics/29-152-yls-5000>
- [27] *Inspekční certifikát číslo 153845.1*. Wattignies Cedex, 2017.
- [28] C.A. WALSH. *LASER WELDING - Literature Review* [online]. Cambridge: Materials Science and Metallurgy Department, University of Cambridge, 2002 [cit. 2019-04-20]. Dostupné z: https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2011/laser_Walsh_review.pdf
- [29] Key hole welding and keyhole porosity. In: *Allied Scientific Pro* [online]. Gatineau: Allied Scientific Pro., ©2018 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://alliedscientificpro.com/web/image/58822>
- [30] Components of the first ruby laser. In: *Laserfest* [online]. 2019 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: http://www.laserfest.org/lasers/images/rubylaser_components.jpg
- [31] Vlákenný laser. In: *Laser a optika* [online]. LAO - průmyslové systémy, 2014 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: http://www.lao.cz/pictures/jpg/lao_info_preview/serial/9.png
- [32] Electron beam welding. In: *Mech4study* [online]. Mech4study, 2019, 14.4.2017 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: https://3.bp.blogspot.com/-1cO_sKLwSWY/WPBpziOQbRI/AAAAAAAAACVQ/neJvxXFRpPggwURRmPe_eqUYG1dV13zFgCLcB/s1600/ebw.jpg
- [33] Plasma welding. In: *Ionix* [online]. Ionix Oy, 2018 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: http://www.ionix.fi/content/wp-content/uploads/2015/10/plasma_welding.jpg
- [34] Vickers hardness test. In: *Leaving Certificate Engineering Notes* [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: https://sites.google.com/site/gobanengineeringnotes/_/rsrc/1280266727733/materials-testing/hardness-testing/vickers-hardness-test/Image%209.png
- [35] Welding head YW52 - basic model. In: *Precitech* [online]. Precitec Group, 2019 [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: https://www.precitec.de/typo3temp/_processed_/csm_YW52_Basis_72a717e028.jpg