

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Svařování explozí

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

Diplomant: Bc. Ondřej Holý

PRAHA 2013

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra materiálu a strojírenské technologie

Technická fakulta

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Holý Ondřej

Obchod a podnikání s technikou

Název práce

Svařování explozí

Anglický název

Explosive welding

Cíle práce

shromáždit informace o různých metodách svařování se zaměřením na svařování explozí, experimentálně posoudit kvalitu svarů, příp. návarů, zhotovených vybranými technologiemi

Metodika

současný stav řešeného problému (literární rešerše),
cíle práce a metody jejího zpracování,
výsledky experimentů a jejich diskuse,
závěry a přínos práce.

Osnova práce

1. Úvod.
2. Podstata svařování, výhody a nevýhody jednotlivých metod.
3. Použitelnost jednotlivých metod svařování v praxi.
4. Experimentální posouzení kvality svarů, příp. návarů, zhotovených vybranými technologiemi.
5. Závěr.

Rozsah textové části

cca 60 stran

Klíčová slova

svařování, přídatné materiály, laboratorní zkoušky, svařování explozí

Doporučené zdroje informací

ANDERSON, D. K. C.: Explosive welding. Cambridge, Welding Institut 1976.
BEREZIN, A. F.: Svarka i rezka vzryvom. Moskva, NIIMAS 1965.
BLAŠČÍK, F. aj.: Technológia tvárnenia, zlievárenstva a zvárania. Bratislava, ALFA 1987.
HOLÝ, O.: Svařování výbuchem [Bakalářská práce]. Praha, TF ČZU 2011.
CHLÁDEK, L. - NĚMEČEK, J. - VACEK, J.: Výbuchové svařování kovů a příbuzné procesy. Praha, Nakladatelství technické literatury 1979.
CHLÁDEK, L. - NĚMEČEK, J. - VACEK, J.: Výbuchové svařování a plátování kovů. Pardubice, Výzkumný ústav průmyslové chemie 1973.
STEDFELD, R. L.: Metals handbook. Vol. 6., Welding, brazing, and soldering. 9. ed. Metals Park, Oh., American Society for Metals, 1983.
WEMAN, K.: Welding processes handbook. Cambridge, Woodhead 2003.
Časopisy: MM Průmyslové spektrum, SDSM (Svařování, dělení, spojování materiálů), Strojárstvo / Strojírenství, Svět svaru, Technický týdeník, Technik, Zváranie / Svařování.
Firemní literatura: katalogy, prospekty, prezentace.

Vedoucí práce

Brožek Milan, prof. Ing., CSc.

Termín zadání

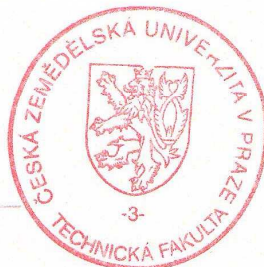
listopad 2011

Termín odevzdání

duben 2013

prof. Ing. Milan Brožek, CSc.

Vedoucí katedry



prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

Děkan fakulty

V Praze dne 6.2.2012

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením pana prof. Ing. Milana Brožka, CSc., použil jen literární prameny citované v přiložené bibliografii a informace získané při realizaci a následném hodnocení výbuchových a tavných návarů.

V Praze dne 21. 3. 2013

podpis autora

Poděkování

Děkuji panu prof. Ing. Milanu Brožkovi, CSc. za odbornou pomoc při psaní práce, za poskytnutí základního materiálu a vzorků strojových návarů, dělení materiálu vodním paprskem a laboratorní zázemí. Mé poděkování patří také dalším členům katedry materiálu a strojírenské technologie na ČZU panu doc. Ing. Rostislavovi Chotěborskému, Ph.D. a Ing. Jiřímu Cieslarovi, kteří mi pomohli s přípravou vzorků pro metalografii. Dále panu Miloslavovi Markovi za dělení vzorků pásovou pilou a broušení na ploché brusce, Milanovi Klímovi za zkušební návar a koutový svar obalenou elektrodou. Děkuji panu Ing. Petru Nesvadbovi za pomoc při realizaci výbuchového plátování na půdě univerzity v Pardubicích a za informace k řešenému tématu.

Svařování explozí

Abstrakt: Diplomová práce je zaměřena na technologie svařování kovů, zejména pak svařování explozí. V teoretické části práce budou stručněji popsány běžně používané metody svařování kovů i metody méně obvyklé a speciální. Jednou z nich je i svařování explozí, které bude popsáno podrobně. U každé technologie budou zmíněny výhody, nevýhody a využití v praxi. Praktická část práce bude zaměřena přímo na konkrétní metody svařování. Za tímto účelem byly zhotoveny vzorky návarů, které budou experimentálně posouzeny. Cílem praktické části práce bude zpracování a vyhodnocení výsledků a porovnání s dosud známými údaji z literatury. Závěr práce bude patřit shrnutí řešené problematiky.

Klíčová slova: svařování, přídavné materiály, laboratorní zkoušky, svařování explozí

Explosive welding

Summary: Thesis is focused on the technology of welding metals, especially welding explosion. In the theoretical part of the paper will briefly describe commonly used methods of metals and welding methods are less common and special. One of them is the explosion welding, which will be described in detail. For each technology will be mentioned advantages, disadvantages and practical application. The practical part of the work will be focused on specific welding methods. For this purpose, samples of weld deposits were made, which will be experimentally assessed. The aim of the practical part of the processing and evaluation of results and comparison with the known data from the literature. The conclusion will include a summary of solved problems.

Key words: welding, filler materials, laboratory testing, welding explosive

Obsah

ÚVOD.....	1
1. CÍL PRÁCE A METODIKA	2
1.1 CÍL PRÁCE.....	2
1.2 METODIKA PRÁCE	2
2. SVAŘOVÁNÍ KOVŮ	3
2.1 VZNIK SVARU	3
2.2 SVAŘITELNOST.....	3
2.3 ZÁKLADNÍ POJMY	4
2.4 SVAROVÝ SPOJ A JEHO DRUHY.....	5
2.5 TVARY A ROZMĚRY SVAROVÝCH PLOCH	6
2.6 METALURGICKÁ STRÁNKA PROCESU	6
3. TAVNÉ SVAŘOVÁNÍ.....	7
3.1 OBLOUKOVÉ SVAŘOVÁNÍ	8
3.1.1 Zdroje svařovacího proudu.....	8
3.1.2 Ruční svařování obalenou elektrodou.....	9
3.1.3 Automatizované svařování a navařování pod tavidlem.....	10
3.1.4 Elektrostruskové svařování	12
3.1.5 Svařování v ochranných atmosférách	13
3.2 SVAŘOVÁNÍ PLAMENEM	17
4. TLAKOVÉ SVAŘOVÁNÍ	19
4.1 SVAŘOVÁNÍ TŘENÍM	19
4.2 SVAŘOVÁNÍ ULTRAZVUKEM	20
4.3 SVAŘOVÁNÍ KOVŮ TLAKEM ZA STUDENA.....	21
4.4 DIFÚZNÍ SVAŘOVÁNÍ.....	22
4.5 SVAŘOVÁNÍ EXPLOZÍ	23
4.5.1 Podstata svařování explozí	23
4.5.2 Dynamické účinky procesu	24
4.5.3 Kovy vhodné pro svařování explozí	24
4.5.4 Výbušniny.....	25
4.5.5 Plátování rovinných ploch	27
4.5.6 Výbuchové svařování nerovinných ploch	32
4.5.7 Bodové a liniové svařování explozí.....	33
4.5.8 Využití technologie v praxi	33
SVARY VÁLCOVÝCH PLOCH	35
4.5.9 Spojované kovy a jejich vlastnosti.....	36
5. ZHOTOVENÍ ZKUŠEBNÍCH NÁVARŮ	39
5.1 TAVNÉ NÁVARY.....	39
5.1.1 Ruční svařování obalenou elektrodou.....	39

5.1.2 Ruční svařování metodou TIG	42
5.1.3 Poloautomatické návary metodou MAG.....	42
5.1.4 Trubičkové návary MOG.....	43
5.2. VÝBUCHOVÉ PLÁTOVÁNÍ.....	44
5.2.1 Pracoviště pro svařování explozí.....	44
5.2.2 Příprava sestavy.....	45
5.2.3 Parametry svařování explozí.....	47
6. PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO METALOGRAFII.....	50
6.1 DĚLENÍ ZKUŠEBNÍCH NÁVARŮ	50
6.1.1 Dělení elektrickou pásovou pilou	50
6.1.2 Dělení vodním paprskem.....	50
6.1.3 Výbrusy pro makrostrukturu	51
6.1.4 Makrostruktura.....	52
6.1.5 Mikrostruktura	57
6. EKONOMICKÉ HLEDISKO SVAŘOVÁNÍ EXPLOZÍ.....	63
7. ZÁVĚR	64
POUŽITÉ ZDROJE:.....	66
SEZNAM OBRÁZKŮ:	67
SEZNAM TABULEK:	69

Úvod

Svařování kovových materiálů umožňuje vytvářet pevné, nerozebíratelné a trvanlivé spoje dvou nebo více dílů. Jeho historie sahá čtyři tisíce let před náš letopočet, kdy člověk začal objevovat možnosti tváření a spojování železných a měděných rud, ze kterého vznikla nejstarší technologie nazvaná kovářské svařování. Ta byla až do nedávné doby jedinou známou a užívanou technologií svařování kovů. V 19. století však začal rozmach nových technologií jako je svařování plamenem a obloukové svařování, které vystřídalo doposud dominantní svařování kovářské.

V dnešní době jsou technologie svařování velice rozmanité a většina doprovodných procesů byla podrobně popsána. Svařování kovů se stalo nedílnou součástí téměř všech odvětví průmyslu a díky zmenšování a zdokonalování svařovacích zařízení se některé technologie, jako např. obloukové svařování, stávají běžně dostupné i pro drobné uživatele. Existují však i takové, které bude možné díky své povaze vždy realizovat pouze ve specializovaných pracovištích a za přísných bezpečnostních podmínek. Jednou z těchto technologií je svařování explozí.

První výbuchové svary vznikly jako vedlejší náhodný jev při vývoji kumulativních náloží za druhé světové války. Skutečný objev však nastal až v 50. letech, kdy byly pozorovány lokální svary mezi kovem a lisovnicí při výbuchovém tváření kovů. Technologie se rychle zdokalovala a v dnešní době je již důkladně prozkoumána a zvládnuta. Zejména průmyslové velmoci, jako Spojené státy, Rusko, nebo Japonsko, zvládají výbuchová svařování ve velkých plochách a pestrých materiálových kombinacích. Také Česká republika významně přispěla ke zkvalitnění procesu.

Pro výbuchové svařování byla ve společnosti Explosia vynalezena trhavina světového významu, s názvem Semtex. Přestože svařování explozí nachází mnohdy nezastupitelné uplatnění v mnoha průmyslových odvětvích, jeho existence není příliš známa. Tato skutečnost je zřejmě dána výjimečností metody a úzkým okruhem specializovaných pracovníků a pracovišť, které se jí zabývají.

1. Cíl práce a metodika

1.1 Cíl práce

Shromáždit informace o různých metodách svařování se zaměřením na svařování explozí, experimentálně posoudit kvalitu svarů, případně návarů, zhotovených vybranými technologiemi.

1.2 Metodika práce

Bude popsán současný stav řešené problematiky (literární rešerše), cíle práce a metody jejího zpracování, příprava, provedení a výsledky experimentů, jejich diskuze, závěry a přínos práce.

2. Svařování kovů

Základy svařování sahají, jak bylo již v úvodu zmíněno, hluboko do historie. Jeho podstata a potřeba je však stále stejná, tedy pevné spojení kovových materiálů. V dnešní době, je však rozsah využití mnohem širší, než tomu bývalo dříve. Ve stavebnictví vznikají kovové konstrukce značných rozměrů a složitých tvarů, také v automobilovém průmyslu nalézá uplatnění hned několik různých technologií svařování, které jsou pro dané odvětví stěžejní. Rovněž ve strojírenství a hutnictví nahradilo svařování v mnoha případech nákladnou a pracnou výrobu odlitků. V posledních dvaceti letech se promítá do všech odvětví průmyslu vliv výpočetních technologií a miniaturizace. Otevřela se tím zcela nová kapitola automatizace a robotizace svářecích procesů ve výrobě. Dalším odvětvím kde se sváření hojně uplatňuje, je opravárenství. Zde nachází uplatnění spíše menší mobilnější svářecí stanice, které jsou operativnější a umožňují práci i v terénu [Kovařík, 2008].

2.1 Vznik svaru

Svar je nerozebíratelný pevný spoj dvou i více stejných, nebo rozdílných kovových materiálů [Hrivňák, 1989]. Rozlišujeme způsoby, jakými je tohoto spojení dosaženo. Vždy je však podmínkou vzniku svaru působení potřebného množství energie na místa spojení, u některých technologií i dodání přídatného materiálu. Existují dva způsoby vzniku svaru, jedním je **svařování tlakové**, energií je tlak. Druhým je **svařování tavné**, které vzniká za působení dodávaného tepla. Jsou i technologie, které kombinují obě možnosti [Kovařík, 2008].

Podmínkou kvalitního svaru je dostatečné přiblížení kovů a vznik kovových vazeb. Kovová vazba je stav, kdy mají atomy kovů společné valenční elektrony, které se pohybují v okolí iontů v tzv. elektronovém mraku. Zásadní vliv na kvalitu a vlastnosti svaru má způsob, jakým jsou kovy ke spojení iniciovány. U tavného svařování, dochází k roztavení kovů působením přiváděného tepla. Při tlakovém svařování jsou styčné plochy značně plasticky deformovány tlakem, je několikanásobně překročena mez kluzu kovů a ty se pak chovají podobně jako kapaliny, přestože jsou stále v tuhém stavu. I zde vzniká spoj na principech vazeb mezi kovy. [Turňa, 1989].

2.2 Svařitelnost

Ve své podstatě vyjadřuje jak snadno, nebo obtížně lze materiál spojit svařováním. Svařitelnost je však nutné posuzovat z komplexního pohledu. Pro posouzení svařitelnosti je třeba vždy uvažovat vzájemnou vazbu mezi technologií svařování, základním

materiálem a konstrukčním provedením spoje. Pro určení svařitelnosti ocelí je nutné vycházet ze souboru vhodně zvolených zkoušek, které určují vlastnosti svarového spoje podle ukazatelů svařitelnosti. Rozhodující pro svařitelnost ocelí, jsou ukazatele technologie výroby (strukturní ukazatele, ukazatele celistvosti svarového spoje a ukazatele mechanických vlastností). Znalosti provozních ukazatelů a způsoby namáhání svarového spoje jsou nezbytné pro spolehlivý provoz svarového spoje [Kuncipál, 1986].

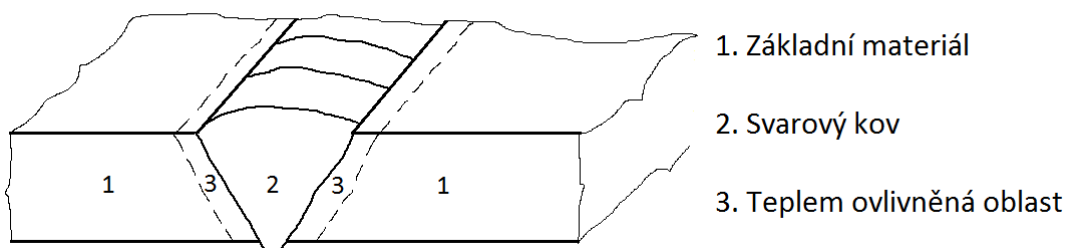
2.3 Základní pojmy

Před objasněním jednotlivých technologií, je vhodné zmínit a vysvětlit základní pojmy, které se budou dále v textu objevovat.

Základní materiál – kov spojovaných dílů

Přídavný materiál – některé tavné technologie umožňují spojení pouze základních materiálů (např. odporové svařování). Jiné vyžadují přidávání k tomuto účelu upraveného materiálu přímo do místa svaru, který slouží k doplnění hmoty, vytváří slitinu s materiálem základním, napomáhá k lepšímu průběhu svařování a zlepšuje vlastnosti svarového spoje (obr. 1) [Kovařík, 2008].

Obr. 1 Schéma svarového spoje



Při tavení kovů, dochází v různých fázích k propalu důležitých prvků, které jsou tím nenávratně zničeny. Přídavný materiál je schopen tyto ztráty částečně doplnit. Další úlohu má přídavný materiál např. při výrobě návarů odolných proti oděru, či korozivzdorných návarů atd. Konkrétní podoby a vlastnosti přídavných materiálů budou popsány u příslušných metod [Hrivňák, 1989].

Svarová lázeň – tvořena roztaveným kovem přídavného materiálu a nataveným kovem základního materiálu.

Tepelně ovlivněná oblast (TOO) – nachází se v těsném okolí svaru v základovém materiálu, kde sice nedošlo k úplnému roztavení, přesto je její struktura vlivem vysokých teplot značně ovlivněna.

2.4 Svarový spoj a jeho druhy

Kovové díly je možné spojovat v různých polohách vzájemného ustavení. Existují v zásadě čtyři základní typy svarových spojů.

Tupý spoj – díly jsou spojeny čelními plochami

Rohový spoj – díly jsou umístěny pod úhlem a svar je v místě jejich okrajů

Přeplátovaný spoj – díly jsou umístěny souběžně a vzájemně se překrývají

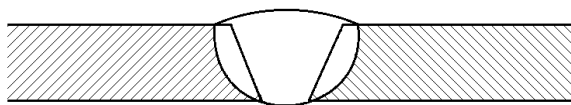
Spoj T – na povrch jednoho dílu je pod úhlem čelně navařen díl druhý.

Někdy se mohou používat kombinace těchto spojů, např. u svařovaných konstrukcí. V praxi se často hovoří přímo o svaru. Z tohoto hlediska lze uvést následující druhy svarů.

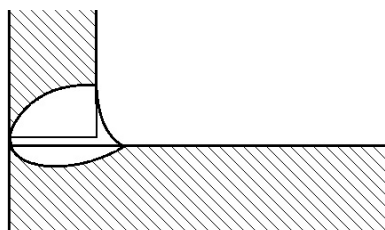
Tupý svar – mezi díly je nutné dodržet předepsanou mezeru, která zaručuje dostatečné provaření spoje (obr. 2). V případě větší tloušťky svařovaných dílů může být svar oboustranný.

Koutový svar – svar rohového, přeplátovaného, nebo „T“ spoje (obr. 3). Tvar může být plochý, vydutý, nebo převýšený. Pokud svary probíhají po celé délce dílu, nazývají se průběžné.

Obr. 2 Tupý svar



Obr. 3 Koutový svar



Bodový svar – díly jsou spojeny pouze v bodech.

Lemový svar – vzniká roztavením olemovaných krajů, při svařování tenkých plechů.

Děrový svar – užívá se ke spojování dílů plochami k sobě. V jednom z dílů je otvor, který je zaplněn svarovým kovem a dojde ke spojení obou dílů [Kovařík, 2008].

2.5 Tvary a rozměry svarových ploch

Aby došlo k dokonalému spojení základního materiálu a svarového kovu, musí být připraveny na svařovaných dílech svarové plochy. Mají různé tvary pro určité způsoby svařování, které stanovují předepsané normy. Tvar a rozměr těchto ploch ovlivňuje svařovaný materiál, tloušťka svařovaných dílů, způsob a technologie svařování, konstrukční řešení svařovaných dílů, provozní podmínky a druh zatížení, výrobní možnosti atd. [Bernasová, 1988].

Sestava svarku

Svarkem je nazývána jednoduchá sestava dvou, nebo více dílů určených ke svaření. Složitá a rozměrná sestava svarků se nazývá svařenec. Druh svarového spoje volíme vždy s přihlédnutím k jeho účelu. Můžeme tvořit spoje tupé, křížové, rohové i přeplátované. Tupé spoje mají značné výhody, proto jsou upřednostňovány před ostatními. Pevnost spoje se blíží pevnosti základního materiálu. Zařízení, která umožňují rychlou, snadnou a přesnou manipulaci se svařovanými díly se nazývají **polohovadla**. Jejich užívání významně usnadňuje a zrychluje proces svařování [Bernasová, 1988].

2.6 Metalurgická stránka procesu

Zejména u tavného svařování je podstatou metalurgických reakcí fyzikálně-chemické působení mezi svarovou lázní, roztavenou struskou (obal elektrod) a plynovou atmosférou. Reakce mají vysokou intenzitu, trvají krátkou dobu a jejich stav není rovnovážný. Začínají v kapkách odtavujícího se přídavného materiálu a jsou dokončovány ve svarové lázni. Ta je vystavena během svařovacího procesu účinkům prostředí, které jí obklopuje. Některé prvky obsažené ve vzduchu mají na roztavené kovy ve svarové lázni zásadní negativní účinky. Jedná se zejména o kyslík a dusík. Svarovou lázeň je proto nutné před vlivy okolí chránit [Kovařík, 2008].

Základní metalurgické procesy při tavném svařování:

Oxidace svarového kovu – kyslíkem z okolní atmosféry, nebo z nedostatečně očištěných svarových ploch, vzniká nežádoucí FeO.

Redukční procesy manganu a křemíku – hlavními složkami tavidel a obalů elektrod jsou mangan a křemík. Podle molekulární teorie strusek je přechod křemíku a manganu do svarového kovu po jejich redukci doprovázen oxidací železa a přechodem vzniklého FeO do strusky [Kuncipál, 1986].

Dezoxidace FeO – rozpuštěného ve svarové lázni, protože pouze část přešla do strusky. Provádí se převážně feromanganem, ferosiliciem, nebo ferotitanem. Mn, Si a Ti vytváří s FeO oxidy, které se však ve svarové lázni nerozpouští a přechází do strusky.

Odstranění škodlivých látek ze svarové lázně – dusík, vodík, fosfor a zejména síru, je nutné odstranit. Sulfidy (dvouprvkové sloučeniny síry s kovovým prvkem) tvoří s železem eutektikum (směs látek, jejichž krystaly se při tuhnutí tvoří společně) soustředěné uprostřed svarové housenky. Toto místo zůstává nejdéle tekuté a může zde vzniknout úzký vrub, jako zárodek trhliny [Kovařík, 2008].

Deformace a napětí svarového spoje

Jednou ze základních fyzikálních vlastností materiálů je tepelná roztažnost. Projevuje se změnou objemu v závislosti na teplotě. S rostoucí teplotou se těleso zvětšuje, při ochlazení zmenšuje. I malé zvýšení teplot, v řádu desítek stupňů, může způsobit zvětšení objemu. Změny objemu mohou probíhat pouze tehdy, pokud tělesu nic nebrání.

Pokud bude např. proveden návar, kde chladný základový kov v okolí svaru představuje pevné upnutí materiálu a vlastní svar se podobá pevně upnuté tyči, chladnutí svarové housenky způsobí **deformaci** v podobě prohnutí celého základového materiálu. Když bude stejný návar zhotoven na tlustou základovou desku, změny tvaru se díky tuhosti desky neprojeví. Síly, které chtějí tuto deformaci způsobit, však nejsou odstraněny, ale zůstávají v podobě **vnitřního pnutí**. Při svařování tedy rozlišujeme dva jevy, jedním je deformace a druhým vnitřní pnutí. [Bernasová, 1988].

Výskyt těchto jevů a jejich intenzita, závisí do značné míry na způsobu svařování a zručnosti svářeče. Mezi další činitele, které významně ovlivňují výskyt deformací a pnutí, patří teplota ohřevu, velikost svaru, počet svarových vrstev, druh svaru, postup svařování, sestava svarků a rychlost svařování. Tepelným zpracováním svařených dílů, lze vnitřní napětí snížit, nebo zcela odstranit. Používá se žihání na snížení napětí. Původní vlastnosti a struktura oceli zůstanou téměř nezměněny. Žihání je ohřev na teplotu kolem 600 °C, setrvání v této teplotě a pomalé ochlazení. Předehřev materiálu před svařováním rovněž snižuje vnitřní napětí ve svaru. [Bernasová, 1988].

3. Tavné svařování

Tavná svařování jsou v současné době nejvíce užívané technologie spojování kovů a jejich význam je stěžejní pro většinu průmyslových odvětví (automobilový průmysl, strojírenství). Důvodem je vysoká produktivita, dobrá kvalita svarů, dostupnost

technologí a snadná automatizace a robotizace procesu. Některé varianty tavného svařování lze úspěšně provádět i v terénu, proto je hojně využíváno také v opravárenství, stavebnictví apod.

3.1 Obloukové svařování

Využívá tepla, které vzniká hořením elektrického oblouku, mezi základním materiálem a elektrodou. Elektrický oblouk je výboj v plynech. Jeho výkon, tvar a teplota lze v širokém rozsahu měnit, přesně podle technologických požadavků. Díky této variabilitě vzniklo více způsobů obloukového svařování - ruční svařování obalenými elektrodami, svařování pod tavidlem, svařování v ochranných atmosférách [Kuncipál, 1986].

3.1.1 Zdroje svařovacího proudu

Zdroje svařovacího proudu přeměňují hodnoty síťového napětí a proudu na hodnoty potřebné pro stabilní hoření oblouku. Dělí se na zdroje:

střídavého proudu – transformátory

stejnoseměrného proudu – točivé (dynama),

– netočivé (usměrňovače, měniče neboli invertory)

Transformátor – výhodou je zejména nízký příkon při běhu naprázdno, dobrá regulovatelnost a ve spojení s vhodnou elektrodou i dobré svařovací vlastnosti. Nevýhodou je poměrně neklidné hoření oblouku s větším rozstříkáním, který je dán průběhem střídavého proudu (změnou polarit a zhasínáním oblouku). Další nevýhodou může být vysoká hmotnost.

Dynamo – pohání jej třífázový elektromotor, připojený do sítě, nebo spalovací motor. Zařízení pak není závislé na elektrické síti. Výhodou jsou dobré svařovací vlastnosti a nízké nároky na údržbu. Nevýhodou vysoký příkon a hmotnost, hluk a víření prachu chladícím ventilátorem [Bernasová, 1988].

Usměrňovač – přeměňuje a usměrňuje střídavý proud na stejnosměrný. Vykazuje velmi dobré svařovací vlastnosti, které se dají měnit, což činí tyto zdroje variabilní a použitelné pro různé technologie. Výhodou je tichý chod, nízký příkon naprázdno a přijatelná hmotnost. Patří mezi nejpoužívanější zdroje pro obloukové svařování.

Měnič (invertor) – princip činnosti spočívá ve změně frekvence, např. střídavého proudu (50 Hz) na frekvenci mnohem vyšší (16 – 20 kHz). Zařízení má velmi dobré výkonové

parametry, je lehké, tedy velice mobilní a spolehlivé. Oblast využití je široká, protože může pracovat jak se střídavým, tak se stejnosměrným proudem [Kovařík, 2008].

3.1.2 Ruční svařování obalenou elektrodou

Ruční svařování obalenou elektrodou MMAW (Manual Metal Arc Welding), hojně užívané zejména v malých provozech, pro svou jednoduchost a operativnost. Obalená elektroda plní funkci přídavného materiálu. Při svařování se odtavuje, ubývá a přechází do svarové lázně v podobě svarového kovu a strusky, která tvoří ochranný plášť na povrchu svaru.

Průběh ručního obloukového svařování

Oblouk je iniciován kontaktem mezi obalenou elektrodou a základním materiálem. V místě hoření oblouku dojde k tavení kovů a vzniká svarová lázeň. Teplota ve středu sloupce oblouku je mezi 4 200 °C a 5 700 °C [Kuncipál, 1986]. Jádro elektrody tvoří nezbytnou složku přídavného materiálu. Při procesu chladnutí je svar chráněn povrchovou struskou. Po zchladnutí se struska odstraní [Havelka, 2013].

Elektroda se skládá z kovového jádra a obalu. Jádro tvoří drát o průměru od 2 do 8 mm. Obal se skládá z různých směsí látek keramických, organických i kovových. Jeho vlastnosti zásadním způsobem ovlivňují průběh a kvalitu svaru. Chrání tekutý kov před přístupem vzduchu plynatvornými látkami (celulóza, dřevina), při jejich hoření vzniká clona ochranných plynů, většinou CO₂. Stabilizuje hoření oblouku ionizačními látkami, které usnadňují zapalování a klidné hoření. Struskotvorné látky ovlivňují metalurgické reakce v tekutém kovu, tuhnoucí tekutý kov je zároveň struskou formován a chráněn před rychlým ochlazením a okolním vzduchem (obr. 4). Tyto funkce plní např. kazipec, vápenec, křemičitany, rutil aj. Obal dále čistí a dezoxiduje svarový kov obsaženými feroslitinami, ferosiliciem, feromanganem a dalšími. Může obsahovat i některé legující prvky [Bernasová, 1988].

Obr. 4 Ochranná funkce strusky



Obr. 5 Obalené elektrody



Zdroj: http://www.esab.cz/global/en/news/images/800007_MMAprocess_big.jpg

<http://www.moje-svarecka.cz/elektrody/47-elektrody-eb-121.html>

Druhy elektrod

Podle účelu použití se dělí na elektrody pro spojovací svary nelegovaných a legovaných ocelí, neželezných kovů, dále pro navařování vrstev se zvláštními vlastnostmi a pro ostatní účely. Obalené elektrody (obr. 5) se podle vlastností a složení dělí do tří základních skupin:

Bazické – hlavní složku tvoří převážně uhličitany, oblouk je chladnější, svarová lázeň je viskózní a rychleji tuhne. To umožňuje dobré svařování i v polohách.

Kyselé – základní složkou jsou oxidy železa. Oblouk je velmi teplý a struska tekutější. Nejsou vhodné ke svařování v polohách.

Rutilové – hlavní složkou je rutil a další silikáty a uhličitany. Struska i kov jsou poměrně viskózní, umožňují svařování v polohách a zaplnění větších mezer. Vhodné i pro tenké plechy a drobnější kutilské práce [Kovařík, 2008].

Využití

Obloukové svařování obalenou elektrodou je primárně používáno pro svařování nelegovaných, nízko legovaných i vysoce legovaných materiálů tloušťky nejčastěji od 2 do 50 mm. Technologie se využívá zejména pro svařování ocelových konstrukcí, tlakových nádob, nebo v lodním průmyslu. Další aplikací je navařování, např. otěru a nárazu vzdorných vrstev, nebo návary odolávající teplotám a korozi. Obalená elektroda je vyráběna v omezených délkách, obvykle 350 až 450 mm. Proces je proto často přerušován z důvodu výměny elektrody. Díky tomu je tato technologie méně produktivní. Z celkového pracovního fondu činí produktivita hoření oblouku jen 20 až 60 %. Pro práci ve větších sériích je vhodné použít svařovací metody, které jsou snadněji mechanizovatelné, např. MIG nebo MAG [Havelka, 2013].

3.1.3 Automatizované svařování a navařování pod tavidlem

Oblouk hoří mezi holým drátem, nebo páskou a základním materiálem pod nasýpanou vrstvou tavidla. Drát se odtavuje a je přiváděn do svaru podávacími kladkami. Natavením tavidla vzniká struska, která je lehčí než svarový kov a stoupá na povrch svarové lázně. Na povrchu pozvolna tuhne a vytváří účinný ochranný obal, vyplněný plyny a parami z tavidla. Podávání drátu i pohyb zařízení probíhá automaticky, podle nastavených parametrů. Produktivita svařovacích automatů je až 5krát větší oproti ručnímu svařování, vyžaduje však použití výkonných zdrojů proudu, které jsou schopny dosáhnout potřebných parametrů. Pro tenčí materiály je vhodnější použít stejnosměrné zdroje pro

dobrou stabilitu oblouku. Zdroj proudu volíme také s přihlédnutím na podmínky regulace délky oblouku a rychlosti podávání drátu [Kovařík, 2008].

Automaty pro svařování pod tavidlem

Zařízení samočinně zapalují a udržují stabilní elektrický oblouk a zajišťují relativní pohyb přídavného materiálu vůči svařovanému dílu. Skládají se ze zdroje svařovacího proudu, regulační a ovládací skříně, svařovací hlavy a mechanismu pro její pohyb podél svaru. Stálost rozměrů svaru zajišťuje regulace délky oblouku. Regulaci lze provádět změnou podávací rychlosti drátu, která je závislá na napětí na oblouku. Elektromotor pro podávání drátu má plynulou regulaci otáček, která je závislá na délce oblouku. Zkrácení délky oblouku zmenší podávací rychlost drátu a naopak. Další možností regulace je změna odtavovací rychlosti drátu pomocí ploché statické charakteristiky zdroje. Podávací rychlost je konstantní. Změna délky oblouku vyvolá zvětšení odtavovací rychlosti tím, že se zvýší svařovací proud [Kuncipál, 1986]. Automaty se dělí na mobilní a stabilní:

mobilní automaty – pohybují se vůči svařovaným dílům podél kolejničky nebo pravítka. Jsou vhodné pro dlouhé rovné svary.

stabilní automaty – užívají se portálové, nebo sloupové konstrukce vhodné pro dlouhé svary. Ještě více se uplatňují ve spojení s polohovadly, pro obvodové svary na válcových typech svařenců (obr. 6).

Obr. 6 Sloupový automat ESAB pro obvodové svary



Zdroj: <http://www.strojon.cz/svarovani>

Přídavné materiály a tavidla

Používá se drátů, plněných elektrod, pásek v kombinaci s vhodnými tavidly. Kombinace jsou voleny tak, aby bylo dosaženo co nejbližšího složení svarového kovu, s kovem základovým. Dráty se užívají v různých průměrech.

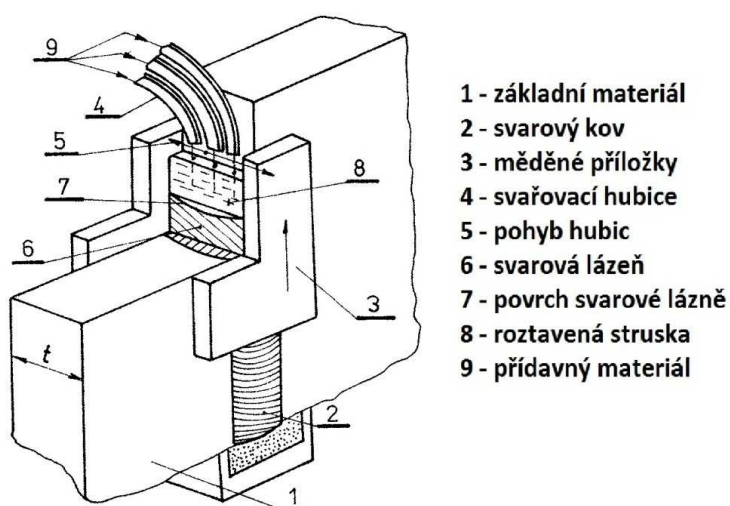
Tavidlo je v podobě zrnité krystalické hmoty, která nahrazuje obal u obalené elektrody. Plní stejné funkce a zajišťuje: rafinaci, dezoxidaci, stabilitu hoření a metalurgické procesy. Může v některých aplikacích svarovou lázeň i legovat.

Přes dobrou produktivitu, lze rychlost automatického svařování pod tavidlem ještě zvýšit (o 75 až 95 %) užitím speciálních technologií. Jednou z nich je svařování druhým horkým, nebo studeným drátem, tandemové svařování apod. Dále je výhodné použít metodu úzkomezerového svařování. Výhoda spočívá v úspoře elektrické energie, snížení vnitřních napětí a celkově tedy zvýšení efektivity práce až o 80 % [Kuncipál, 1986].

3.1.4 Elektrostruskové svařování

Elektrostruskové svařování (obr. 7) bylo vyvinuto pro spojování materiálů velkých tloušťek (50 mm a více). Důvodem bylo obtížné a nákladné svařování tlustých dílů běžnými metodami ručními i automatickými. Pokud bylo např. potřeba svařit díly o tloušťce 200 mm, bylo nutné vrstvit mnoho housenek na sebe. [Kuncipál, 1986].

Obr. 7 Schéma elektrostruskového svařování



Pro natavení základního a přídavného materiálu je využíváno tepla, které vzniká průchodem elektrického proudu roztavenou struskou. Ve většině případů probíhá svařování ve vertikální poloze, svar musí být proveden na jeden průchod. Formování svaru zajišťují měděné příložky, chlazené vodou [Kovařík, 2008].

Princip a technologické parametry

Svařované části se k sobě přiblíží na vzdálenost 25 – 35 mm a v této pozici se zajistí proti pohybu. Není třeba provádět úpravu svarových úkosů, což přispívá k produktivitě technologie a úspoře času i nákladů. Na začátku procesu jsou svařovací hubice i s přídatným materiálem (ve formě drátu, průměr 2 – 6 mm, pásy nebo desky) spuštěny na dno svarové mezery. Následně je svarová mezera zasypána tavidlem v krystalické podobě. Zapnutím svařovacího proudu 200 – 2000 A vzniká oblouk mezi základním materiálem, měděnými příložkami a přídatným materiálem. Působením tepla je nataven základní materiál, přídatný materiál a tavidlo, které se přetváří na strusku. Oblouk je nestabilní, a proto je svar v počáteční fázi nekvalitní a plný pórů a nečistot. Za tímto účelem je pod svarovou mezerou vytvořeno korýtko, ve kterém probíhá tato počáteční fáze procesu. Po dokončení svaru je korýtko i s nekvalitním svarem odstraněno. Průchodem elektrického proudu roztavenou struskou o malé elektrické vodivosti, dochází vlivem ohmického odporu k jejímu přehřátí na teplotu 1800 až 2000 °C. V tento moment nastává druhá fáze procesu, elektrický oblouk zhasne a teplo se vytváří průchodem proudu struskou. Ta je lehčí než svarový kov a drží se na povrchu svarové lázně, tím plní svou ochrannou funkci. [Kuncipál, 1988].

Při větších tloušťkách materiálů mohou konat hubice s přídatným materiálem kývavý pohyb, pro dosažení rovnoměrnosti procesu. Tento pohyb společně s udržováním hladiny roztavené strusky, posunem chladících příložek apod. je prováděn automaticky. Vzhledem k mohutné svarové lázni a pomalé kontinuální krystalizaci, vzniká široká tepelně ovlivněná oblast. Pro zjemnění struktury a zmírnění napětí je u větších svarů nutné provádět normalizační žíhání, popouštění, případně zušlechťování [Kovařík, 2008].

3.1.5 Svařování v ochranných atmosférách

Podle stupně mechanizace rozdělujeme technologie na mechanizované, poloautomatické, automatické a robotizované. Ochrannou funkci svarové lázně zde plní ochranný plyn. Plyny můžeme rozdělit do dvou kategorií. První jsou plyny **inertní**, např. Ar, nebo He. Směsi těchto plynů pouze ochraňují, ale nijak nevstupují do probíhajících procesů. Díky vyšší ceně se užívají spíše ke svařování ušlechtilých materiálů. Druhou kategorií jsou plyny **aktivní**, nejčastěji CO₂ a směsi plynů, pro běžné konstrukční spoje uhlíkových ocelí. Svarový spoj rovněž vzniká, pomocí elektrod. Ty mohou být odtavující se (elektroda ubývá a přechází do svarové lázně jako přídatný materiál) a neodtavující se (pouze ohřívá místo svaru, nepřechází do svarové lázně) [Kovařík, 2008].

Obloukové svařování tavící se elektrodou – MIG, MAG

Elektroda v podobě drátu (průměr 0,6 až 2,6 mm) je přiváděna do místa svaru a vytváří oblouk se základním materiálem. Zároveň je do okolí svarové lázně přiváděn ochranný plyn. Drát je dodáván navinutý na cívce [Kuncipál, 1986].

Přívod drátu do svaru lze řešit více způsoby:

tlačný systém – odvíjení z cívky zajišťují kladky, kterými je drát vtlačován do bowdenu a přiváděn do svařovací hubice. Vzhledem ke tření drátu v bowdenu se doporučuje jeho délka maximálně 5 m.

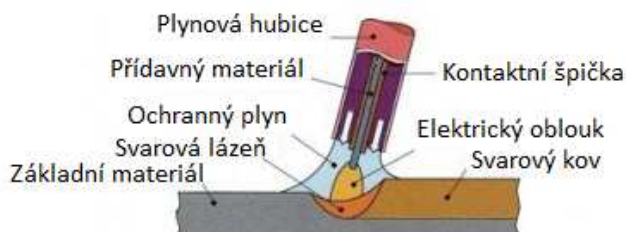
tlačný systém s přenosným podavačem – součástí přenosného podavače je zároveň zásobník drátu, proto je tato varianta velice mobilní. Se zdrojem je propojen pouze přívodem elektrické energie. Tohoto systému je využíváno zejména ve spojení s robotem.

tažný systém – podávací kladky jsou umístěny přímo ve svařovací hubici, může zde být i zásobník drátu. Toto řešení se uplatňuje spíše u svařování plechů malých tloušťek, např. hliníku, kde je použit tenký a lehký drát, aby nebyla hubice příliš těžká.

tlačně – tažný systém – velmi operativní, délka přívodního bowdenu může být až 20 m, při zachování vysoké spolehlivosti [Kovařík, 2008].

Ochranný plyn je přiváděn z tlakové láhve průtokoměrem a elektromagnetickým ventilem až do svarové hubice. V tomto principu jsou metody MIG i MAG stejné (obr. 8), liší se použitým plynem. Plyn je dodáván v běžných kombinacích již hotový, nebo je možné jej připravit ve směšovací zařízení (je-li součástí), přímo na svařovacím zařízení. Pro obě metody jsou použity proudové hustoty 100 – 400 Amm⁻², které zajišťují vysoké rychlosti odtavování materiálu, navařovací rychlosti, tedy velký výkon navaření (obr. 9). Ve svarové lázni se teplota pohybuje kolem 10 000 až 12 000 °C. Pro tyto technologie se užívají zdroje s plochou charakteristikou, vhodné jsou např. invertory.

Obr. 8 Schéma metody MIG, MAG



Obr. 9 Detail svaru MIG, MAG



Zdroj: <http://www.schinkmann.cz/mig-mag-co2>

<http://www.bvgroup.cz/svarovani-mig-mag.php>

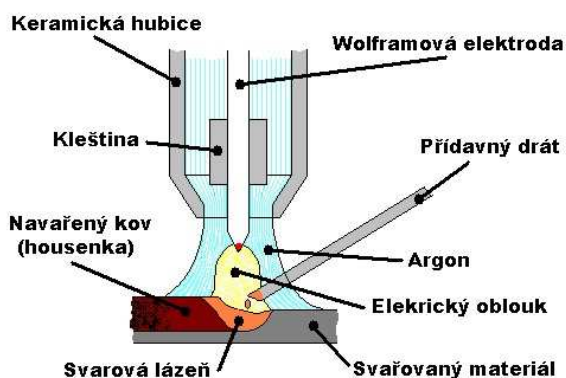
Svařování trubičkovými elektrodami

Podle typu trubičky se provádí v ochranné atmosféře, nebo bez ní. Označuje se jako metoda MOG. Trubičková elektroda se skládá z pláště z ocelového pásku, sbaleného do trubičky. Uvnitř se nachází struskotvorná, legující, čistící a dezoxidační náplň. Užívá se ke svařování a navařování speciálních návarů, např. silnostěnné konstrukce a rozměrné svary ve výrobě nákladních vozidel, těžké techniky apod. [Kuncipál, 1986].

Obloukové svařování netavící se elektrodou – WIG, TIG

Svar je tvořen v ochranné atmosféře směsí inertních plynů (např. argon, helium) a je určen ke svařování nejnáročnějších konstrukcí, v letectví, jaderné energetice, kosmonautice apod. Oblouk hoří mezi základním materiálem a netavící se elektrodou, nejčastěji z wolframu. Příkladný materiál může být dodáván ručně, nebo z cívky automaticky. Do oblouku je přidáván ze strany (obr. 10).

Obr. 10 Schéma metody WIG



Zdroj: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008011702>

Obr. 11 Svar hliníku



<http://www.svarovani-tig.cz/svarovani-hliniku.html>

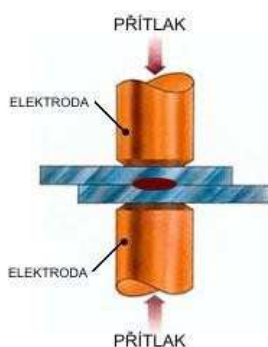
Mezi nejčastěji svařované materiály patří legované oceli, u nichž tato technologie zaručuje dokonale provařený kořen svaru, dále nezelezné kovy a jejich slitiny. Zejména problematické je svařování hliníku, titanu, nebo hořčíku. Na jejich povrchu se při tavení tvoří oxidy, které mají teplotu tavení podstatně vyšší, než samotné kovy a brání metalurgickému spojení. Využití čistícího účinku argonu metodou TIG (obr. 11), je účinný způsob, jak tyto kovy kvalitně svařovat. Při nepřímém zapojení, kdy je plusový pól na elektrodě, vylétají z elektrody kladné ionty a dopadají na povrch katody, tedy základního materiálu. Svou kinetickou energií rozrušují vrstvu oxidu hliníku, čistí svarový kov a díky tomu dochází ke spojení základního kovu a přídavného materiálu [Kovařík, 2008].

Odporové svařování

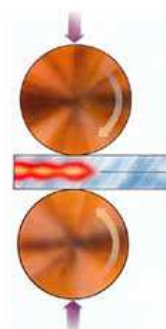
Odporové svařování je technologií využívající tlak a elektrický proud. U této metody nejsou používány přídavné materiály, spoj vzniká natavením a následným spojením kontaktních ploch základových kovů. Princip technologie spočívá v průchodu elektrického proudu o velké intenzitě (až 100 000 A, za nízkého napětí 5 – 15 V) elektrodami, mezi kterými jsou stlačeny svařované kovy, obvykle v podobě plechů. Přiváděný proud nataví svařované materiály v místě jejich styku, kde je největší odpor. Lze vytvářet svary bodové, nebo švové. Elektrody jsou obvykle válcového průřezu, s výměnnou čepičkou, které proti sobě stlačí přeplátované plechy a průchodem proudu dojde k bodovému svaru (obr. 12). Svar má podobu čočky mezi svařovanými díly.

Pro švové svařování (obr. 13) mají elektrody podobu kotoučů, mezi kterými jsou stlačeny přeplátované plechy, nebo jednoho kotouče oproti pevné podložce. Otáčení kotoučů při nepřerušném průtoku proudu vytváří souvislý svar. Tento postup lze použít při větších rychlostech svařování, kdy nedochází k přehřátí materiálu. Při malých rychlostech se užívá přerušovaného protékání proudu, kdy vznikají těsně vedle sebe svary bodové a tvoří rovněž souvislý spoj. Přerušením průtoku proudu lze velmi dobře regulovat rozteč mezi jednotlivými bodovými spoji [Kuncipál 1986].

Obr. 12 Odporové svařování bodové



Obr. 13 odporové svařování švové



Zdroj: <http://www.schinkmann.cz/odporove-svarovani>

Švové svařování umožňuje spojovat plechy až do tloušťky 3 mm a slouží např. k výrobě radiátorů, nádrží pro automobily a motocykly, barelů na benzín apod. Zařízení pro odporová svařování jsou vyráběna v mnoha variantách, od ručních bodovacích kleští, přes stojní bodovky až po velké bodovací projekční lisy. Menší mobilní zařízení využívají např. autoopravny pro karosářské práce, velké stacionární stroje jsou určeny pro průmysl. Výhodou je rychlost procesu a čistota práce, bez nutnosti přídavných materiálů. Dají se svařovat téměř všechny druhy ocelí i pozinkované, plechy z hliníku a jeho slitin, titan a pro jaderný průmysl i zirkon [Kovařík, 2008].

3.2 Svařování plamenem

K roztavení svařovaného materiálu je využívána tepelná energie plamene (nebo i více plamenů), který vzniká hořením směsi plynů. Směs se skládá z plynu hořlavého a plynu hoření podporujícího.

Plyny hořlavé – acetylen, vodík, propan, propan - butan, metan [Bernasová, 1988].

Plyny podporující hoření – kyslík, vzduch.

Sestava svařovací soupravy se skládá z lahví s plyny, upevňovacího zařízení pro lahve, přívodní hadice a svařovacího hořáku různých velikostí. Lahve na plyny jsou označeny barevně a také mají rozdílné připojení redukčních ventilů, aby se zabránilo záměně. Kyslík je značen modře, má závit pravý o průměru 21, 8 mm. Tlak v lahvi je 15 MPa. Acetylen je značen bíle, má upevňovací třmen, tlak v lahvi činí 1,5 MPa. Tlak v lahvích je příliš vysoký, aby mohl být přímo použit pro svařování. Snižuje se na pracovní, pomocí redukčních ventilů. Ty současně zajišťují stabilní a rovnoměrný tlak i v hadicích i při snižujícím se tlaku v lahvích. Z redukčních ventilů jde již zredukovaný pracovní tlak přívodními hadicemi k hořáku. Někdy se pro větší bezpečnost přidávají hadicové pojistky. Zabraňují zpětnému šlehnutí plamene do hadic, v horším případě až do lahví, což by způsobilo výbuch. Svařovací hořák je významnou součástí celé soupravy. Utváří se v něm dokonale hořící směs plynů a reguluje se jejich vzájemný poměr [Kovařík, 2008].

Používají se v zásadě dva druhy hořáků:

Injektorové (nízkotlaké) – ke směšování plynů dochází v malé komůrce za injektorem uvnitř nástavce. U tohoto typu se vyměňuje celý nástavec. Mají univerzální využití.

Bezinjektorové (vysokotlaké) – nemají injektor, ke směšování dochází přímo v nástavci. Vyměňuje se pouze špička a používají se jen pro soupravy s lahvemi [Kovařík, 2008].

Charakteristiky a využití svařovacího plamene

Rozeznávají se tři druhy plamene, podle poměru mísení plynů a podle účinku na tavnou lázeň. Podle poměru mísení je rozdělení následující:

Plamen neutrální – poměr mísení $O_2 : C_2H_2$ je 1 - 1,2 : 1. Plamen se vyznačuje ostře ohraničeným světelným kuželem. Nejméně chemicky ovlivňuje svarový kov. Užívá se k řezání a běžnému svařování ocelí, zinku, mědi, některých bronzů i olova.

Plamen nauhličující – poměr mísení $O_2 : C_2H_2 < 1$. Plamen má přebytek acetylenu a uhlovodíku. Tím dochází k určitému nauhličení svarové lázně. Výsledný svar je tvrdý

a křehký, někdy i pórovitý. Užívá se k navařování tvrdých vrstev, hlavně na bázi kobaltu, dále při svařování litiny, slitin hořčíku, hliníku, korozivzdorných ocelí, mosazi a bronzů.

Plamen oxidační – poměr mísení $O_2 : C_2H_2 > 1,2$. Plamen obsahuje přebytek kyslíku, díky tomu dochází k intenzivní oxidaci tavné lázně a vypalování legujících prvků. Následkem je snížená tažnost a vrubová houževnatost svarového kovu, mohou vznikat i póry. Plamen se používá ke svařování nerezů, nebo bronzů. Nevhodný je pro lehké kovy, kde dochází ke vzniku oxidů [Kuncipál, 1986].

Podle výstupní rychlosti směsi plynů z hořáku, rozdělujeme plamen takto:

Měkký – rychlost kolem $70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, malá stabilita plamene, malý dynamický účinek na svarovou lázeň. Pro vysokolegované oceli, kovy a slitiny s nízkým bodem tavení.

Střední – rychlost $100 - 120 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, nejčastěji užívaný plamen, vyhovující stabilita a dynamický účinek na svarovou lázeň. Pro všechny běžné druhy materiálů.

Ostrý – rychlost $120 - 150$ (i více) $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, plamen s vysokou rychlostí. Užívá se v aplikacích, kde je potřeba silný dynamický účinek na svarovou lázeň [Kuncipál, 1986].

Technologie svařování a přídavné materiály

Svar je možné vytvářet dvěma způsoby. Při prvním způsobu je přídavný materiál veden před hořákem ve směru svařování. U druhého způsobu postupuje přídavný materiál za hořákem, plamen je směřován na tavnou lázeň i na chladnou svar. Volba způsobu závisí na technologických podmínkách, např. poloze svaru a druhu materiálu. [Weman, 2003]

Přídavným materiálem je v zásadě holý drát, stejného, nebo podobného chemického složení, jako je základní materiál. Dráty jsou označovány písmenem G a číslem udávajícím minimální pevnost svarového kovu v tahu, bez tepelného zpracování. Lemové spoje, nebo tenké plechy lze svařovat bez přídavného materiálu, natavením lemu. Při svařování probíhá ohřívání, natavování a přidávání materiálu ve zřetelných časových intervalech, které musí svářeč částečně ovlivňovat. Svarový materiál se přidává do svarové lázně až v momentě, když jsou svarové plochy spolehlivě nataveny a vytvořena přiměřená lázeň. Svařovat lze téměř ve všech polohách, technologie je použitelná pro všechny svařitelné materiály do tloušťky přibližně 30 mm. I v dnešní době je stále užívaná např. pro opravárenské, karosářské a topenářské práce. Jednou z výhod je nezávislost na elektrické síti a možnost využití plamene i k dělení materiálu [Kovařík, 2008].

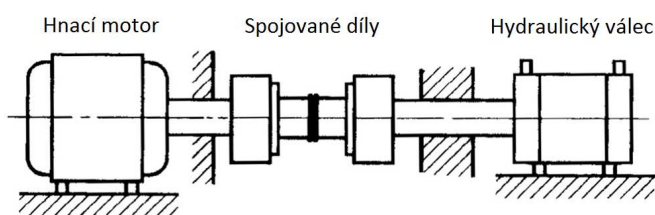
4. Tlakové svařování

Mezi technologie tlakového svařování patří svařování třením, ultrazvukem, difúzí, tlakem za studena a také svařování explozí. Všechny zmíněné technologie využívají ke spojení kovů, nebo jejich slitin vysokého tlaku. Spoj vzniká vlivem silového přiblížení kontaktních hraničních ploch svařovaných materiálů do takové vzdálenosti, že vejdou v činnost meziatomové vazebné síly. Ke spojení dochází v tuhém stavu, pod teplotou likvidu a ve svarovém spoji se nevyskytuje lící struktura. Podmínkou pro svařování tlakem je dostatečná plasticita materiálů a současný průběh difúzních pochodů. Výše zmíněné principy je nutné chápat obecněji, protože existují pro dané technologie určité rozdíly v mechanismu tvorby spoje. Tyto specifikace budou popsány vždy u příslušné technologie [Kuncipál, 1986].

4.1 Svařování třením

Technologie je založena na vzniku tepla při tření materiálů a působení tlaku. Jde tedy o přeměnu mechanické energie na tepelnou. Nejjednodušší je užití rotačního pohybu. Spojované části jsou upnuty a nastaveny v zařízení v osovém směru. Jeden díl se otáčí a druhý je k němu přitlačován (obr. 14). Vlivem tepla, vzniklého třením se styčné plochy ohřejí těsně pod teplotu tavení (pod hranici likvidu) a jsou značně plastické (obr. 15). Vlivem stálého přitlaku se část plastického materiálu vytlačí z místa spoje a vznikne výronek. V ten moment se otáčení skokově zastaví, přitlak obou dílů se zvýší, materiály se ještě více přitlačí a dojde ke svaření. Proces musí být prováděn ve speciálních výkonných zařízeních, které všechny úkony dělají automaticky [Kuncipál, 1984].

Obr. 14 Schéma rotačního svařování



Obr. 15 Ohřátí v místě tření



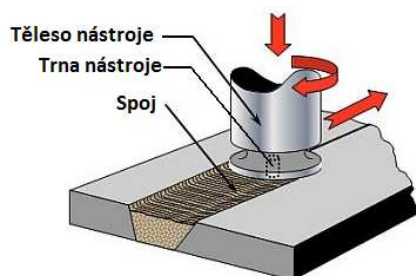
Zdroj: [Weman, 2003]

www.youtube.com

Svařování třením (FSW - Friction Stir Welding) lze aplikovat také na spojování plechů, zejména hliníkových (obr. 16). Nedochozí při tom k jejich tavení. Plechy jsou svařovány natupo, dotýkají se pouze hranami. Musí být dobře upevněny na pozici, aby se jejich čela nemohla oddálit v průběhu procesu. Na místo spoje je přitlačován rotující nástroj (profil

kolíku), který se pohybuje po linii spoje, třením vytváří teplo. Ohřátý změkklý materiál je přenášen na vlečný okraj nástroje a vlivem přítlaku tělesa nástroje a tvaru kolíku dojde k vykování materiálu (obr. 17). Spojování probíhá bez přídavného materiálu a ochranných plynů. Je možné úspěšně spojovat plechy tloušťek 1,6 až 30 mm s jistotou propojení v celé tloušťce. Svar vykazuje vysokou celistvost a malé deformace. Daří se spojovat i kovy obtížně svařitelné, jako je měď, olovo, hořčík i titan a jeho slitiny [Weman, 2003].

Obr. 16 Schéma svařování třením v ploše



Obr. 17 Vznik svaru třením



Zdroj: <http://www.khi.co.jp/english/rd/news/detail/ba020828.html>

4.2 Svařování ultrazvukem

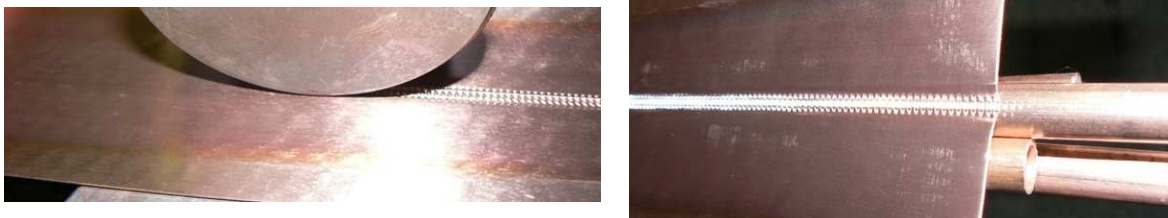
Tato technologie využívá ultrazvuku jako zdroje energie. Na vzniku spoje se podílí plastická deformace a difúze. Zařízení je složené z magnetostrikčního měniče a elektronického vysokofrekvenčního generátoru. Mechanická energie kmitání o vysokém kmitočtu je převáděna přes vlnovod a dolní svařovací špičku na svařované materiály. Rozhodujícími parametry jsou přítlačná síla, amplituda výchylky, frekvence a svařovací čas. Přenos ultrazvukových kmitů ze špičky zařízení do místa spoje zajišťuje přítlačná síla. Amplituda kmitání se zvětšuje vlnovody. Parametry kmitání a celého průběhu závisí na druhu svařovaného materiálu.

Na spojované díly působí současně tlak a mechanické kmitání, v rovnoběžném směru se spojovanými plochami. Spoj vzniká postupným propojením styčných ploch. Nejprve jsou rozrušeny existující oxidy v místě budoucího spoje, současně dochází k zarovnání nerovností povrchů. Kmitáním vzniká tření a styčné plochy se ohřívají na teplotu umožňující difúzi. Dochází k plasticko-deformačnímu přesunu a difúzi atomů svařovaných materiálů. Vše probíhá pod teplotou tavení, aby nedocházelo k ovlivnění struktury materiálu, rekystalizaci mřížky, výrazné deformaci a dalším nežádoucím jevům typickým pro tavná svařování. [Kuncipál, 1984].

Technologie je užívána v elektrotechnice, obalové technice, svařování hliníkových fólií, měděných plechů, aplikacích jaderného a chemického průmyslu apod. Lze tvořit svary bodové i švové. Bodový svar vzniká působením kmitů v jednom místě. Při výrobě švového

svaru je kmitavý bod nahrazen kmitavým kotoučem a ten se v průběhu kmitání pohybuje po linii svaru a vytváří souvislý spoj (obr. 18).

Obr. 18 Švový svar měděného plechu



Zdroj: <http://www.vermos.cz/?q=node/211>

Výše zmíněné postupy jsou plně automatizované a probíhají ve speciálních zařízeních. Existují i malá ruční zařízení, která umožňují spojovat kovy ultrazvukem v malých dílnách, nebo v terénu.

4.3 Svařování kovů tlakem za studena

Jedná se o svařování plastickou deformací bez ohřevu. Plastická deformace dosahuje 70 až 90 % a je spolu s dokonale očištěnými plochami nezbytnou podmínkou pro pevný spoj. Mohou vznikat svary bodové, švové, stykové, smykové a protlačováním. Parametry pro svařování za studena jsou: svařovací tlak (u hliníkových vodičů 1300 MPa, měděné vodiče 3800 MPa), stupeň přetvoření, napěťové poměry v místě styku, deformační rychlost a výše teploty případného ohřevu v místě styku. Mezi svařované materiály za studena patří zejména měď, hliník, stříbro, tantal, niob, nikl, austenitická ocel ve vzájemných kombinacích. [Kovařík, 2008].

Bodový svar – spojované plechy jsou přeplátované a spoj je tvořen kulatými, nebo podélnými průtláčnickými. Svařuje se deformací z jedné, nebo z obou stran. U materiálů značně rozdílných tloušťek se deformace provádí ze strany tenčího materiálu. Je možné běžně spojovat plechy do tloušťek 6 mm a to ručně, nebo strojně. Dají se přivařovat i dráty a pásy, nebo přivařit drát na plech, či trubku [Kuncipál, 1984].

Švové svary – vznikají postupným otáčením kotoučů s výstupky, které se vtlačují do spojovaných ploch, nebo bez výstupků, kdy se vtlačuje kotouč v celém průřezu.

Stykové svařování – Svařované díly se upnou do čelistí a jsou stlačovány proti sobě. Při této metodě je plastická deformace velmi výrazná a dosahuje např. u hliníku nejméně 225 % a u mědi 260 %. Upínací čelisti mají v místě styku dílů vybrání, ve kterém se hromadí napěchovaný přebytečný materiál (výronek).

Smykové svařování – téměř stejné jako výše zmíněné stykové, rozdíl spočívá v působení tlaku mezi díly, kdy je díky klínové vložce působení normálního tlaku ještě doprovázeno tangenciálním pohybem ve stykové ploše [Kovařík, 2008].

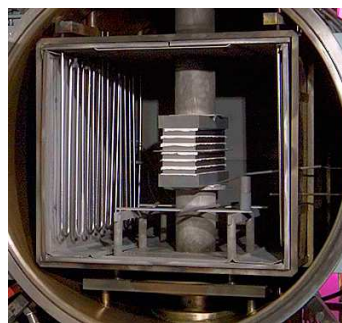
Svařování protlačováním – užívá se u bimetalických dílů a je kombinací objemového tváření a svařování v jedné operaci. Spoj vzniká ve speciálním lisovacím stroji.

4.4 Difúzní svařování

Svarový spoj vzniká na základě vazeb mezi atomy, založený na principu difúze, tedy na samovolném proniknutí atomů jednoho kovu, do mřížky druhého kovu. Ke spojení dochází za plastické deformace, při vhodné teplotě, za určitou dobu. Proces probíhá ve vakuu, nebo ochranné atmosféře argonu a CO_2 , nebo v kapalném prostředí. Zabrání se tím tvorbě oxidů v důsledku působení teploty během svařovacího procesu. V některých aplikacích se pro urychlení difúze používají vhodné mezivrstvy v podobě fólií. Hlavními parametry procesu jsou velikosti difúzních součinitelů, teplota svařování, svařovací čas, makro a mikrogeometrie spojovaných povrchů, přítlačné síly, druh a tloušťka mezivrstvy (pokud je použita), [Turňa, 1989].

Přítlačná síla a doba svařování závisí na druhu spojovaných materiálů. Tlak se pohybuje od 1 do několika desítek MPa, čas od několika minut až hodin. Např. uhlíková ocel se svařuje ve vakuu, teplota je v rozmezí 500 až 1000 °C, tlak 3,5 až 4,0 MPa a doba procesu 8 až 12 minut. Metoda je vhodná pro obtížně tavitelné materiály a ty, které tvoří intermetalické křehké fáze. Samotný proces probíhá ve speciálních zařízeních (obr. 19), které se skládají ze svářecí komory, zdroje ohřevu (odporový a indukční ohřev), hydraulického systému pro vytváření tlaku, vakuového systému, případně zařízení pro ochrannou atmosféru a kapalně prostředí, chladicího systému a dalších měřicích a regulačních součástí. Difúzním svařováním lze vzájemně spojit kovy, ale i kovy a nekovy. Jsou známy kombinace např. keramika a ocel, titan a grafit [Turňa, 1989].

Obr. 19 Zařízení pro difúzní svařování



Zdroj: <http://www.refrac.com/services/diffusionBonding.html>

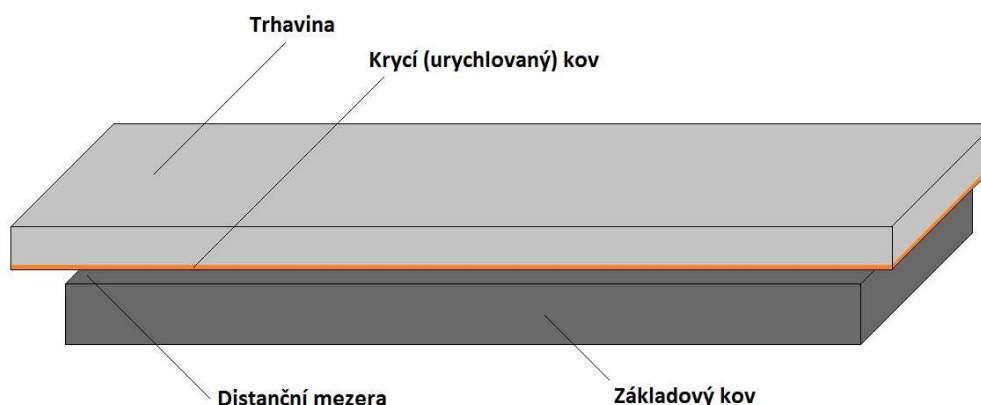
4.5 Svařování explozí

Technologie využívá ke svařování kovů energii uvolněné při výbuchu trhaviny. Nejedná se však o využití energie uvolněného tepla, ale pouze energii expanze zplodin. Výbuchofým svařováním se vytváří svary především plošného charakteru, jde tedy ve většině případů o plátování kovů [Katora, 2010]. Průmyslové velmoci jakými jsou Spojené státy, Čína, nebo Rusko, mají tuto metodu dobře osvojenou a jsou schopny plátovat formáty velkých rozměrů. Dají se rovněž plátovat oblé plochy, či trubky.

4.5.1 Podstata svařování explozí

Rozdělujeme vždy kov základový a kov (nebo více kovů) urychlovaný. Základový kov bývá zpravidla tlustší a slouží spíše jako pevný nosný podklad kovu krycího a vytváří svou povahou hmotu vzniklé materiálové kombinace. Výbušnina je rozprostřena vždy na kovu krycím, který spočívá v přesně definované vzdálenosti nad kovem základovým (obr. 20).

Obr. 20 Schéma rovinného plátování



Energie uvolněné při výbuchu trhaviny není mnoho, její působení trvá jen krátkou dobu, ale dosahuje obrovského výkonu. Při detonaci se zplodiny rozpínají vysokou rychlostí do všech směrů. Protože se plátování provádí v běžné atmosféře, expandující zplodiny se o vzduch opírají a tím je část uvolněné energie soustředěna i na plát urychlovaného kovu. Ten je značnou silou přiražen na základový kov, tlak v místě srážu překračuje o několik řádů mez kluzu obou materiálů a dochází k intenzivní plastické deformaci styčných ploch. Kovy se chovají podobně jako kapaliny, přestože zůstávají v tuhém stavu. Výsledkem je zcela homogenní plošný spoj na úrovni kovové vazby [Weman, 2003].

Lze plátovat i více kovů současně, trhavina je opět rozprostřena pouze na horním plátu. Při detonaci dojde ke spojení všech vrstev najednou. Samotný proces svaření trvá v řádu mikrosekund, ale jeho příprava a realizace vyžadují hluboké znalosti problematiky a specifické technické zázemí [Chládek, 1979].

4.5.2 Dynamické účinky procesu

Plátovaný kov je při detonaci vystaven krátkodobému působení vysokých tlaků a dynamickým účinkům, které často převyšují až pětsetkrát statickou mez kluzu. Kovem se šíří velmi silná detonační vlna, která je charakterizována strmým čelem, její působení dosáhne maximální hodnoty téměř skokově. Podobný účinek má i náraz rychle letící desky na základový kov. Příliš silná rázová vlna se v kovu šíří rychlostí převyšující rychlost zvuku v kovu, což vyvolává změnu mechanických a fyzikálních vlastností a může vést i k porušení celistvosti [Itoh, 2007].

Šíření rázových vln

Zákonitosti odrazu a šíření vln napětí mají zásadní vliv na průběh celého procesu. Zejména interference vln, tedy jejich vzájemné střetávání, ovlivňuje významně kvalitu spoje. Při odrazu rázové vlny od volného povrchu, se zpět šíří vlna tahová interferující s přetlakovou fází doznívající původní rázové vlny. Pokud by kovem procházely příliš silné tahové a tlakové vlny, mohou vzniknout výtrže a trhliny. Intenzita účinku rázových vln závisí na rychlosti rázu, při porušení meze pevnosti se jedná o kritickou rychlost rázu a je udávána v $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$. Např. pro měkkou ocel válcovanou za studena byla naměřena hodnota $29 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, pro Hadfieldovu ocel $230 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Tlaková napětí, která v kovu vyvolává procházející rázová vlna, mohou naopak zmírnit případný stav napjatosti v kovu, u oceli může dojít i ke zjemnění zrna [Chládek, 1979].

4.5.3 Kovy vhodné pro svařování explozí

Explozí urychlený kov prodělá v průběhu procesu svaření značné plastické deformace, které následují v rychlém sledu hned po sobě. Z tohoto faktu vychází první podmínka a tou je dostatečná houževnatost a alespoň minimální tažnost kovu. Dále musí být spojované kovy schopny navzájem tvořit sloučeniny, nebo slitiny, nemusí být však v sobě rozpustné.

Výbuchem se dají spojovat všechny běžně užívané kovy, zejména pak ty, které jsou jinými technologiemi obtížně svařitelné. Vznikají tak bimetaly výjimečných kombinací a vlastností. Příkladem může být olovo, které nevytváří tuhý roztok s železem, či měď, výbuchově však lze tyto kovy úspěšně spojit. U materiálů, které spolu tvoří intermetalické sloučeniny, jakými jsou hliník a železo, titan a železo, měď a titan, železo a molybden apod. je tato metoda jednou z mála možností kvalitního svaření. [Chládek, 1973].

4.5.4 Výbušniny

Látky, nebo směsi látek, schopné výbuchových přeměn, se nazývají výbušniny. Přeměny jsou charakteristické vysokou rychlostí chemické reakce, samovolným šířením, uvolňováním tepla a tvorbou výbuchových zplodin. Velké množství plynů a uvolněné teplo vytvářejí v místě výbuchového rozkladu značný tlak. Množství uvolněné energie je dáno rozdílem vnitřní energie zplodin a výchozí vybuchující soustavy. Rozpínáním plynů do okolí výbušniny se přeměňuje tepelná energie na mechanickou. Množství uvolněného tepla, které činí přibližně 4000 kJ kg^{-1} a množství uvolněné energie nejsou svými hodnotami tak významné, jako vysoký výkon, který dosahuje 10^7 až 10^8 kW kg^{-1} . Podle rozložení tlaku a rychlosti přeměny se rozlišují tři druhy výbuchu:

- **výbuchové hoření**
- **vlastní výbuch** (výbuch 2. řádu)
- **detonace** (výbuch 1. řádu)

Při **výbuchovém hoření** je průběh přeměny pomalý, proto stačí vznikající zplodiny odtékat z reakční zóny. Tlak se v místě rozkladu zatím nezvyšuje. Právě na tlaku okolního prostředí a druhu výbušniny je rychlost hoření závislá. Unikající zplodiny začínají zvyšovat tlak v okolním prostředí a tím se zvyšuje rychlost hoření, však ani při tlaku kolem 10^2 MPa nepřekračuje 1 m.s^{-1} . V tuto chvíli začíná druhá fáze procesu, **vlastní výbuch**. Vznikající zplodiny nestačí již z reakční zóny odtékat a tlak v okolí se tím dál zvyšuje. Rychlost reakce je již mnohem vyšší než v první fázi a dosahuje až 10^3 m.s^{-1} . Z dosavadního průběhu je patrné, že s nárůstem tlaku násobně roste i rychlost reakce a naopak [Chládek, 1979].

Třetí fází je **detonace**, při které dosáhne rychlost reakce maximální, přitom konstantní hodnoty v daných podmínkách a převyšuje rychlost zvuku v dané látce. Předchozí fáze probíhají v důsledku tepelné vodivosti, difúze a záření. Detonace se značně liší, protože se šíří stlačením látky rázovou vlnou, její rychlost není již tolik závislá na teplotě a tlaku okolí a dosahuje 1×10^3 až $9 \times 10^3 \text{ m.s}^{-1}$. Tlak v reakční zóně je o několik řádů vyšší, než tlak v nezreagované výbušnině.

Rozdělení výbušnin

Výbušniny se vyrábějí v kondenzované podobě tuhé, nebo kapalné a plynné. Pro účely výbuchového svařování jsou významné kondenzované, které se dále dělí na:

- střeliviny
- trhaviny
- třaskaviny

Střeliviny jsou nejvíce používány při výrobě nábojů, udělují počáteční rychlost střelám, pro účely tváření kovů se užívají omezeně, a to k tváření plechů, objemovému tváření, výjimečně k lisování prášků.

Trhaviny mají naopak pro účely výbuchového svařování největší význam, protože jejich hlavním typem přeměny je detonace. Patří obvykle do skupiny nepřímých výbušnin, které potřebují k iniciaci silný podnět, nejčastěji rozbuškou. Díky tomu jsou bezpečné při manipulaci. Mezi chemické sloučeniny s vlastnostmi trhavin patří dusičné estery (nitráty) polyalkoholů, nitraminy a nitrosloučeniny. V průmyslových aplikacích se používají převážně směsné trhaviny v podobě plastické, poloplastické a sypké. Obsahují dvě hlavní složky – oxidační látky a paliva.

Oxidačními látkami jsou nejčastěji anorganické dusičnany. Poskytují kyslík pro dostatečnou oxidaci paliv a tvoří 50 – 95 % hmotnosti trhaviny. Jako paliva se užívají organické látky, např. minerální oleje, nafta a další ropné produkty, dřevná moučka, dřevné uhlí i kovové prášky. Kromě těchto dvou látek se přidávají zcitlivující příměsi (nitroglykol, nitroglycerin, trinitrotoluen) a další látky upravující vlastnosti pro konkrétní aplikace. Pro dosažení vysoké rychlosti výbuchové přeměny, se látky důkladně melou a homogenizují [Chládek, 1979].

Třaskaviny jsou na rozdíl od trhavin a střelivin charakteristické značnou citlivostí na vnější podněty (náráz, tření, teplo) a snadno vybuchují. Jsou proto označovány výbušninami primárními. Velmi rychle přechází od výbuchového hoření, přes vlastní výbuch k detonaci. Užívají se jako iniciátory výbušnin sekundárních. Zahrnují početnou skupinu látek, např. třaskavou rtuť, azid olovnatý, trinitrorezorcinát olovnatý a tetrazen. Vzhledem k citlivosti se smějí třaskaviny přepravovat pouze v hotových výrobcích, nejčastěji rozbuškách.

Trhaviny pro svařování explozí

Pro zpracování kovů explozí se používají trhaviny označované v průmyslových aplikacích „na speciální použití“. Jsou charakteristické vlastnostmi potřebnými ke spojování kovů. Detonační rychlost nesmí překročit rychlost zvuku ve spojovaných kovech. Tato podmínka souvisí se šířením rázových vln. Pokud by detonační rychlost překročila rychlost zvuku jednoho z kovů, šířily by se materiálem příliš silné a rychlé rázové vlny. Vlivem těchto vln by došlo ihned po srážu desek k jejich opětovnému rozpojení. Pokud probíhá detonace podzvukovou rychlostí, šíří se rázové vlny před místem spojení, projdou materiálem a proces svaření nenaruší [Turňa, 1989].

Pro dosažení kvalitního spoje musí být však detonační rychlost ještě mnohem menší, pohybuje se v závislosti na spojovaných kovech mezi 2000 – 3500 m.s⁻¹. Trhavina musí mít stabilní průběh detonace v neutěsněných náložích a nízkou dolní mezní vrstvu, tj. aby byla schopna stabilní detonace i v tenké vrstvě. Tato vlastnost je nutná zejména při plátování tenkými plechy a foliemi. Pracovník přichází s trhavinou při nanášení do přímého kontaktu, z toho plyne požadavek na fyziologickou nezávadnost a bezpečnost. Mezi další důležité vlastnosti patří dobrá sypkost, nespékavost při skladování a stejné výbušinářské vlastnosti po celou dobu životnosti. [Turňa, 1989].

Za tímto účelem byla ve společnosti Explosia vyvinuta trhavina s názvem Semtex. Název vznikl spojením částí slov **Semtím**, místa kde společnost sídlí a názvem společnosti **Explosia**. Trhavina má podobu bílé sypké směsi, nebo plastické hmoty. Sypká směs má označení Semtex S 30, vyznačuje se malou detonační rychlostí (2200 m.s⁻¹), nízkou dolní mezní vrstvou, stabilním průběhem detonace, nespéká se a má dobrou sypkost. Je přímo určena k plátování kovů. Plastická trhavina s označením Semtex 1A má díky většímu podílu účinné složky pentrit vysokou detonační rychlost (7200 m.s⁻¹), jedná se proto o trhavinu brizantní. Při plátování se užívá ve formě pásku jako trhaviny iniciační, která spustí výbuchovou přeměnu v hlavní náloži [Explosia, 2003].

Střeliště pro svařování explozí

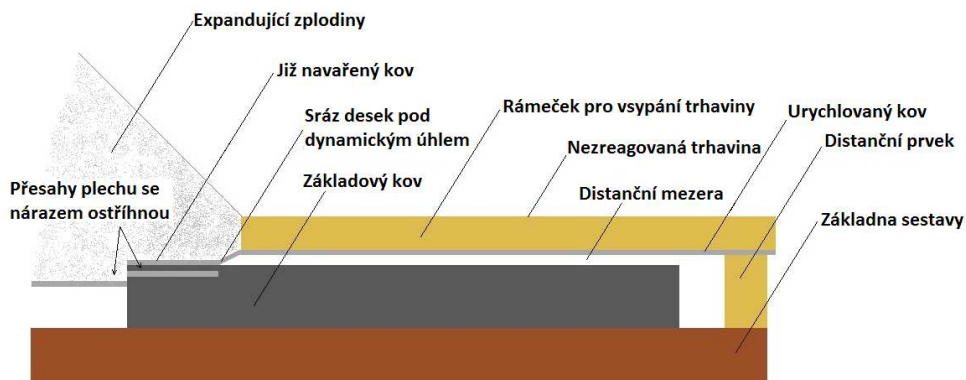
Detonace trhaviny a dopad plátujícího kovu způsobuje značný akustický účinek. To je jedna z mála nevýhod této metody, nicméně velmi podstatná. Celý proces může probíhat pouze na střelišti, které splňuje bezpečnostní a hygienické normy a směrnice. Při umístění střeliště je nutné vzít v úvahu rizikovost práce s výbušninami a vliv hluku na přilehlé okolí. Výstavba je velice nákladná, protože musí být umístěno v oploceném a hlídaném areálu. Ke střelišti obvykle náleží zázemí pro pracovníky a vybavení pro přípravu celého procesu. Aplikace s menšími náložemi lze odpálit na venkovních střelištích (prostor střeliště obehnan ocelovými stěnami). Takových pracovišť je v naší republice jen několik. Velké, až několika set kilové nálože je nutné odpalovat ve vojenských prostorech [Chládek, 1979].

4.5.5 Plátování rovinných ploch

Nejčastější aplikací výbuchového svařování je plátování rovinných ploch. Ke spojení dochází mezi kovem základovým a kovem urychlovaným, v celé jejich ploše. Spojované kovy se před samotným plátováním důkladně připraví a přesně vzájemně ustaví. Styčné plochy kovů musí být rovné, hladké a čisté. Základový kov bývá většinou tlustší, hruběji opracovaný a jeho povrch je nutné strojově zbrousit do roviny. Plátující kovy jsou obvykle

z ušlechtilých materiálů, opatřeny ochrannou folií a po jejím odstranění je povrch zcela vyhovující. Takto připravené kovy se uloží do sestavy (obr. 21).

Obr. 21 Schéma sestavy



Základový plát leží na podložce, např. z dřevotřískové desky. Nad ním spočívá v přesně určené vzdálenosti urychlovaný plát, na kterém je v rámečku nanесena trhavina. Distanční mezera mezi pláty je rovna přibližně dvojnásobku tloušťky krycího kovu a musí být v celé ploše stejnoměrná (paralelní uspořádání). U tlustších, dostatečně houževnatých plechů postačuje uložení v rozích na distanční prvky, aniž by došlo k jeho prohnutí. Je třeba vzít v úvahu nejen hmotnost krycího kovu, ale také trhaviny, která na něm bude rozprostřena. Její hmotnost může dosáhnout i několika desítek, nebo dokonce stovek kilogramů. U plechů velkých rozměrů a malých tlouštěk hrozí průhyb a zmenšení distanční mezery, proto je nutné podepření v celé ploše. Dají se použít distanční spirálky z tenkého plechu rozložené na základovém plátu a na ně se položí kov krycí, nebo dráty, zapuštěné přímo v krycím kovu [Itoh, 2007].

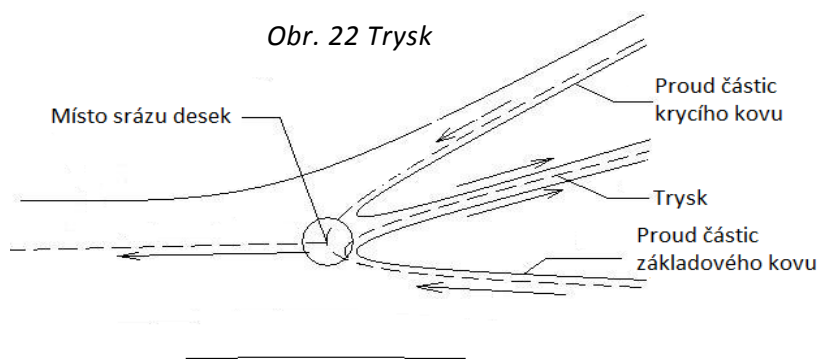
Rozměr krycího kovů je vždy po celém obvodu větší, než kov základový. Účinek trhaviny je na krajích slabší, protože zplodiny mohou expandovat nejen nahoru, ale také do strany. Krycí kov by měl proto přesahovat minimálně o tloušťku základního kovu a šířku rámečku. Zvětšením plochy trhaviny je zaručen kvalitní spoj i na krajích. Rámeček připevněný po celém obvodu krycího kovu vytváří prostor nálože. Výška rámečku závisí na požadovaném množství trhaviny. Před jejím nanesením se na kratší vnitřní stranu rámečku připevní pásek z brizantní trhaviny, nebo bleskovice. Poslouží jako trhavina počínová. Následně je celý rámeček naplněn hlavní náloží. Po pečlivém vyplnění prostoru rámečku je směs uhlazena rovným pravítkem. Sestava je nyní připravena a může být přesunuta na odpaliště. Jestliže je základový kov dostatečně tlustý (přibližně desetinásobek tloušťky kovu krycího), může být sestava odpálena přímo na zemi, myšleno na nezpevněném podkladu. Pokud je však základový kov slabší, došlo by nárazem k jeho prohnutí a deformaci. Celá sestava se v tomto případě umístí na opěrnou kovadlinu (tlustá ocelová

deska zapuštěná v zemi), která vytváří základovému kovu oporu. Zbývá poslední krok, připojení rozbušky. Skládá se z přívodů elektrické energie, pilule s pyrotechnickou složkou a odporovým můstkem, primární a sekundární třaskavinové náplně a trhavinové náplně. Vše je uloženo v kovové dutince. Přívodní kabely rozbušky se napojí na přívod elektrického proudu vzdáleného odpalovacího zařízení. Z bezpečného místa je sestava odpálena [Nesvadba, 2006].

Sráz desek a vznik spoje

Výbuch rozbušky je přenesen na pásek brizantní trhaviny, která velmi rychle spustí výbuchovou přeměnu v hlavní náloži. Detonace hlavní nálože postupuje rovnoměrně v celé šíři od jednoho kraje ke druhému. Stejným směrem urychlují expandující zplodiny plátující desku na desku základovou. Distanční mezera představuje dráhu, na které bude krycí kov urychlen na potřebnou rychlost. Velikost distanční mezery má na vznik spoje zásadní vliv. Mezi deskami, je vzduch, který musí být během krátké chvíle dokonale vytlačen. Neměla by proto být větší, než je pro tuto podmínku nezbytně nutné. Volí se zpravidla dvojnásobek tloušťky krycího kovu. Pokud bude distance příliš velká, dojde vlivem tření k intenzivnímu ohřátí kovů o vytlačovaný vzduch, nebo dokonce k natavení styčných ploch kovů. Za těchto podmínek je spojení vyloučené. Jakékoliv ohřátí kovů je pro tuto metodu nežádoucí, proces probíhá téměř za teploty okolí. Pokud bude distance příliš malá, kov nedosáhne potřebné rychlosti, narazí na základní desku, zdeformuje se o ni, ale spoj nevznikne [Nesvadba, 2006].

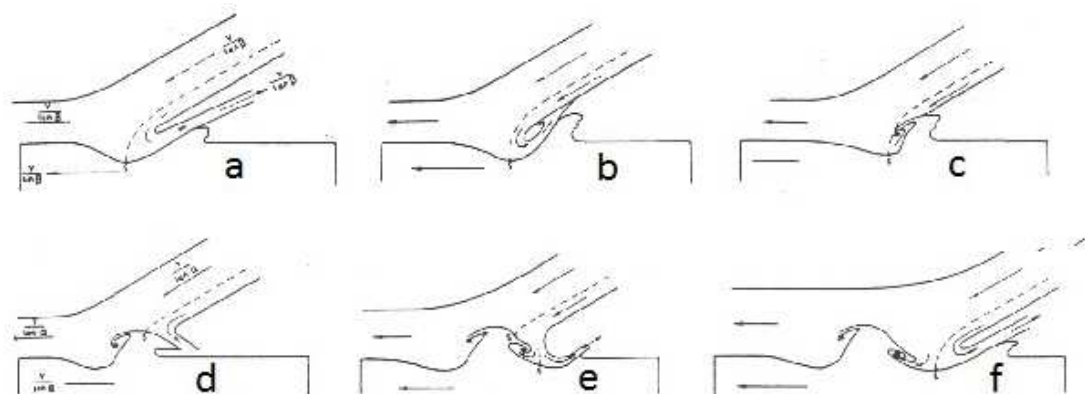
Skokový nárůst tlaku, působící v místě srážu, se pohybuje v řádu GPa. V ten moment je kov namáhán nejvíce, prodělává mohutné plastické deformace a procházejí jím silné rázové vlny. Za těchto podmínek je chování kovů řešeno na principech ideálních kapalin. Uplatňují se zde mechanismy hydrodynamického toku. V místě srážu styčných ploch kovů vzniká proud odnášející oxidy a drobné nečistoty z jejich povrchů a díky tomu na sebe dopadají kovově čisté povrchy. Proud povrchových částic kovů se nazývá trysk, jeho schéma je naznačeno na obr. 22. Vyskytuje se těsně před místem srážu, kam přitékají částice obou kovů, naráží do sebe a spojují se v jeden proud [Carton, 2004].



Rychlost proudění trysku je rovna přibližně 1,5 násobku detonační rychlosti. Směr jeho proudění není po celou dobu procesu symetricky směřován mezi kolidujícími deskami, ale osciluje kolem své osy. Oscilace trysku způsobuje vlnité rozhraní, charakteristické pro svařování explozí. Trysk se skládá z materiálů obou plátovaných kovů, což dokazuje samočisticí účinek. Podmínky pro vznik trysku jsou dostatečná rychlost letící desky a správný úhel dopadu. Tvar a mechanismus tvorby vln závisí také na druhu spojovaných materiálů. Výrazně měkčí a tvárnější krycí kov, musí přimět svým dopadem k plastické deformaci i kov základový. Pro některé kombinace je proto oblast parametrů svařitelnosti velmi úzká (např. ocel a olovo) [Carton, 2004].

První vysvětlení tvorby vln přináší Von Karmanův vírově – kluzný mechanismus. Proud trysku letící desky vytváří v základové desce vlnu, podobnou hrbu. Vyrůstající vlna přesouvá trysk nazpět do letící desky, kde vytváří jakýsi „chvost“. Vracející se proud materiálu je před vrcholem vlny zcela zablokován a stlačen letící deskou. Doznívající trysk vytvoří za chvostem víření a pak je vlnou zcela uzavřen. Kolizní bod se skokem přesune na vrchol vlny, nyní se trysk smýká po vlně dolů a tvoří víření i na této straně. Pokračuje do základové desky, tvoří nový náběžný bod, který směřuje proud částic mezi pláty, do distanční mezery (obr. 23) [Carton, 2004].

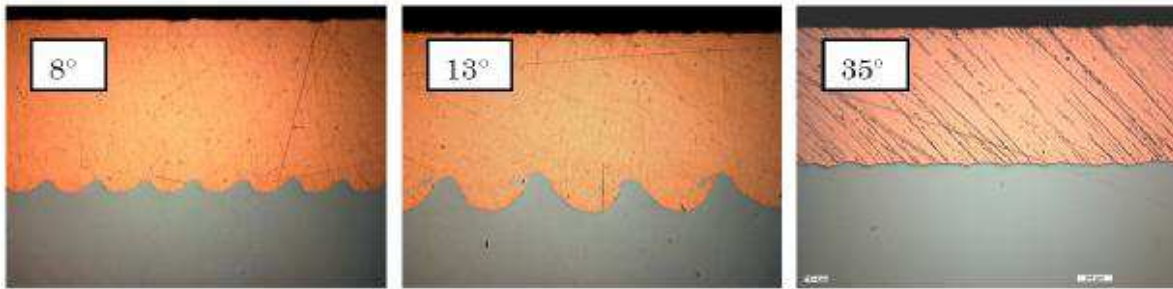
Obr. 23 Vznik vlnitého rozhraní



Zdroj: [Carton, 2004]

Při spojování kovů vyšší pevnosti, např. korozivzdorné oceli s mědí, je struktura vlnitého rozhraní závislá na úhlu srázu. Při úhlu 8° jsou vlny jemnější, trysk je vytlačován méně intenzivně a vytváří proto drobné chvosty. Urychlovaná deska dopadající pod úhlem 13° vyvolá větší deformaci a mohutnější trysk, vln je proto méně a jsou větší. Naopak při srážu pod velkým úhlem, kolem 35° , vlny mizí a mezi kovy je rozhraní přímé. Jev lze vysvětlit tak, že díky velkému úhlu mezi dopadajícími deskami, může trysk volně unikat pryč, aniž by desky zasáhl (obr. 24) [Carton, 2004].

Obr. 24 Vliv úhlu dopadu na tvorbu vln

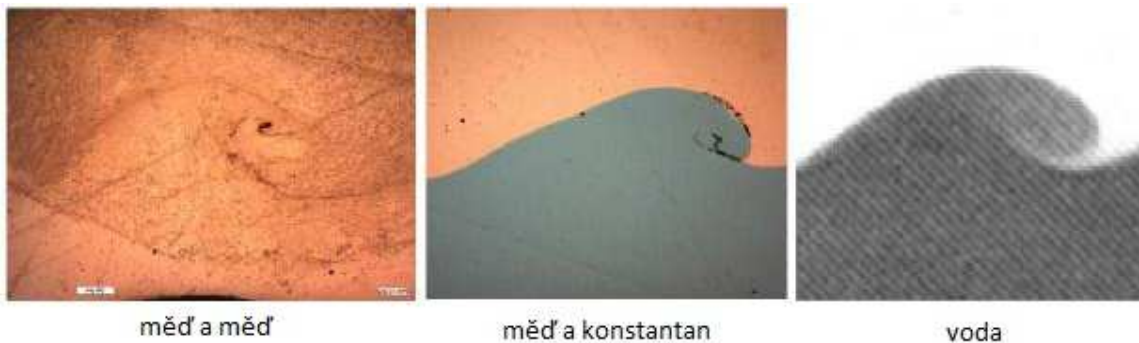


Zdroj: [Carton, 2004]

Trochu jiné vysvětlení tvorby vln uvádí Blazinsky. Podle něj vzniká vlnité rozhraní působením odražejících se tlakových vln od volného povrchu a nastává vzájemné působení mezi vlnou zředění a tlakovou vlnou. Výsledkem je pravidelná deformace volných povrchů urychlené a základní desky před bodem srážu. Po svaření se projeví jako vlnité rozhraní [Carton, 2004].

Dalším mechanismem tvorby vln, je Kelvin – Helmholtzova instabilita. Uplatňuje se při spojování kovů nízké pevnosti, nebo při úhlu dopadu větším než 30°. Jev je podobný vírům, vznikajících diskontinuitou kapalného toku a smýkání mezi nimi (obr. 25). Vlny a víry vznikají mezi dvěma kapalinami, kdy jedna z nich má odlišnou horizontální rychlost. Vlnité rozhraní je odlišné, vlny jsou tvořeny pouze jedním směrem rotace [Turňa, 1989].

Obr. 25 Kelvin – Helmholtzova instabilita



Zdroj: [Carton, 2004]

Von Karmanův vírově – kluzný mechanismus nastává při úhlech srážu do 20°. Jelikož je užíváno převážně paralelní ustavení desek, jedná se o hlavní mechanismus tvorby vlnitého rozhraní při plátování kovů explozí. Vlnité rozhraní mizí při úhlu srážu větším než 20°. Spojování kovů s nízkou pevností pod úhlem kolem 35°, aktivuje mechanismus Kelvin – Helmholtzovy instability, díky velkému rozdílu horizontální rychlosti krycí a základové desky [Carton, 2004].

Po dopadu plátu, se jeho přesahy po celém obvodu kinetickou energií ostříhnu o hranu základní desky. Proces svaření je ukončen, celý trvá jen několik mikrosekund. Pomocné

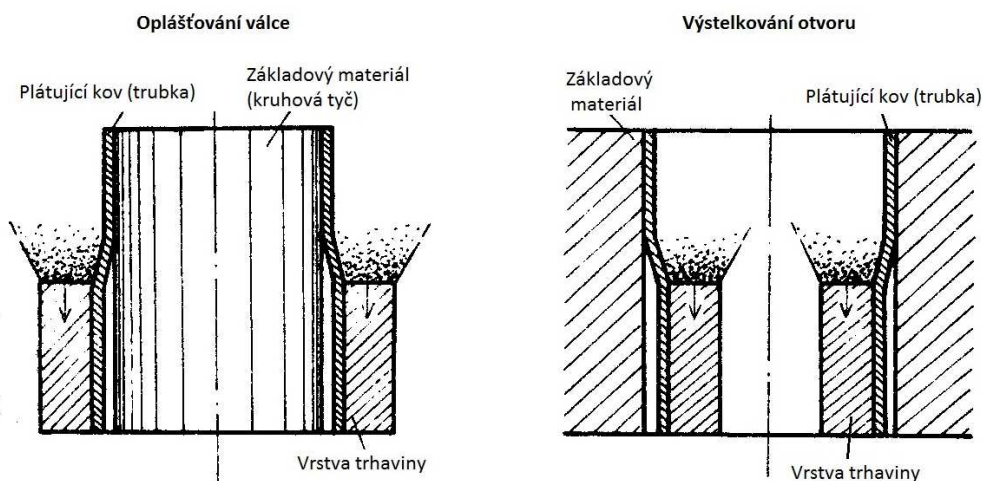
prvky sestavy (podložka, distanční špalíky, rámeček) jsou detonací rozmetány po okolí na drobné kousky. Hotový bimetál bývá mírně prohnutý a znečištěný, na krajích zaoblený a deformovaný ostřihnutím přesahu vrchního plátu. Při následném zpracování je proto zdeformovaný okraj bimetálu odstraněn a využívá se pouze nezdeformovaná část, vykazující homogenní svar s vlnitým rozhraním v celé ploše [Nesvadba, 2006].

4.5.6 Výbuchové svařování nerovinných ploch

Technologií svařování explozí mohou být spojovány i nerovinné oblé plochy jednoduchých definovaných tvarů. Svařovací proces sousého uspořádání lze dobře uplatnit při výstelkování, nebo opláštění trubek (obr. 26), případně kruhové tyče. Rozdíl oproti rovinnému plátování spočívá v deformaci, kterou prodělá urychlovaný kov. Kromě ohybu je navíc roztahován, nebo stlačován v celé ploše. Příprava sestavy je složitější, protože trhavina nespočívá v rámečku vodorovně na povrchu, ale je obsypána kolem trubky (opláštění), formou může být např. plastová roura. U výstelkování je trhavina nasypaná dovnitř trubky, která bude urychlena na vnitřní plochu kruhového prostoru a vytvoří výstelku. Trhavina nemusí vyplňovat celý prostor trubky, ale může být obsypána kolem formujícího prvku tak, aby spočívala v potřebné vrstvě rovnoměrně na vnitřním plášti. Velikost nevyplněného prostoru, udává vnitřní průměr nálože.

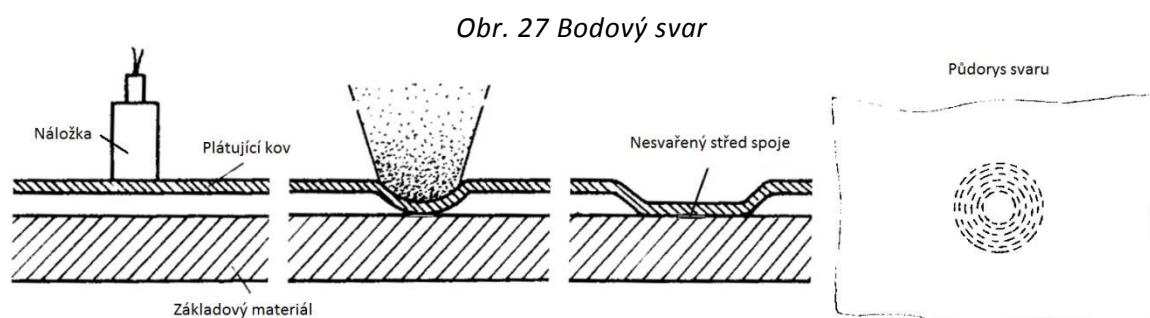
Při dimenzování trhaviny je třeba vzít v úvahu tloušťku a houževnatost navařovaného materiálu. Plátující trubka musí být expanzí zplodin velmi rychle rozepnuta na vnitřní plochu kulatého prostoru. Nejedná se tedy o urychlení volně ležícího materiálu, ale roztažení, jehož rychlost a velikost udává intenzitu srážu styčných ploch. To samé platí u opláštění, kde dochází k intenzivnímu stlačení materiálu. Pokud je plátovaná trubka tenká, je nutné použít kovadlinu. Při opláštění v podobě vloženého trnu, u výstelkování v podobě objímky. Iniclace trhaviny probíhá v rovině kolmé na osu válce [Chládek, 1979].

Obr. 26 Oplášťování a výstelkování

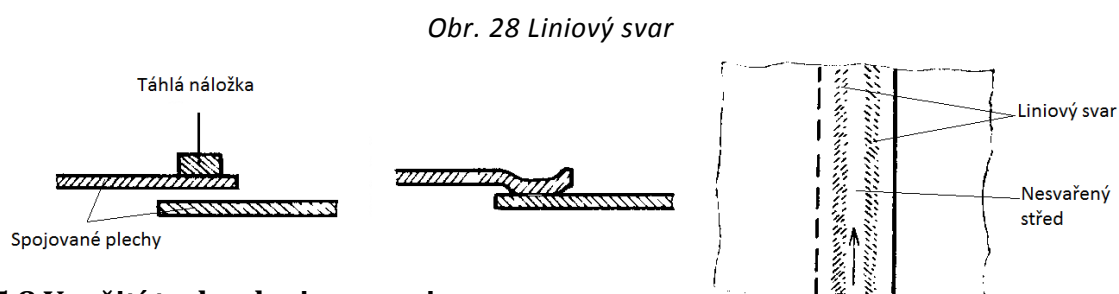


4.5.7 Bodové a liniové svařování explozí

Svar není tvořen v celé ploše kovových desek, ale pouze v izolovaných bodech, nebo liniích. Princip vzniku spoje je totožný jako u celoplošných svarů. Krycí plech je v určitých bodech urychlen detonací malých lokálních náložek. V místě srážu se uplatňuje stejný mechanismus, ovšem výsledný spoj vykazuje jistou odlišnost. Bodový spoj (obr. 27) není homogenní v celé své ploše v důsledku měnících se parametrů srážu, ale má tvar mezikruží. Detonace náložky probíhá od středu a vytváří v daném místě vypuklinu, jejíž vrchol dopadá na základovou desku pod nulovým úhlem. V tomto místě proto ke spojení nedochází. Postupující sráž desek od tohoto středu probíhá již pod úhlem dynamickým a vzniká plnohodnotný spoj. S klesajícím účinkem detonace postupně slábne intenzita srážu, až zcela zmizí. Pro bodové svařování se používají speciální náložky, které se mohou pro svou nízkou hmotnost iniciovat současně. Existují ruční zařízení, do nichž se dají vkládat jednotlivé náložky a energie detonace je přenesena na přivařovaný plech úderníkem se zakončením ve tvaru tupého kuželu. Lze tak vytvářet zcela bezpečně bodové spoje [Chládek, 1979].



Liniové svary (obr. 28) vznikají obdobným způsobem. Nálož má podobu pásku (charakter bleskovice) a při detonaci vytvoří v urychleném plechu deformaci v podobě žlábků. Ve středu žlábků opět ke spojení nedojde, svar vzniká po obou jeho stranách. Rychlost detonace není v tomto případě limitovaná a může být i nadzvuková [Chládek, 1979].



4.5.8 Využití technologie v praxi

Z technologií výbuchového zpracování kovů zaujímá svařování explozí přední místo nejen z hlediska celkové produkce, ale také pro široké možnosti uplatnění v mnoha odvětvích,

kde je využíváno výjimečných vlastností kovových kombinací. Metoda nachází uplatnění v hutnictví, strojírenství, chemickém průmyslu, klasické a jaderné energetice, elektrotechnice atd. Kombinací kovů značně odlišných vlastností, vzniká zcela nový homogenní materiál, který vykazuje ty lepší vlastnosti spojovaných kovů a eliminuje jejich nedostatky.

Rovinné plochy

Plátování rovinných ploch je nejčastější aplikací svařování explozí. Bimetalické plechy jsou využívány především v chemickém průmyslu. Na běžně dostupný materiál je navařen v tenké vrstvě ušlechtilý korozivzdorný kov a vzniká bimetal s vysokou korozní odolností a zároveň dobrou pevností. Ve všech ohledech přesahuje vlastnosti bimetalu vytvořeného tavnými metodami. Krycí vrstva je všude stejně tlustá, jednolitá a vykazuje výbornou soudržnost se základovým kovem. Základními kovy jsou nejčastěji uhlíkové, nebo nízkolegované oceli. Jako krycí vrstva bývají použity korozivzdorné oceli, hliník, měď a její slitiny, titan, zirkonium, tantal. Tloušťka vrstvy se obvykle pohybuje mezi 2 a 10 mm, v závislosti na požadavcích může být i pouhých 0,1 mm, nebo naopak 20 až 30 mm. Plochy velkých formátů slouží k výrobě reaktorových nádob, výměníků tepla, cisteren, destilačních kolon a dalších podobných zařízení [Chládek, 1973].

Dalším produktem jsou bimetalické trubkovnice výměníků tepla. Vzniká polotovar ve tvaru kruhovky, která vyžaduje jen malé opracování a nevzniká téměř žádný nevyužitelný bimetalický odpad. Hlavní důvod uplatnění výbuchově plátovaných bimetalů v chemickém průmyslu je, že tavné svařování naráží v tomto odvětví na značné překážky. Vynikající vlastnost vykazuje kombinace konstrukční uhlíkové oceli plátované ocelí nástrojovou. Používá se při výrobě řezných částí strojů, např. nůžek na papír a kůži. Svar má vysokou pevnost i po opakovaném tepelném zpracování [Chládek, 1973].

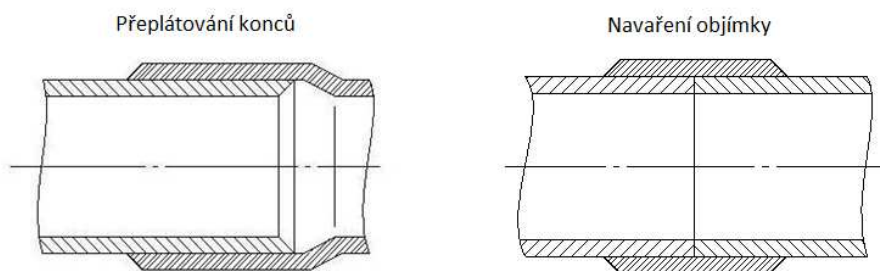
Obtížnou svařitelnost některých kovů běžnými postupy, řešilo jejich nýtování. Při stavbě lodí se často používá kombinace ocel - hliník. Pro dosažení dobré stability lodi, je těžiště umístěno co nejnižší. Proto se konstrukce palubních nadstaveb vyrábějí z hliníku, který je výrazně lehčí než ocel, ze které bývá vyroben trup lodi. Jediným možným spojem bylo nýtování, je však pracné a vykazuje nízkou korozní odolnost. Výbuchovým svařováním lze hliník s ocelí za použití vhodných mezivrstev bez problémů svařit a zhotovit tzv. přechodové muzikusy (kombinace kovů, požadované velikosti a tvaru). Ty pak mohou být tavně navařeny ocelovou stranou k trupu lodi a na vrchní stranou z hliníku ke konstrukci nadstavby. V praxi se toto řešení velmi osvědčilo a nevykazuje žádné nedostatky. Při výrobě kryogenních zařízení je požadavkem plynotěsné spojení konstrukčních dílů

(převážně potrubí) z austenitické korozivzdorné oceli s hliníkem. I zde nachází uplatnění trubkové přechodové muzikusy, třískově opracované z plátované vícevrstvé desky, např. kombinace hliník, měděná nebo titanová mezivrstva, korozivzdorná ocel [Chládek, 1979]

Svary válcových ploch

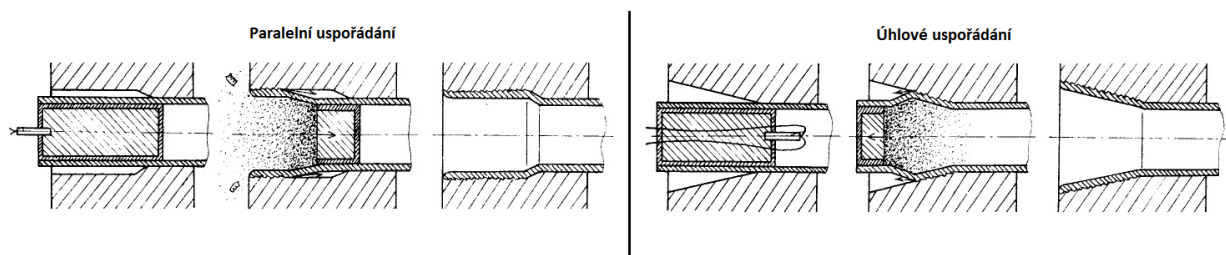
Korozivzdorné výstelky lze výbuchově navařit do již hotových silnostěnných reaktorových válcových nádob. Následné spojení těchto nádob usnadní dodávaná přírubová hrdla s přívodním potrubím, jejichž vnitřek je výbuchově navařen korozivzdornou vrstvou. Běžná je i bimetalická úprava trubek pro jadernou energetiku a chemické strojírenství. Příkladem jsou ocelové trubky s měděnou výstelkou, používané pro výrobu syntetického etanolu. Lze vyrábět i bimetalické válce nebo tyče z běžné konstrukční uhlíkové oceli, z venku opláštěné ušlechtilou vrstvou. Opláštěné tyče jsou např. užívány jako speciální elektrody. Významné je také výbuchové svařování trubek (obr. 29). Provádí se přeplátováním jejich konců, nebo navaření objímky na trubky sesazené k sobě [Crossland, 1982].

Obr. 29 Výbuchové svařování trubek



Významnou aplikací je výbuchové zavařování trubek do trubkovnic výměníku tepla. Spoj dosahuje kvalitativně vyššího stupně, než při použití tavných metod. Vykazuje lepší mechanickou odolnost a trvalou těsnost. Předností je současné upevnění i zavaření v jedné operaci. Existují v zásadě dva postupy (Obr. 30), které se liší uspořádáním trubky a trubkovnice. První je paralelní uspořádání, trhavina je iniciována z čela trubkovnice. Druhým je úhlové uspořádání, kdy je trhavina iniciována zevnitř trubky a detonace postupuje ve směru rozšiřující se mezery [Chládek, 1979].

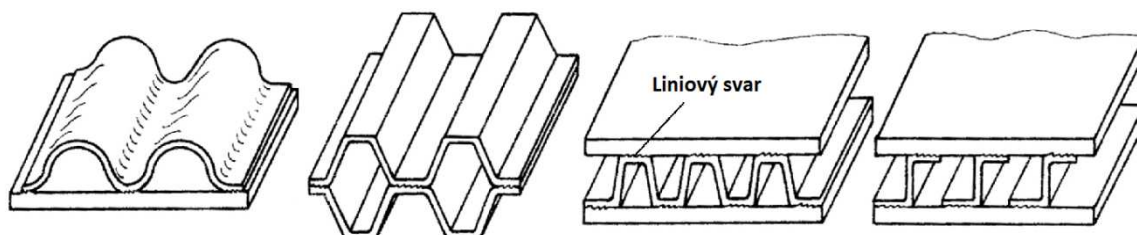
Obr. 30 Zavařování trubek do trubkovnic



Bodové a liniové svary

Bodové a liniové svary nachází uplatnění všude tam, kde není zapotřebí svarový spoj v celé ploše tenkého plátu, nebo při svařování jednotlivých konstrukčních dílů. Výhodou svařování plátů pouze v bodech je užití podstatně menších náloží, a proto je metoda proveditelná (za dodržení bezpečnostních podmínek) i mimo specializované výbušné pracoviště. Tímto způsobem se však dají plátovat jen tenčí plechy a výsledný díl nesmí být namáhán teplotními a tlakovými rázy. Nehodí se tedy pro výstelkování tlakových nádob, nebo výměníků tepla. Naopak je velmi užívána u netlakových nádob, zásobníků kapalin, vypíracích a sušících komor. Základovým materiálem bývá většinou uhlíková konstrukční ocel, s výstelkou z korozi-vzdorné chromniklové oceli, nebo titanu. Největší nádobou tohoto druhu byl zásobník vody pro Tokyo o průměru 64 m, výšce 14 m. Pro liniové svary se užívá pásek brizantní trhaviny a výsledný spoj vykazuje pevnost 75 až 100 % pevnosti svařovaného materiálu. Švový spoj je výhodný při výrobě odlehčených konstrukcí (obr. 31), hliníkových vodičů, ale také pro výrobu nádrží z vysokopevné martenzitické oceli, určených pro kapalná raketová paliva [Chládek, 1979].

Obr. 31 Liniové svary lehkých konstrukcí



4.5.9 Spojované kovy a jejich vlastnosti

Základový kov z legované a uhlíkové oceli lze plátovat korozi-vzdornou ocelí, mědí, titanem, hliníkem, tantalem, niklem a slitinami těchto kovů. Vzniká tak ve své podstatě nový materiál, který spojuje výhody použitých kovů.

Konstrukční ocel a korozi-vzdorná ocel

Bimetalý těchto ocelí byly vyráběny již před vznikem svařování explozí, jednak tavným navařením, hutnický (válcování ze združeně litých ingotů), nebo válcováním za tepla. Jejich vlastnosti jsou proto dobře známé. S nástupem výbušného svařování se jejich kvalita značně zlepšila a samotná výroba zjednodušila. Nedochozí k promísení materiálů ani tepelnému ovlivnění kovů, všechny vlastnosti jsou stejné jako před spojením. Tloušťka krycí vrstvy je rovnoměrná a její povrch není třeba dodatečně opracovávat. Ke změně struktury nedochází ani při dodatečném tepelném zpracování.

Konstrukční ocel – měď a její slitiny

Čistá měď se na ocel plátuje ze všech kovů nejlépe. Kvalitní spoj vzniká v širokém rozsahu podmínek, detonační rychlost může být v rozmezí 1500 až 4500 m.s⁻¹. Důvodem jsou mimořádně příznivé vlastnosti mědi, kterých nedosahuje žádný jiný běžně užívaný kov. Vykazuje výbornou tvárnost i za studena, dostatečnou hustotu, která zaručuje plastickou deformaci v základní desce i při nižších srázových rychlostech. Rozpouští se v mnoha kovech a má dobrou tepelnou vodivost, proto nedochází k natavení ve svarovém rozhraní i při mezních podmínkách srázu. Měď se pro své vlastnosti uplatňuje nejen jako samotná protikorozní vrstva, ale také jako mezivrstva kovů, které je problematické spojit přímo. Slitiny mědi již nemají tak široký rozsah svařitelnosti jako čistá měď. Přesto se plátují bez problémů. Větší pevnost vykazují slitiny s niklem, nižší houževnatost a teplota tání charakterizuje bronzы a mosazi, které je třeba plátovat v měkce žíhaném stavu. U kombinace mosazi s uhlíkovou ocelí zůstává zachována korozní odolnost a pevnost ve střihu i po několika cyklech tepelného zatížení, v rozpětí 20 °C až 400 – 700 °C [Chládek, 1979].

Konstrukční ocel a titan

Titan vyniká korozní odolností vůči vlhkému chloru, chloridům, mnoha kyselinám a agresivním látkám, které se používají např. v potravinářském a papírenském průmyslu. Používání titanu v masivní formě je velmi drahé a nevhodné pro nízkou tepelnou odolnost. Ohřev nad 200 °C způsobuje ztrátu pevnosti. Bimetal ocel a titan řeší oba problémy. Patří však k nejobtížněji výbuchově svařitelným kombinacím. I drobná odchylka parametrů srázu způsobí nezdar celého procesu. Pro zachování dobrých vlastností bimetalu nesmí být při následném svařování a dalším použití zahříván nad 560 °C [Crossland, 1982].

Konstrukční ocel a hliník

Hliník má vynikající korozivzdorné vlastnosti v různých agresivních prostředích. Je však měkký a málo houževnatý. V kombinaci s pevnou ocelí, která přejímá mechanické zatížení, vzniká bimetal výjimečných vlastností. Je však stejně jako titan velmi obtížně svařitelný. Chová se přesně obráceně, než měď. Díky malé hustotě není téměř schopen přimět povrch základové desky k potřebné plastické deformaci. Větší detonační rychlost není řešením, protože nízká teplota tání zapříčiní natavení povrchu třením o vytlačovaný vzduch z distanční mezery. Tyto vlastnosti se projeví o to výrazněji, je-li základovou deskou austenitická korozivzdorná ocel. Hliník navíc tvoří intermetalické křehké fáze s většinou kovů. Rozsah parametrů svařovacího procesu, při kterém vznikne kvalitní spoj,

je velmi úzký. Řešením je použití speciálních trhavin, které tyto parametry splňují. Výsledný bimetal snese ohyb o 180°, aniž by došlo k oddělení vrstev v místě svaru. Všechny kombinace s hliníkem se užívají v zařízeních s nízkým tepelným zatížením [Crossland, 1982].

Otěruvzdorné a rychlořezné oceli

Dobrou otěruvzdorností a houževnatostí vynikají oceli legované manganem, zejména Hadfieldovy oceli. Jsou však drahé a velmi obtížně se zpracovávají. Řešením je navaření na lépe obrobitelný materiál. Dalším zástupcem je Abrazit, který lze plátovat i v nežíhaném stavu a výsledný bimetal bez problémů kalit a popouštět. Kombinací nekalitelné houževnaté a dobře obrobitelné oceli s ocelí rychlořeznou, resp. nástrojovou, vznikají materiály vhodné pro přípravu řezných nástrojů. Výbuchové plátování otěruvzdorných a rychlořezných ocelí nečiní potíže, většinu z nich je však nutné před spojením měkce vyžítat. Pevnost spoje převyšuje pevnost základního materiálu [Crossland, 1982].

Speciální kombinace kovů

Velmi drahým a vzácným kovem je tantal. Vyniká vysokou odolností proti organickým i anorganickým kyselinám, jeho pevnost je však malá, proto se nabízí plátování na pevnější oceli. Při výbuchovém svaření se zvýší asi o 30 %, bez ztráty ohebnosti a pružnosti. Bimetal lze ohýbat o 180°, tvářet a válcovat za studena. Další málo užívaný kov je molybden. Jako jediný ze všech technických kovů vykazuje odolnost vůči vodíku i za vysokých teplot. Z bimetalu ocel a molybden se vyrábějí zařízení pro chemický průmysl, v nichž se vyskytuje atomární vodík. K výrobě bimetalů je užíván také nikl, ještě častěji však jeho slitiny (niklu a mědi v poměru 2 : 1, kterým se říká monely). Mají lepší mechanické vlastnosti než čistý nikl. Speciálními slitinami niklu vznikají také žárovečné bimetaly. Problematické je plátování olova na ocel, v tomto ohledu se podobá hliníku. Olovo však dobře odolává kyselině sírové, proto jsou jeho bimetaly velmi užitečné v chemickém průmyslu. Jediný způsob jak jej úspěšně plátovat, je použití trhavin s detonační rychlostí do 1200 m/s. Vznikne zcela homogenní spoj, což dokázala zkouška smáčivosti. Olovo navařené na ocel bylo následně roztavené a smáčelo ocel v celé ploše (za normálních podmínek se ocel olovem nesmáčí). [chládek, 1973]

Ostatní materiály

Většina výše zmíněných kombinací je tvořena dvěma kovy. Dá se však spojovat i více kovů najednou. Vícevrstvé materiály se střídavě nízkou a vysokou akustickou impedancí, např. hliník o tloušťce 0,127 mm (1/20") v 11 vrstvách a Hadfieldova ocel mají větší odolnost

proti balistickému průrazu než materiály homogenní o stejné hmotnosti. Rozdílnou teplotní roztažnost kovů, spojených do tlusté desky, relaxuje plastická deformace méně pevné složky. U tenkých bimetallických pásků je tepelná roztažnost relaxována roztažením, nebo smrštěním celého pásku. Této vlastnosti se již dlouho využívá v měřicích a regulačních zařízeních. Dříve byly spojovány pájením, nýtováním, nebo naválcováním. Svařením explozí se jejich výroba zjednodušila a zkvalitnila [Crossland, 1982].

Bronzy jsou vhodné materiály pro výrobu kluzných uložení. V kombinaci s vhodným základovým kovem, se jejich kluzná schopnost obohatí o celkovou houževnatost. Bimetalny bronzu s ocelí se dají válcovat a tepelně opracovávat, pevnost a celistvost spoje tím není nijak narušena. Zhotovují se z něj ložisková pouzdra, vodící lišty apod.

5. Zhotovení zkušebních návarů

Pro potřeby diplomové práce byly zhotoveny tavné návary běžně užívanými konvenčními metodami ručního svařování, automatizovaného svařování a také návary explozí. Ze zkušebních návarů byly odebrány vzorky, které se dále upravily do podoby vhodné pro pozorování makrostruktury a mikrostruktury. Vybrané vzorky byly vizuálně posouzeny a vzájemně porovnány na základě konzultací s vedoucím práce a informací získaných při návštěvě výzkumného a testovacího centra materiálů v Praze - Běchovicích.

5.1 Tavné návary

Tavnými technologiemi, oproti svařování explozí, lze svařit pouze omezené kombinace kovů. U klasického svařování obalenou elektrodou je škála dobře svařitelných kovů ještě užší. Pro zhotovení zkušebních návarů byla zvolena kombinace uhlíkové oceli s korozivzdornou ocelí, které lze svařovat jak obalenou elektrodou, tak explozí.

5.1.1 Ruční svařování obalenou elektrodou

Při svařování obalenou elektrodou ovlivňuje výslednou kvalitu svaru (návaru) příprava svarových ploch, druh a kvalita elektrody, nastavení svařovacích parametrů a zejména zručnost a zkušenost svářeče.

První zkušební vzorky 1 a 2 byly provedeny amatérským svářečem v podmínkách domácí dílny, s použitím poloprofesionálního svařovacího zařízení OMICRON TIG 160 P. Plocha pro návary byla zbrusena na ploché brusce. Před provedením návarů se povrch odmastil acetonem. Plochá tyč byla připevněna v krajích svěrkami k opěrné kovádlině. Na takto připravenou plochu byly provedeny návary obalenou elektrodou, určenou pro svařování

korozivzdorných ocelí, zejména potravinářské oceli 17 240. Směr svarových housenek byl veden napříč ploché tyče, v celé šíři. Směr navařování vedl od kraje ke středu a jednotlivé housenky kladeny vedle sebe. Výsledný návar byl zbaven strusky a dočištěn nerezovým kartáčem (obr. 32.). Při prvním pohledu je patrné nerovnoměrné napojení housenek, struktura je nevyrovnaná a hrubá. V několika místech došlo dokonce k provaření základního kovu. Na hranách jsou patrné hluboké závary.

Obr. 32 Amatérské návary

Vzorek 1



Vzorek 2



Další tavný návar (vzorek 3) byl zhotoven obalenou elektrodou pro svařování nelegovaných ocelí ve dvou vrstvách na tlustou základní desku z uhlíkové oceli (obr. 33).

Obr. 33 Návar na plný profil

Vzorek 3



Stejnou technologií byl zhotoven návar (vzorek 4) v profesionální zámečnické dílně. Povrch ploché tyče se před navařením na čisto obrousil úhlovou bruskou. Návary byly kladeny ve stejném směru, tedy napříč pásovinou. Oproti předchozímu postupu nebyla pásovina uchycena k podložce, což způsobilo její prohnutí v důsledku tepelného smrštění navařené vrstvy (obr. 34). Po očištění strusky je vidět vyrovnaná jednolitá struktura návaru bez mezer. V ploše ani na hranách nedošlo k provaření materiálu.

Obr. 34 Profesionální návary

Vzorek 4



Poslední zkušební vzorek (5) obalenou elektrodou je oboustranný koutový „T“ svar. Z jedné strany byl proveden jednovrstvý, z druhé strany dvouvrstvý svar (obr. 35). Parametry všech tavných návaru a svarů obalenou elektrodou jsou v tab. 3.

Obr. 35 Oboustranný koutový „T“ svar

Vzorek 5



5.1.2 Ruční svařování metodou TIG

Metodou TIG jsou většinou svařovány ušlechtilé korozivzdorné materiály a náročnější konstrukce. Proces probíhá v ochranné atmosféře vzácných plynů argonu, nebo helia. Tavné návary nerez oceli na uhlíkovou ocel metodou TIG nečiní žádný problém, i zde platí, že zásadní vliv na kvalitu a vzhled svaru má správné nastavení svařovacího zařízení a zručnost svářeče.

První zkušební návar (vzorek 6) byl opět proveden v amatérských podmínkách. Základní materiál zůstává nezměněn, stejné je i svařovací zařízení. Návar byl tvořen přídavným drátem pro svařování korozivzdorných ocelí. Druhý zkušební návar (vzorek 7), byl vytvořen profesionálním svářečem. V obou případech byl použit ochranný plyn 4.6 technický argon a wolframová elektroda průměru 2 mm. Výsledné návary jsou záměrně zobrazeny vedle sebe (obr. 36), lépe tak vyniknou rozdíly obou provedení. Amatérský návar je nerovnoměrný, v několika místech provařený skrz základní materiál. Došlo k promísení obou kovů a tím byly narušeny ušlechtilé vlastnosti krycí vrstvy. Parametry návarů metodou TIG jsou v tab. 3.

Obr. 36 Návary metodou TIG

Vzorek 6



Vzorek 7



5.1.3 Poloautomatické návary metodou MAG

Na válcovou tyč z oceli 14 220 o průměru 50 mm byl po obvodu proveden návar (vzorek 8) drátem C 508, průměru 1,2 mm, poloautomatickým navařovacím zařízením, metodou elektrovibračního navařování (obr. 37). Přídavný drát je určen na obnovu opotřebovaných válcových ploch. Svařovací proud 190 A, napětí 15 V, ochranná atmosféra CO₂. Drát je přidáván do místa svaru za neustálého kmitání. V každém kmitu nastane zkrat, odtrhnutím vznikne elektrický oblouk s přenosem navařovaného materiálu, přerušení elektrického oblouku a mrtvý chod. Nastavení všech parametrů svařování má

zásadní vliv na kvalitu návaru. Účelem kmitavého navařování je dosažení celistvého rovnoměrného návaru, při minimálním prohřátí základového kovu. [Turňa, 1989]. Parametry svařování jsou uvedeny v tab. 3.

Obr. 37 Elektrovibrační návary válcové tyče

Vzorek 8



5.1.4 Trubičkové návary MOG

Poslední zkušební návary tavnou technologií, byly provedeny poloautomatickým svařovacím zařízením rychlostí 20 cm/min na základový kov tloušťky 25 mm. Přídavný materiál je trubičkový drát s vlastní ochranou, určený pro navařování dílů extrémně namáhaných otěrem. Návar byl zhotoven v jedné (vzorek 9) a ve dvou (vzorek 10) vrstvách, s použitím rozdílných elektrod (obr. 38). Svařovací parametry jsou uvedeny v tab. 3.

Obr. 38 Otěru vzdorné návary



Z obrázku 38. jsou patrné a pouhým okem viditelné praskliny v návarové vrstvě. Základová deska byla přišroubována k podložce, při chladnutí tak nemohlo dojít k jejímu

prohnutí smršťující se vrstvy návaru. Vnitřní napětí překročilo mez pevnosti tvrdokovu a vznikly praskliny.

5.2. Výbuchové plátování

Příprava materiálů a celý proces výbuchového svařování vzorků bude popsán podrobněji. Svařování explozí je výjimečná technologie, při které je manipulováno s výbušninami a většina přípravných prací probíhá v přísně hlídaných pracovištích, za zvýšených bezpečnostních podmínek. Z těchto důvodů není žádoucí, aby byl proces přípravy přerušován, měl by probíhat souvisle a je ukončen samotným svařením. Dostupnost fotografií přímo z jeho průběhu je velmi omezená, avšak pro objasnění metody mají velký význam. V této části práce budou proto zobrazeny autentické fotografie a použity informace získané na výbuchovém pracovišti, při svařování vzorků.

Pro plátování byla zvolena kombinace uhlíkové oceli a korozivzdorné oceli. Kombinace je užívána i v praxi, např. při výrobě výměníků tepla. Rozměry výbuchově svařovaných kovů jsou uvedeny v tab. 1.

Tab. 1 Rozměry výbuchově svařovaných kovů

Základový kov	Krycí kov
Uhlíková ocel 11 375, rozměr 180x80 mm, tloušťka 20 mm	Korozivzdorná ocel 17 240, rozměr 250x150 mm, tloušťka 1,5mm

Styčné plochy spojovaných kovů musí být rovné, hladké a odmaštěné. Základový kov byl na pracovišti katedry materiálu a strojírenské technologie ČZU zbrúšen do roviny na ploché brusce a ošetřen konzervačním prostředkem proti korozi. Hrany styčné plochy musí být ponechány ostré, aby se o ně urychlovaný plát lépe ostříhнул. Plát korozivzdorné oceli byl z výroby opatřen ochrannou folií, proto jej nebylo třeba povrchově upravovat.

5.2.1 Pracoviště pro svařování explozí

Výbuchové plátování bylo vzhledem k malým rozměrům vzorků provedeno na venkovním střešti v areálu univerzity Pardubice, na pracovišti katedry energetických materiálů. Střešti je umístěno v odlehlé části areálu. Místo pro odpálení výbušnin je ohrazeno profilovanou plechovou zábranou, která zachycuje nebezpečné odlétající částice a zároveň usměrňuje akustické účinky směrem nahoru. K odpališti jsou přivedeny kabely z rozvodny, od které vedou přívody pod zemí k odpalovacímu zařízení v přilehlé budově. Budova je vybavena pro přípravné práce, s dobrým výhledem na odpaliště.

5.2.2 Příprava sestavy

Postup zhotovení sestavy se neliší s postupy uvedenými v teoretické části, budou zde zmíněny podrobnější detaily a přesné parametry pro spojované kovy. Podložka sestavy je z dřevotřískové desky a na ní je položen základový kov, zbavený ochranného filmu. V rozích podložky jsou přilepeny distanční špalíky. Plátovaný kov je větší, na horní plochu je vruty připevněn obvodový rámeček z dřevěných latěk (obr. 39).

Obr. 39 Příprava sestavy



Výška distančních špalíků se dá regulovat kousky plechu požadované tloušťky, jak je patrné z obr. 39 vlevo. Veškeré pomocné prvky jsou na jedno použití. Rozměry rámečku jsou vypočítány tak, aby objem prostoru, který vznikne uvnitř, přesně odpovídal požadovanému množství trhaviny. Nelze vytvořit rámeček větší a naplnit jej třeba jen do poloviny. Vrstva trhaviny by byla nerovnoměrná. Podél kratší strany uvnitř rámečku prochází pásek bleskovice, jež má funkci počínové trhaviny. Velmi rychlá detonace počínové trhaviny vyvolá rovnoměrnou výbuchovou přeměnu v hlavní náloži. Detonační vlna postupuje v celé šíři z jednoho konce ke druhému. Spojování kovů tak probíhá rovnoměrně od kraje a tím je zaručeno postupné vytlačování vzduchu z distanční mezery. V další fázi přípravy bude nanášena trhavina do prostoru rámečku (obr. 40). Používá se sypké trhavinové směsi Semtex S. Při manipulaci je bezpečný, nezapáchá a není dráždivý. Nechtěná detonace je vyloučena, směs je inertní i vůči ohni. K iniciaci výbuchové přeměny je zapotřebí silný impuls jiné detonace, např. brizantní trhaviny [Nesvadba, 2006].

Obr. 40 Nanášení sypké trhaviny



Směs musí dokonale vyplnit celý prostor a pak je dorovnána hladítkem s horní hranou rámečku. Na digitální váze je zkontrolováno nanesené množství (obr. 41). Krycí plech s trhavinou se položí na distanční špalíky a sestava je připravena k přesunu na odpaliště.

Obr. 41 Vážení trhaviny



Průběh svaření závisí na více faktorech. Díky pečlivé přípravě je riziko nezdaru minimální, přesto však může dojít k selhání, např. výbuchová přeměna neproběhne v celé ploše hlavní nálože. Byly proto vyhotoveny tři totožné sestavy. Jelikož je základní deska dostatečně houževnatá, může být celá sestava odpálena volně položená na zemi. Podklad není třeba nijak zvlášť rovnat. Po umístění sestavy (obr. 42) je provedena poslední vizuální kontrola čistoty styčných ploch. K přivedeným kabelům se připojí rozbuška, teprve potom je upevněna k bleskovici, např. samolepící páskou. V tuto chvíli je sestava připravena k odpálení.

Obr. 42 Umístění sestavy na odpališti



Přestože se jedná o malé vzorky, na jeden bylo použito přibližně 500 g trhaviny. Pokud by někdo zůstal v prostoru odpaliště a byl vystaven účinkům detonace, následky by byly tragické. Všechny přítomné osoby se přesunou do budovy, odkud bude nálož odpálena. Výbuch rozbušky iniciuje bleskovicí a ta spustí výbuchovou přeměnu hlavní trhavinové nálože. Celý proces trvá jen několik mikrosekund. Veškeré pomocné prvky sestavy jsou

zcela zničeny a rozmetány do okolí. Zůstane jen hotový bimetál a zdeformovaný ostřížený přesah krycího kovu (obr. 43).

Obr. 43 Sestava po detonaci



Bimetál je po detonaci studený, lze jej uchopit do ruky. Při svaření nedochází k tepelnému ovlivnění materiálů. Svar je zcela homogenní v celé ploše, povrch krycího kovu není nijak poškozen (obr. 44). Mírná deformace je patrná na krajích, kde došlo ostřížením materiálu k zaoblení hran. Tato deformace je běžná a její velikost závisí na tloušťce krycí vrstvy a druhu spojovaných kovů. Houževnaté krycí plechy větších tloušťek, je nutné po obvodu v místě předpokládaného stříhu zeslabit vyfrézováním drážky. Pokud se kov nezeslabí, deformace v krajích je příliš velká. Využitelná plocha bimetálu se tak zmenšuje.

Obr. 44 Výbuchově svařený bimetál

Vzorek 11



5.2.3 Parametry svařování explozí

Uvedené hodnoty jsou platné pro trhavinu typu Semtex S, použité na vzorek 11. Pro jiné druhy trhavin je nutné použít jiný postup a obecnější vztahy. Přesné parametry

výbuchového svařování jsou uvedeny v tab. 2. Byla použita trhavina Semtex S30, počín nálože proběhl pomocí bleskovice Startline 12.

Tab. 2 Parametry výbuchového svařování

Vzorek	Rozměry nálože [mm]	Hmotnost nálože [g]	Hustota nálože [g.cm ⁻³]	Detonační rychlost [m.s ⁻¹]
1	222 x 126 x 17,5	527	1,08	2250 ÷ 2350
2	223 x 126 x 17,5	553	1,12	
3	222 x 125 x 17,6	531	1,09	

Matematickým zpracováním mnoha desítek měření byly stanoveny empirické závislosti pro výpočet parametrů použité trhaviny a parametrů srážu kovových desek.

Distanční vzdálenost se volí průměrně takto: $D_s = 2 \cdot h_d$

D_s = distanční mezera; h_d = tloušťka urychlovaného plechu

Velikost distanční mezery byla 3 mm.

Tloušťka nálože se při prvním přiblížení vypočte: $h_e \approx 10 \cdot h_d$

Toto přiblížení platí v oboru tlouštěk plechů $h_d = 1$ až 4 mm běžných technických plechů a slitin s hustotou okolo 8 g.cm⁻³ a tažností min. 10 %. Směrem k větším tloušťkám plátujících plechů se zpravidla volí relativně menší nálož, protože s tloušťkou nálože současně roste detonační rychlost trhaviny a kinetická energie dopadu na jednotku svařované plochy je také vyšší.

Přibližná tloušťka nálože byla vypočtena 15 mm.

Podle odhadnuté vrstvy trhaviny zvolíme trhavinu s vhodným obsahem PETN, aby dolní mezní vrstva trhaviny h_{dm} nebyla menší než navržená tloušťka nálože, tedy:

$$\frac{h_e}{h_{dm}} > 1$$

Skutečná tloušťka nálože byla 17,5 mm.

Hustota nálože vychází z objemu rámečku vyplněného trhavinou a hmotnosti této trhaviny. Pro první přiblížení lze uvažovat průměrnou hustotu trhaviny $\rho_e = 1,15$ g.cm⁻³, což je průměrně dosahovaná hustota sytké trhaviny Semtex S [Nesvadba, 2006].

Pro vzájemné posouzení byly použity další dva vzorky (obr. 45) z již hotových výbuchových návarů. Parametry jsou uvedeny v tab. 3.

Obr. 45 Vzorky 12 a 13 z výbuchových návarů

Vzorek 12



Vzorek 13



Tab. 3 Parametry zkušebních návarů

Základní kov	Návar	Svařovací parametry	Počet vrstev	Metoda	Č. vzorku
plochá tyč z uhlíkové oceli 11 375, rozměr 180 x 50 x 5 mm	OK 6130/308L-17, 2,5 x 300 mm	80 A	1	MMAW	1
	LIMAROSTA E308L-17, 3,2	120 A		MMAW	2
plný profil z uhlíkové oceli 11 375, rozměr	E – B 121	100 A	2	MMAW	3
plochá tyč z uhlíkové oceli 11 375, rozměr 180 x 50 x 8 mm	OK 68.81/312-17, 3,2 x 300 mm	130 A	1	MMAW	4
plochý profil z uhlíkové oceli 11 375	E – B 121	100 A	1, 2	MMAW	5
plochá tyč z uhlíkové oceli	ER 316 LSI, 2,0 (ferryt 8%)	70 A	1	TIG	6
plochá tyč z uhlíkové oceli 11 375	ER 308 LSI, 2,0 (ferryt 5-10)	80 A	1	TIG	7
válcová tyč, ocel 14 220	drát C 508	190 A, 15 V	1	MAG	8
ocel 11 375	trubičková elektroda s vl. ochr. SK A 45 - 0	200 A, 30V	2	MOG	9
ocel 11 375	trubičková elektroda s vl. ochr. SK A 43 - 0	200 A, 30V	1	MOG	10
uhlíková ocel 11 375	korozivzdorná ocel 17 240	-	1	explozí	11
uhlíková ocel, tloušťka 20 mm	titan, tloušťka 5 mm	-	1	explozí	12
korozivzdorná ocel, tloušťka 6 mm	měď, tloušťka 2 mm	-	1	explozí	13

6. Příprava vzorků pro metalografii

Vizuální nedestruktivní kontrolou návarů pouhým okem, lze odhadnout jeho kvalitu podle ukazatelů, které jsou patrné na jeho povrchu. Podle rovnoměrnosti a vzhledu svarové housenky se dá odhadnout provaření materiálu, celistvost návaru apod. Povrchové praskliny a dutiny jsou také pozorovatelné pouhým okem. Zajímavější je však pohled na řez materiálem, kde je dobře pozorovatelná struktura návaru. Jedná se o metodu destruktivní, protože zkoumaný materiál bude rozřezán a dále upravován do podoby zkušebních vzorků.

6.1 Dělení zkušebních návarů

Snadno obrobitelné materiály se dají dělit pásovou pilou. Tlustší profily z houževnatého materiálu budou rozřezány vodním paprskem. Základní podmínkou je, aby nedošlo při řezání k intenzivnímu ohřátí a tepelnému ovlivnění materiálu.

6.1.1 Dělení elektrickou pásovou pilou

Pila je vybavena mazáním a chlazením kapalinou přímo do místa řezu. Obrobek je při řezání bezpečně upnutý. Takto byly rozřezány všechny zkušební návary, s výjimkou tvrdonávarů trubičkovou elektrodou a výbuchovým svařováním. Vzorek pro pozorování je vhodné vybrat z místa, kde jsou návarové housenky plnohodnotné, tvořené stabilním obloukem. Tato oblast se nachází dál od kraje, tedy mimo začátek a konec návaru. Požadovaný řez (obr. 46) je veden kolmo ke směru svarových housenek, aby bylo dobře patrné jejich napojení, rovnoměrnost, tvar a hloubka závaru.

Obr. 46 Řez materiálu

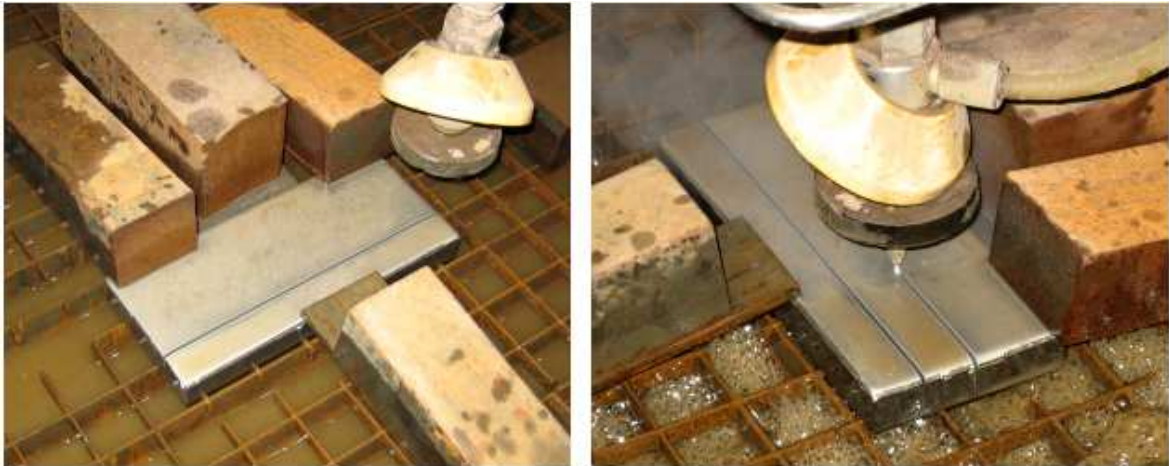


6.1.2 Dělení vodním paprskem

Výbuchové návary a tavné otěru vzdorné návary byly rozřezány vodním paprskem (obr. 47). Vodní paprsek je účinná technologie dělení různých druhů materiálů. Nedochozí k jejich ohřátí, při velkém rezném výkonu. Pohyblivá hlavice s tryskou umožňuje rovné, ale

i tvarové výřezy. Dělený materiál spočívá na kovovém roštu, který je upevněn nad nádrží s vodou. Aby nedošlo k posunu materiálu, musí být zatížen několika závažími. Masa vody v nádrži tlumí dopad paprsku a splavuje prořezaný materiál.

Obr. 47 Řez vodním paprskem



Po rozřezání vzorků (obr. 48) následovalo strojové zbroušení ploch určených pro pozorování.

Obr. 48 Vzorky po rozřezání a strojovém výbrusu



6.1.3 Výbrusy pro makrostrukturu

Pro sledování makrostruktury je třeba dané plochy na jemno vybrousit. Broušení bylo provedeno brusnými papíry značky SIA, pro broušení pod vodou. První kolo výbrusů bylo na papíru o zrnitosti 320. Papír ležel na tvrdé podložce z laminované dřevotřísky, aby zůstala co nejlépe zachována rovina plochy. Broušení probíhá ručně, pravidelnými rovnými tahy v jednom směru. Zrnitostí 320 byly vybroušeny hrubé stopy po strojovém broušení. Další kola výbrusů probíhala na papírech zrnitosti 800, 1500, 2000 a poslední vyhlazení na papíru 2500. S takto připravenými vzorky je třeba zacházet šetrně. Jsou náchylné na dotyk lidské ruky a nesmí se dotýkat ani navzájem. Poškozený povrch škrábanci, nebo otisky prstů je pro další pozorování nevhodný.

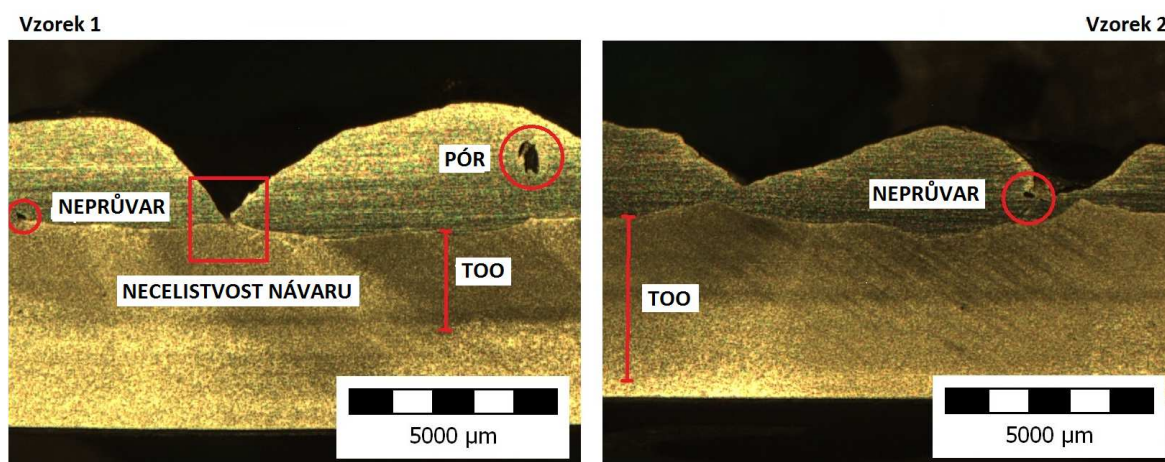
Dalším krokem je leptání povrchu v laboratoři. Bude tím zvýrazněn navařený kov a tepelně ovlivněná oblast. Leptání se provádí kyselinou, v tomto případě 5% HNO₃ v etylalkoholu. Skleněná laboratorní tyčinka se omotá vatou a namočí do leptadla. Leptaná plocha je potírána rovnoměrně v celé ploše. Během leptání se postupně zvýrazňuje navařovaný kov a tepelně ovlivněná oblast. Když je struktura dostatečně výrazná, opláchne se vzorek čistou vodou a rychle osuší horkým vzduchem, aby nedošlo k povrchové korozi. Stejným způsobem jsou naleptány i ostatní vzorky.

6.1.4 Makrostruktura

Počítačový program na zpracování fotografií makrostruktury je propojen s mikroskopem vybaveným digitální kamerou. Byly pořízeny fotografie vzorků při 3,5 násobném zvětšení, na kterých je dobře patrný návar, rozhraní, tepelně ovlivněná oblast a základový kov. Při tomto zvětšení se dají pozorovat i případné větší necelistvosti, trhliny, póry a neprůvary. Pro dobré vykreslení snímků je důležité správné osvětlení a obraz musí být pečlivě zaostřen.

První budou posouzeny ruční návary obalenou elektrodou, vzorek 1 a 2 (obr. 49).

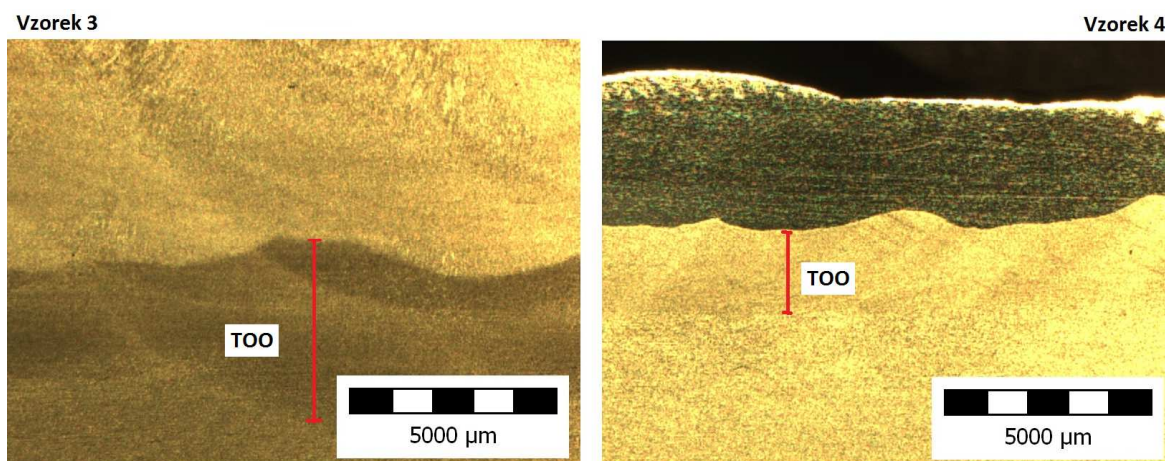
Obr. 49 Svařování ruční obalenou elektrodou



Svarové housenky jsou u obou vzorků nerovnoměrné a netvoří celistvý návar. Potvrdila se rozsáhlá tepelně ovlivněná oblast (TOO), u vzorku 1 sahá přibližně do poloviny základového materiálu, u vzorku 2 prochází téměř celým základovým materiálem. Navařený kov, zejména na vzorku 1, vykazuje necelistvosti, póry způsobené přehřátím taveniny a neprůvary. Přechodové rozhraní je zvlněné hlubokými závary do základového materiálu.

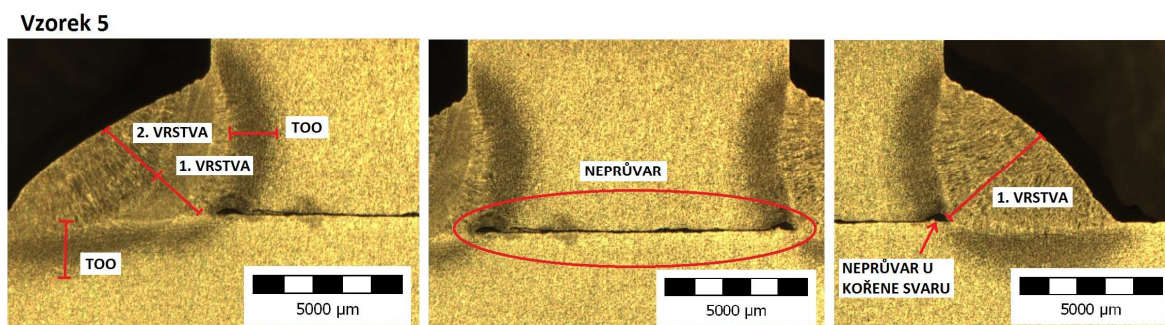
Další návary obalenou elektrodou, jsou na obr. 50. Vzorek 3 byl navařen ve dvou vrstvách, TOO proto zasahuje hlouběji do základního materiálu. Svarové housenky dobře navazují, návar je celistvý bez pórů a neprůvarů, podle tmavěji zbarvených přechodů v návarové vrstvě je patrné jejich napojování. Vzorek 4 je navařen rovnoměrně, přechod mezi housenkami není při tomto zvětšení (3,5x) viditelný, jejich tvar lze vyvodit podle rozhraní obou materiálů, které kopíruje závar do základního kovu. Návar je celistvý, bez pórů. TOO zasahuje přibližně jen do 1/3 základního materiálu.

Obr. 50 obalená elektroda



Posledním vzorkem (5) svařeným obalenou elektrodou je koutový „T“ svar (obr. 51), který byl proveden v jedné a ve dvou vrstvách (na obr. 51 vlevo). Koutový svar je mírně převýšený a málo provařený ke kořeni svaru. Z neprůvaru u kořene svaru může vzniknout při namáhání prasklina, která se rozšíří do celého spoje a může dojít k jeho rozlomení.

Obr. 51 Koutový „T“ svar



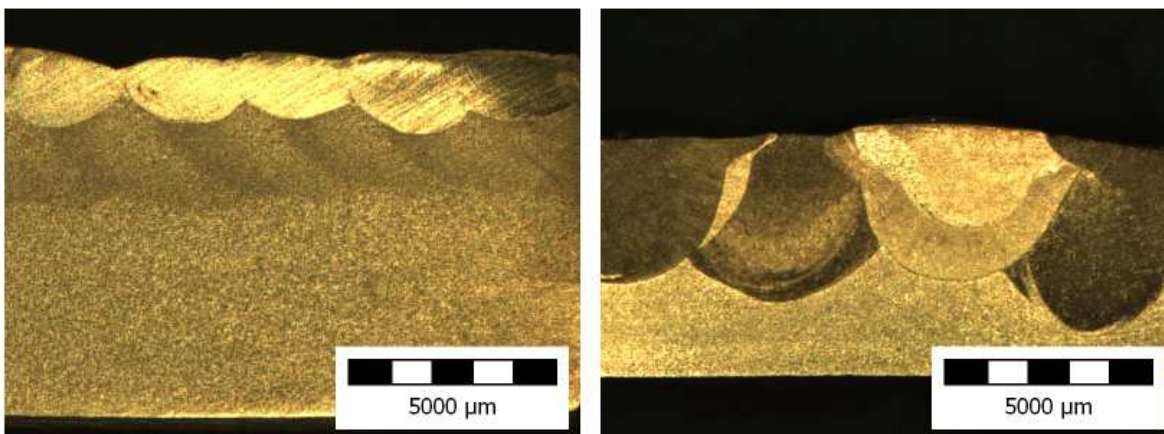
Vzhledem k tloušťce spojovaných profilů, by bylo vhodné vytvořit šikmé svarové plochy na obou hranách navařovaného dílu. Styčné plochy svaru by umožnily hlubší provaření materiálu ke kořeni, bez převýšení svarové housenky. Zvýšila by se pevnost celého spoje.

Další porovnávané snímky byly ručně svařeny metodou TIG (obr. 52), která je šetrná a používá se proto ke svařování ušlechtilých materiálů. Svarová lázeň byla chráněna technickým argonem. TIG je precizní metoda, při které svářeč sám reguluje množství přidávaného materiálu. Jelikož wolframová elektroda neubývá, vzdálenost elektrody od svarové lázně je konstantní a dobře kontrolovatelná. U této metody obzvláště záleží na šikovnosti a zkušenosti svářeče. Na vzorcích 6 a 7 je tato skutečnost dobře patrná. Vzorek 6 byl zhotoven profesionálem.

Vzorek 6

Obr. 52 Metoda TIG

Vzorek 7

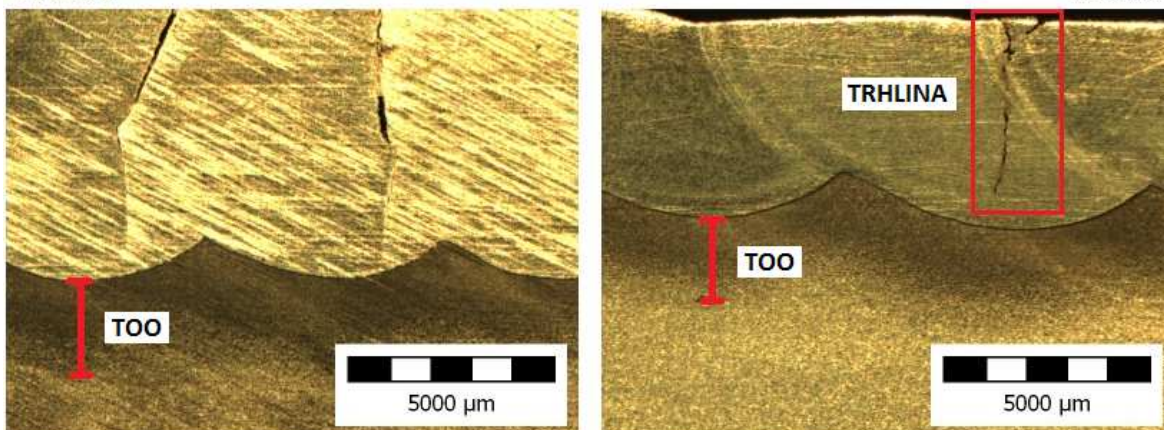


Vzorky 8 a 9 (obr. 53) byly navařeny trubičkovou elektrodou s vlastní ochranou, technologií MOG. Při poloautomatickém svařování je řada úkonů prováděna manuálně, např. nastavení svařovacích parametrů, upevnění a výměna dílce, doplňování zásobníku drátu atd. Samotný proces však probíhá automatizovaně. U ručního svařování více, či méně kolísá vzdálenost přiváděného drátu do svarové lázně. Mění se tím délka oblouku a jeho stabilita, což má negativní vliv na stejnoměrnost návarů. U svařovacího poloautomatu probíhá posun svařovací hlavice a přidávání materiálu zcela synchronizovaně, délka elektrického oblouku se proto nemění. Díky tomu je výsledný návar rovnoměrný, svarové housenky se pravidelně překrývají.

Obr. 53 Trubičkové tvrdonávary poloautomatem MOG

Vzorek 8

Vzorek 9

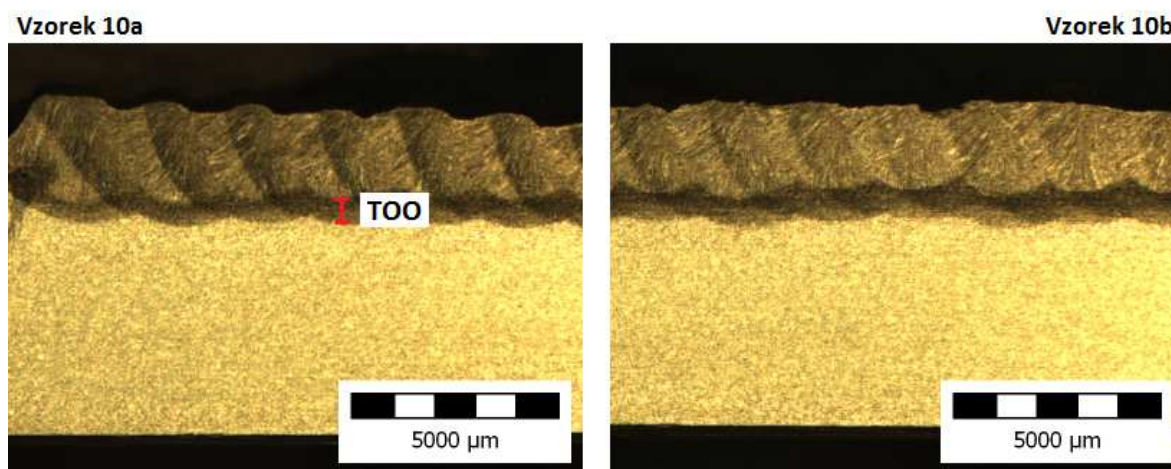


Návar je stejnoměrný. Tepelně ovlivněná oblast je vzhledem k tloušťce návaru malá. Svařovací rychlost byla 20 cm/min při 200 A. Svarový kov je roztaven rychle a nedochází k přehřátí materiálu do hloubky. TOO pravidelně kopíruje závar v základovém kovu. Trhliny v návaru byly patrné již při vizuální kontrole. Na snímkách je vidět, že prochází celou vrstvou návaru.

Navařovaná vrstva dosahuje podle technického listu trubičkové elektrody tvrdosti 65 HRC. Napětí způsobená chladnutím kovu není schopna relaxovat plastickou deformací a dochází v několika místech k porušení celistvosti návaru. U vzorku 8, byly návary provedeny ve dvou vrstvách. Praskliny jsou díky silné vrstvě a značnému vnitřnímu pnutí ještě více patrné. Pokud se však tvrdonávar neodlupuje od základního materiálu, trhliny nevadí. U tvrdonávarů namáhaných rázem, nebo ohybem, je nutné použít mezivrstvu s vysokou tažností, aby se zabránilo šíření prasklin do základního materiálu.

Vzorek 10 je výřez z plné kruhové tyče (obr. 54), na které byl proveden obvodový návar poloautomatickým elektrovibračním navařením.

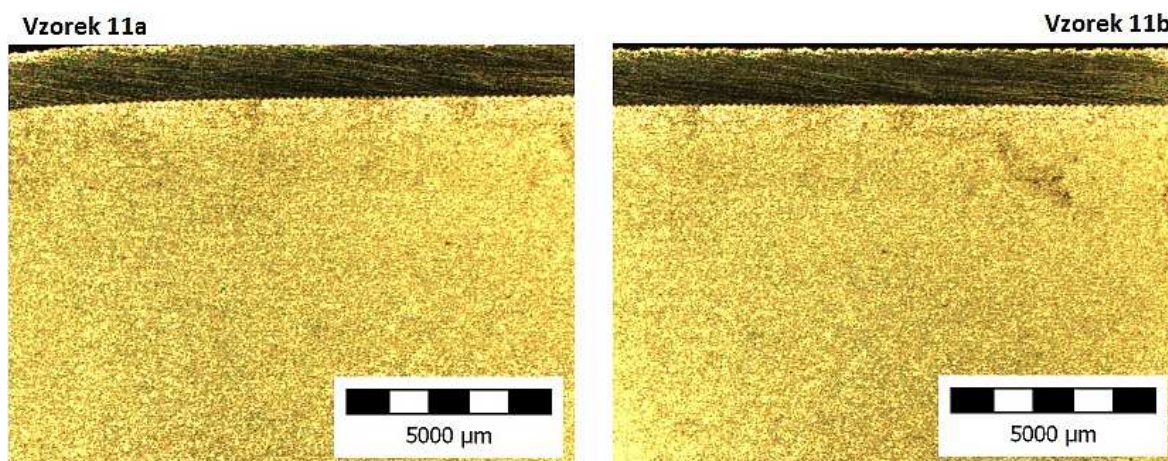
Obr. 54 Obvodový návar elektrovibračním navařením MAG.



Svarová housenka je velice rovnoměrná. Celistvost návaru je patrná z obou fotografií daného vzorku. Návar neobsahuje žádné trhliny a neprůvary. Tepelně ovlivněná oblast je velice úzká a zasahuje pouze nepatrně do základového materiálu, což potvrzuje hlavní přednost této metody – minimální ohřátí materiálu během procesu navaření.

Všechny výše uvedené vzorky návarů, byly zhotoveny tavnými metodami buďto ručně, nebo mechanizovaně. Metoda, kterou byl vytvořen vzorek 11 (obr. 55), využívá ke spojení kovů tlak. Svařování explozí je oproti ostatním konvenčním postupům zcela specifické. Celý proces svaření probíhá za studena, teplota v místě spoje vzroste maximálně v řádu desítek stupňů oproti teplotě okolí.

Obr. 55 Výbuchové plátování



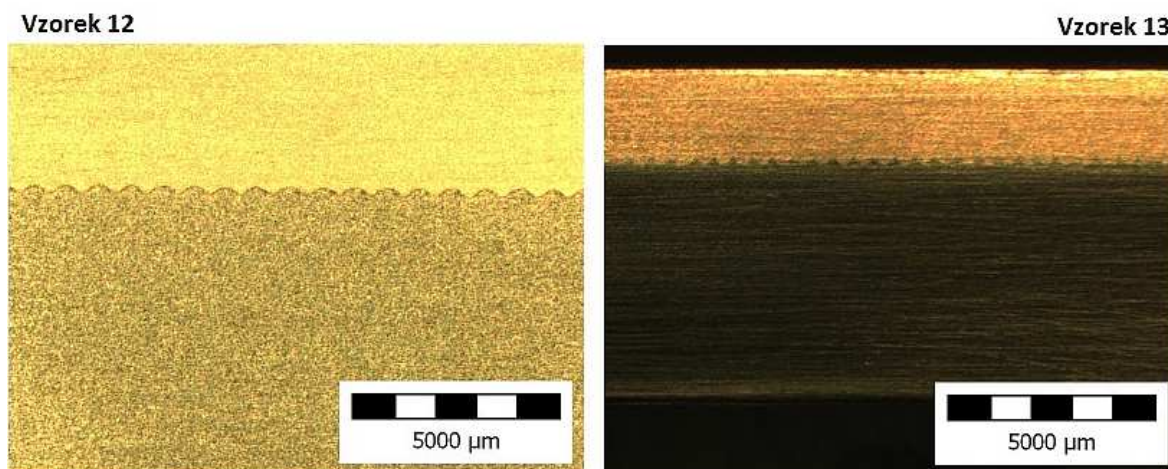
Leptadlo pro zvýraznění navařeného kovu a tepelně ovlivněné oblasti bylo aplikováno i na výbuchem navařené vzorky. Barevně nezměněná oblast kolem svarového rozhraní nasvědčuje tomu, že v místě svaru skutečně k ohřátí nedochází. Struktura krycího kovu je zcela homogenní, vykazuje totožné vlastnosti jako materiál před urychlením. Stejně tak základový materiál.

Na snímku 11a je zachycen začátek plátovacího procesu. V kraji bimetalu, kde začíná dopad plátující desky, vzniká rozhraní přímé, protože intenzita srážu a dynamický úhel dopadu teprve nabírají potřebných hodnot. Když jich dosáhnou, vzniká typické vlnité rozhraní. Stejný princip platí i na konci, kde intenzita srážu klesá a vlnité rozhraní postupně přejde opět v rozhraní přímé. Kromě začátku a konce je v celé ploše stejnoměrné rozhraní vlnité, jak je patrné ze vzorku 11b.

U kombinace vzorku 11, běžné uhlíkové oceli a korozivzdorné oceli, je vlnité rozhraní velmi jemné. Důvodem je menší úhel srážu, který vychází z velikosti distanční mezery, tedy z tloušťky krycího kovu. V případě tlustšího krycího kovu, je i distanční mezera větší. Urychlený kov na delší dráze dosáhne vyšší rychlosti a sráž desek probíhá pod větším dynamickým úhlem. Výsledkem je intenzivnější plastická deformace styčných ploch a mohutnější vlnité rozhraní.

Zmíněný mechanismus ovlivňující velikost vln potvrzují snímky na obr. 56, na kterých je zachycené rozhraní bimetalu uhlíkové oceli s titanem a korozivzdorné oceli s mědí.

Obr. 56 Velikost vlnitého rozhraní



Na velikost vln, má vliv i detonační rychlost a houževnatost kovů.

6.1.5 Mikrostruktura

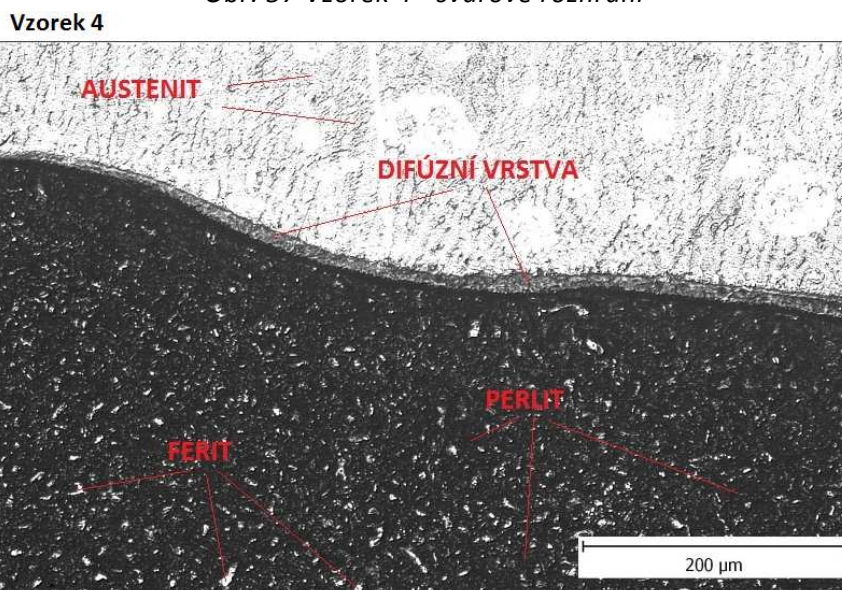
Mikrostruktura materiálu umožňuje detailní pozorování svarového rozhraní a struktury kovů. Pro její realizaci byly ze zkušebních návarů č. 4, 5, 11, 12 a 13 (dle tab. 3) připraveny speciální vzorky. Zkoumaný povrch musí být vybroušený na metalografických papírech a vyleštěný. Náročnost výbrusu závisí na velikosti broušené plochy, přiměřená velikost je kolem 1 až 2 cm², v závislosti na účelu pozorování.

Před broušením je nutné vybrané vzorky zalít do pryskyřice. Zalévání se provádí ve válcové pružné formě, po vytvrnutí pryskyřice se vzorky dají lépe vyjmout. Oválná hmota kolem vzorku napomáhá udržet rovinu brusu a nedochází k nechtěnému poškození metalografického papíru o ostré hrany kovu. Metalografické brusné papíry mají podobu kulatých kovových disků. Broušící zařízení se skládá ze dvou rotačních unášeců s magnetickým povrchem, poháněných elektromotorem. Na povrch metalografického papíru je přiváděna čistá voda, která odnáší zbroušené částice kovu a ochlazuje vzorek. Proces broušení začíná na hrubším disku zrnitosti 180 a postupně se přechází na jemnější. Mezi každým přechodem se vzorek opláchne vodou a zbaví abrazivních nečistot v ultrazvukové vaně, aby nebyl poškozen následující jemnější brusný disk. Při dosažení určitého stupně vybroušení, může začít proces leštění. Pozorování mikrostruktury probíhá při 50 ti násobném zvětšení a více, povrch vzorku proto musí být dokonale rovný a vyleštěný. Pro pozorování mikrostruktury je nutné vyleštěný povrch naleptat. Zvýrazní se jednotlivé fáze struktury, protože dojde k naleptání hranice zrn a tepelně ovlivněné

oblasti. Podle druhu spojovaných kovů se namíchá vhodné leptadlo. Příprava leptadel je složitý proces, který vyžaduje zkušenosti a znalosti příslušných chemikálií, z nichž podstatná část jsou jedy. Použitelnost roztoku je obvykle časově omezena a po určité době ztrácí požadované vlastnosti. Řešením je příprava základního roztoku, který lze uschovat na delší dobu a v okamžiku potřeby z něj domíchat požadované leptadlo. Pro zkoumané vzorky bylo namícháno leptadlo Beraha, jehož základem je kyselina amidosulfonová. Doba použitelnosti je přibližně jedna hodina. Protože leptadlo obsahuje i hydrogendifluorid amonný, který rozpouští sklo, je nutné používat nádoby a pomůcky z plastu. Vzorky se leptají za mokra, ihned po finálním doleštění. Vkládají se do leptadla leštěnou plochou nahoru. Vzorkem je nutné pohybovat a sledovat postupné zabarvení leptané plochy. Optimální bývá převážně namodralé zbarvení. Bezprostředně po vyjmutí z leptadla, musí být vzorek opláchnut vodou a ihned osušen, např. horkým vzduchem. Vyleštěný a naleptaný povrch je citlivý na vzdušnou vlhkost, která způsobuje povrchovou korozi. Pozorování mikrostruktury proto následuje hned po ukončení procesu leptání. Zařízení se skládá z mikroskopu s velkým zvětšením, vybaveného digitální kamerou pro pořízení fotografií. Vše je propojeno s počítačem. Snímek se zaostřuje mechanicky na mikroskopu. Nastavení expozice, snímání fotografie a jejich úprava probíhá v počítačovém programu.

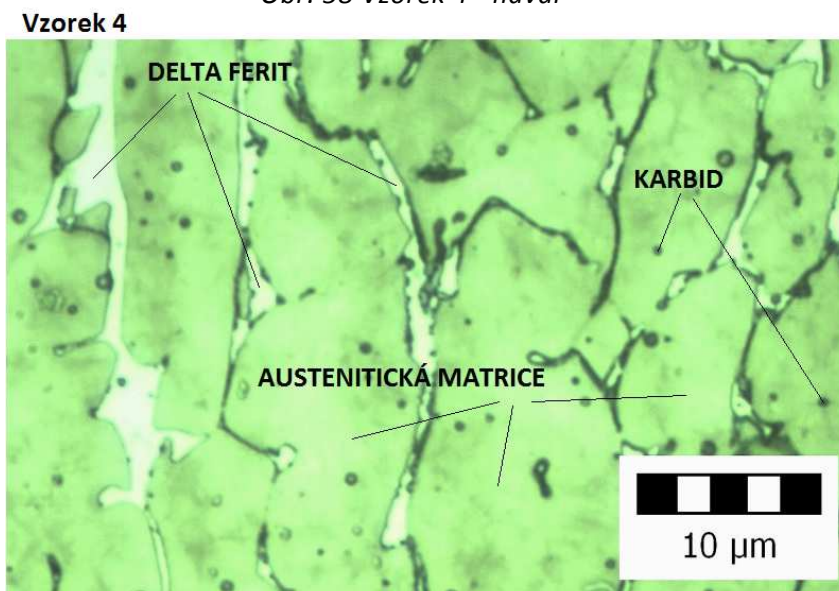
Pro mikroskopii byly vybrány tři vzorky návarů stejných materiálových kombinací, zhotovené rozdílnými technologiemi. Vzorek 4 je návar obalenou elektrodou. Na snímku svarového rozhraní (obr. 57) je dobře patrná difúzní vrstva, mezi základním materiálem a návarem, ve které došlo k promísení kovů. Difúze vzniká za působení tepla, tlaku nebo obojího najednou. Při difúzi dochází k částečné vzájemné výměně atomů kovů.

Obr. 57 Vzorek 4 - svarové rozhraní



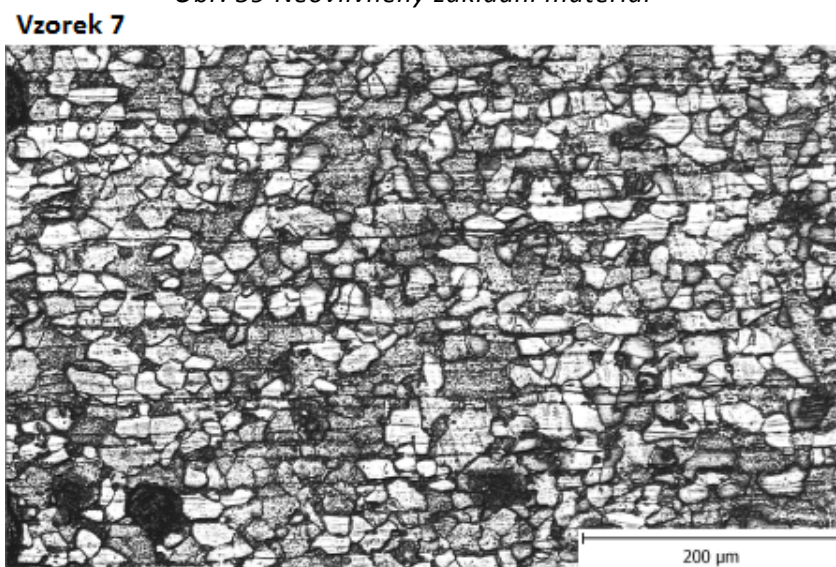
Snímek návaru (obr. 58) byl pořízen při 1000 násobném zvětšení, proto je dobře viditelná austenitická matrice, která zabírá většinu zelené plochy. Při tuhnutí feritických ocelí s obsahem uhlíku do 0,05%, se vylučuje z taveniny delta ferit, který při dalším ochlazení netransformuje a zůstává v matrici i za normálních teplot. Na snímku zaujímá bílá místa.

Obr. 58 Vzorek 4 - návar



Vzorek 7 je návar metodou TIG. Byly pořízeny tři snímky, na kterých je zachycena postupná změna struktury. Na obr. 59 je tepelně neovlivněný základní materiál s feriticko-perlitickou strukturou.

Obr. 59 Neovlivněný základní materiál

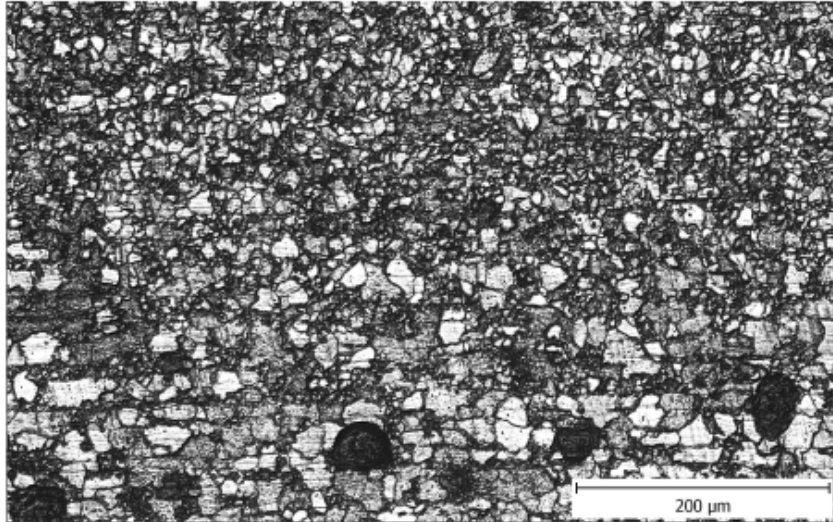


Tepelně ovlivněná oblast (obr. 60) začíná v místě, kde je patrné rovnoměrné zjemnění zrna, způsobené zvýšením teploty pod hranici tavení. Velikost tepelně ovlivněné oblasti závisí kromě použité technologie a zručnosti svářeče také na tloušťce základního

materiálu. Tlustý základní materiál je schopen efektivněji odvádět teplo ze svarové zóny a tepelně ovlivněná oblast je tenčí.

Obr. 60 Začátek tepelně ovlivněné oblasti

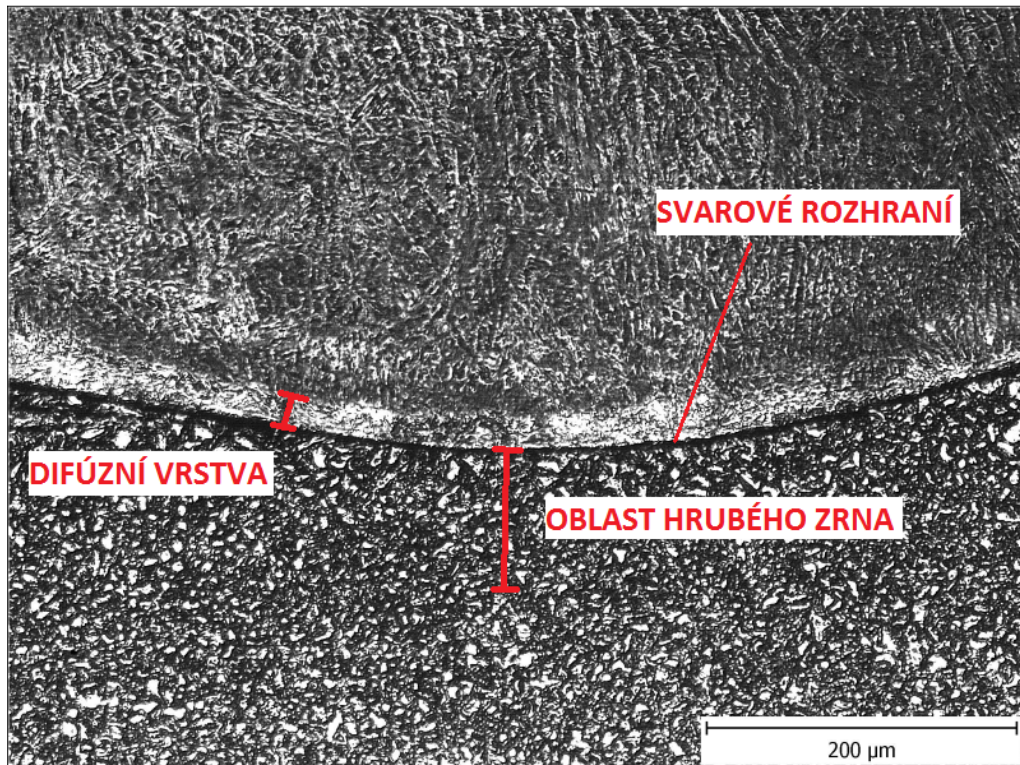
Vzorek 7



Kolem svarového rozhraní (obr. 61) byl kov roztaven. Ochlazením (při běžné teplotě okolí) ztrácí kov plastické vlastnosti a dochází k zhrubnutí zrna. Tomuto jevu nelze zabránit, je však možné jej zmírnit, např. dohříváním okolí svaru, které ochlazení zpomalí.

Obr. 61 Svarové rozhraní

Vzorek 7

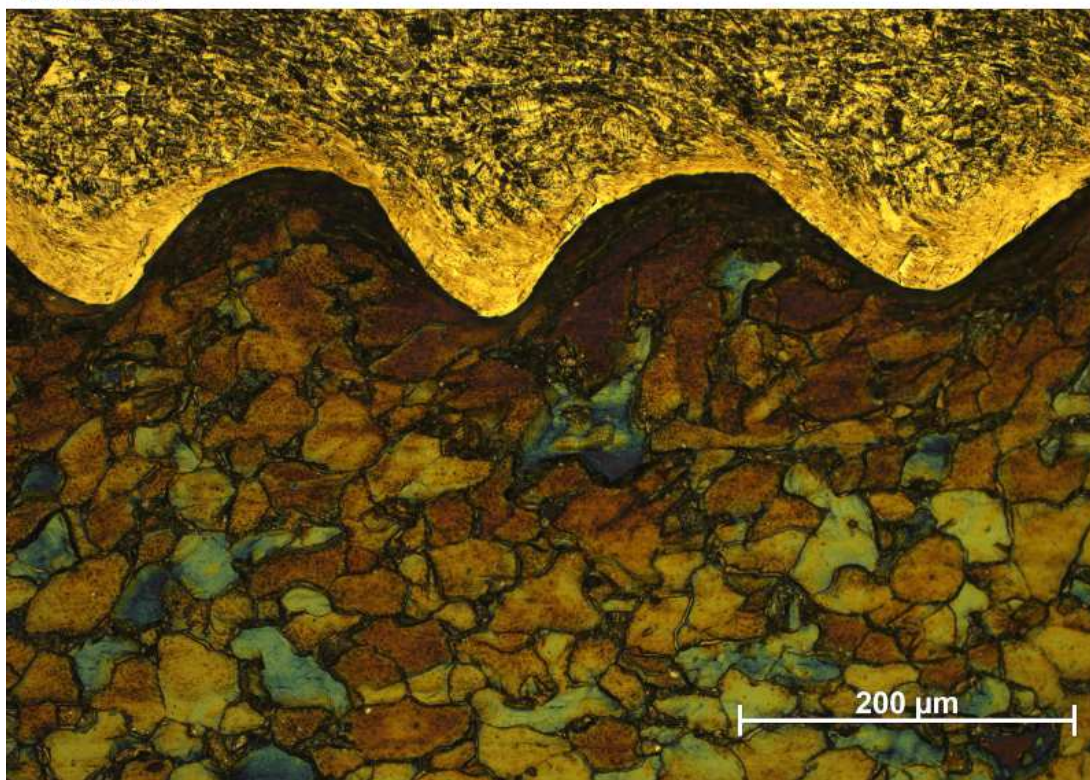


Uvedené vzorky tavných návarů vykazují podobné vlastnosti. Přestože se jedná o rozdílné metody. Změna struktury je vždy způsobena tavením kovu v místě svaru a zvýšením teploty v oblasti rozhraní. Intenzita ohřátí ovlivňuje vznik vnitřních pnutí. U tlustých materiálů je rychlost ochlazování výrazně větší na povrchu, než uvnitř. Pokud není pnutí kompenzováno plastickou deformací, může dojít k trvalé deformaci celého dílu, nebo mohou vznikat trhliny.

Svařováním explozí dochází ke spojení kovů zcela odlišným mechanismem. Jiné je i svarové rozhraní, které není přímé, ale má výrazně vlnitý charakter. Díky tomu je plocha svaru větší. Vlnité rozhraní je typické pro výbuchově svařované kovy, liší se tvarem a velikostí vlnovky, a to v závislosti na svařovacích parametrech. Byly zhotoveny barevné snímky vlnitého rozhraní, na kterých jsou rozdíly dobře viditelné. Na obr. 62 je vlnité rozhraní vzorku 11 a struktura základního a plátovaného kovu. Základním kovem je uhlíková ocel, krycím kovem korozivzdorná ocel.

Obr. 62 Vlnité rozhraní a struktura

Vzorek 11

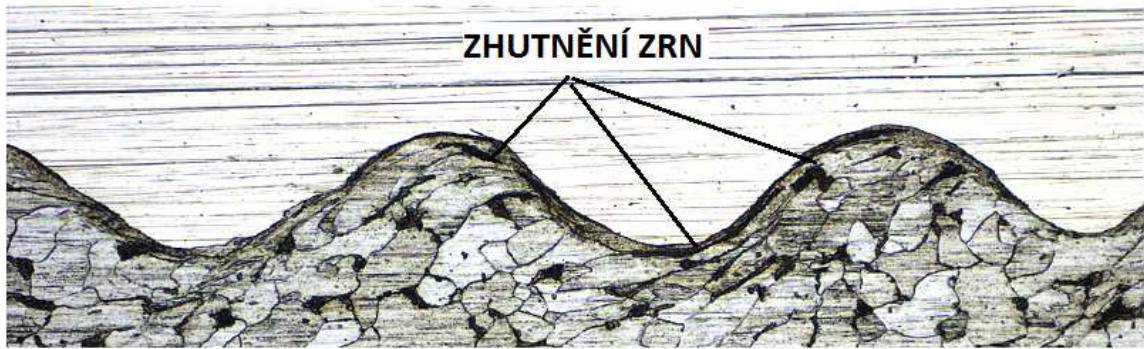


Vlnité rozhraní je pravidelné, vrstva návaru má stejnou strukturu v celé tloušťce. Jednotlivá zrna základního materiálu dobře ohraničují naleptané hranice zrn, struktura základního materiálu je beze změn až ke svarovému rozhraní.

Černobílý snímek (obr. 63) ukazuje detail rozhraní, ve kterém dochází ke zhutnění zrn ve styčné ploše vlnovky. Zhutněná zrna vykazují větší pevnost, než okolní materiál.

Obr. 63 Zhutnění zrn

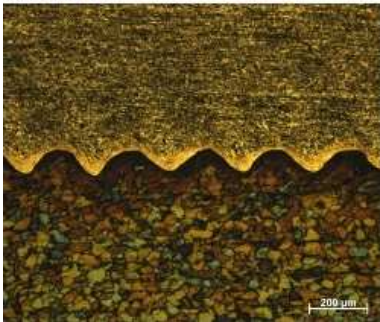
Vzorek 11



Rozdílný tvar a velikost vln ukazují snímky vzorků 11, 12 a 13 na obr. 64. Vlevo uhlíková ocel a korozivzdorná ocel, uprostřed korozivzdorná ocel a měď, vpravo uhlíková ocel a titan.

Obr. 64 Rozdílné velikosti vln

Vzorek 11



Vzorek 12



Vzorek 13



Tvar vlnitého rozhraní vzorků 11 a 13 nasvědčuje vzniku na principu Von Karmanova vírově – klzného mechanismu. Rozhraní vzorku 12 naopak podporuje teorii Kelvin – Helmholtzovy instability, které je charakteristické tvorbou vln v jednom směru rotace. Detailní zobrazení rotace vlny vzorku 12, je na obr. 65.

Obr. 65 Rotace vln v jednom směru

Vzorek 12



6. Ekonomické hledisko svařování explozí

Svařováním explozí se dají efektivně spojovat téměř všechny kovy. Vznikají tak zcela nové materiály výjimečných vlastností. V praktickém využití je však třeba uvažovat realizaci výbuchového svařování nejen z technologického hlediska, ale také ekonomického. Výroba speciálních kombinací kovů má skutečný význam pouze tehdy, pokud bude mít jejich využití ekonomický přínos. Nabízejí se dva hlavní důvody pro volbu technologie výbuchového svařování. Prvním důvodem je přímá úspora nákladů. U korozivzdorných materiálů je ve většině případů využíváno korozní odolnosti pouze na jejich povrchu. Pokud bude např. tlaková nádoba velkých rozměrů vyrobena celá z korozivzdorné oceli, náklady na výrobu budou díky množství použitého materiálu vysoké. Většina materiálu přitom bude mít pouze nosnou funkci a ušlechtilých vlastností kovu bude využito pouze na povrchu pláště. Zde se nabízí plátování tenkého korozivzdorného kovu na tlustou uhlíkovou ocel, která je levnější. Úspora ušlechtilého kovu a tedy i nákladů je zřejmá. Je však nutné dobře spočítat náklady na realizaci výbuchového plátování, aby nepřesáhly hodnotu uspořené ušlechtilého materiálu.

Pro každou materiálovou kombinaci lze spočítat určitou minimální tloušťku bimetalu, nad kterou je jeho výroba a použití ekonomické. U kombinace konstrukční uhlíkové oceli s korozivzdornou ocelí je výhodnější zvolit plátování od celkové tloušťky bimetalu 50 až 80 mm. Pro kombinaci konstrukční uhlíkové oceli a titanu je tloušťka, při které bude výhodnější výbuchově plátovat, ještě menší. V porovnání nákladů na výrobu např. reaktorové nádoby o průměru 2 m a tloušťce stěny 3 mm, vychází výhodněji použít homogenní titan. Náklady na výbuchově zhotovený bimetal podobných vlastností, budou přibližně o 50 % vyšší. Ovšem při tloušťce stěny 15 mm budou již náklady nižší o 30 % oproti výrobě z homogenního titanu. Největší úspora nákladů, kolem 75 % bude při tloušťce stěny 50 mm. V tomto případě je mnohem výhodnější vyrobit plášť reaktoru z výbuchově svařené bimetalu [Crossland, 1982].

Druhým důvodem pro volbu svařování explozí, jsou výjimečné vlastnosti materiálových kombinací, které lze jen obtížně svařit jinými metodami. Úspora nákladů zde nehraje takovou roli, hlavním ekonomickým přínosem, je užitek pro danou aplikaci (odvětví) a určitá nezastupitelnost. Příkladem může být jaderná energetika, kde jsou využívány speciální kombinace kovů, např. zirkonia a jeho slitin, berylia, korozivzdorných ocelí s extrémně nízkým obsahem uhlíku apod. Výbuchově svařený spoj vyhovuje vysokým nárokům a vykazuje dlouhodobou spolehlivost i za vysokých teplot.

7. Závěr

Svařování explozí je zcela unikátní metoda spojování kovů, kde je využíváno energie expanze zplodin, uvolněných při detonaci trhaviny. Řadí se do kategorie tlakového svařování. Dají se spojovat kovy nejrůznějších kombinací a tloušťek. Největší uplatnění nachází metoda v oblasti plátování kovů, vznikají tak velkoplošné bimetaly pro chemický, nebo jaderný průmysl. Hlavní výhoda spočívá v mechanismu vzniku spoje mezi kovy. Nedochází k tepelnému ovlivnění, protože svar nevzniká tavením kovů, ale působením značných tlaků a plastické deformace za studena. Výsledný spoj je zcela homogenní a to i při následném mechanickém, či tepelném zpracování. Existence této metody je však v praxi dosud relativně málo známa, což může souviset s úzkou specializací a omezenou dostupností zdrojů, které se problematikou zabývají. V diplomové práci je proto metoda podrobně popsána a doplněna autentickými fotografiemi z procesu přípravy zkušební vzorku.

Dalším cílem bylo porovnání s klasickými, běžně používanými svařovacími metodami. Za tímto účelem byly zhotoveny výbuchově plátované vzorky a zkušební návary ručními a poloautomatickými tavnými metodami. Rozdíly návarů zhotovených jednotlivými metodami jsou patrné již při vizuální kontrole pouhým okem, bez použití optických zvětšovacích zařízení. Amatérské ruční návary vykazují necelistvost navařené vrstvy, návaznost svarových housenek je nerovnoměrná a na hranách jsou patrné hluboké závary do základního materiálu. Profesionální návary, zejména jsou-li zhotovené strojní metodou, jsou celistvé a svarová housenka pravidelná.

Poloautomatické návary vykazují strojovou přesnost a tomu také odpovídá jejich kvalita. Tepelně ovlivněná oblast je tenčí než u ručních návarů, svarové housenky zcela rovnoměrné a propojené. Při svařování explozí je krycí kov v celé ploše přivařen na základový kov. Povrch je zcela homogenní a hladký. Zásadní rozdíl mezi technologiemi spočívá již v průběhu procesu. Tavný svar (návar), ruční nebo strojní, vzniká průběžně. Parametry svařování se dají přizpůsobovat, je možné operaci přerušit, provést potřebné úpravy a pokračovat. Úspěch svařování explozí zcela závisí na bezchybné přípravě. Samotné svaření trvá jen několik mikrosekund. Není možné jej přerušit, nebo ovlivnit, což může být jedna z mála nevýhod. Procento neúspěchu je však velmi malé.

Makroskopická kontrola svarového rozhraní ručních návarů potvrdila rozsáhlou tepelně ovlivněnou oblast, vzájemné převýšení svarových housenek a hloubka závaru svědčí o kolísavosti procesu, zejména u amatérských návarů. V několika místech se vyskytují póry, vzniklé přehřátím svarové lázně. Kvalita návaru závisí na zručnosti a zkušenostech

svářeče. Poloautomatické návary jsou rovnoměrné, v řezu je dobře viditelný pravidelný závar do základového kovu, jehož hloubka je podstatně menší než u svařování ručního. Rovněž tepelně ovlivněná oblast nedosahuje takové tloušťky. Obzvláště šetrné je elektrovibrační navařování, které nejméně ovlivňuje základní materiál. Snímky řezu výbuchově svařených kovů potvrdily pravidelné vlnité rozhraní. Není patrná žádná tepelně ovlivněná oblast, spoj je celistvý v celém průřezu. Ještě podrobnější výsledky přinesla mikroskopická kontrola, které byly podrobeny vzorky profesionálních návarů obalenou elektrodou a metodou TIG a výbuchově svařených bimetalů třech různých kombinací. U tavných návarů dochází ke zjemnění struktury v oblasti svarového rozhraní, v jeho těsné blízkosti se vyskytuje oblast hrubšího zrna, způsobená teplotou nad hranici likvidu a následným rychlým ochlazením. V těsném okolí svarového rozhraní je patrná difúzní vrstva, nezbytná pro vznik kvalitního spoje. V oblasti hrubšího zrna se mění mechanické vlastnosti kovu, který se stává méně plastický, tato oblast by měla být co nejmenší.

Detailní snímky svarového rozhraní tří vzorků svařených explozí, zobrazují nezměněnou strukturu zrna v celé oblasti. Skutečně tedy nedochází k tepelnému ovlivnění materiálu v průběhu procesu a jeho vlastnosti tak zůstávají zachovány. Literatura uvádí možnost zhutnění zrna na hraně vlnovky, což se také podařilo prokázat. V této zhutněné zóně je kov pevnější. Vlnité rozhraní vzniká několika mechanismy, které se odlišují tvarem a velikostí. Klíčovými faktory jsou tloušťka krycí desky, druh kovu a detonační rychlost. Vzájemné závislosti těchto parametrů byly prokázány na všech třech snímkách.

Každá technologie svařování má své výhody a nevýhody, které do jisté míry předurčují oblasti jejich uplatnění. Nejrozšířenější jsou tavná svařování pro své všestranné využití, dobrou výkonnost a dostupnost. Dají se dobře automatizovat a robotizovat. Pro složité konstrukční svary, v opravárenství a stavebnictví jsou tavné metody svařování stále nezastupitelné. V oblasti plátování, zejména obtížně svařitelných kovů, je významné svařování explozí. Největší výhodou je téměř libovolná kombinace spojovaných kovů, neomezená tloušťka základové desky, nedochází ke změně mechanických vlastností a výsledný bimetal lze tepelně zpracovávat, ohýbat i válcovat. Od určitých rozměrů je svařování explozí ekonomicky výhodnější, než tavné metody. Nevýhodou je náročnost přípravy, manipulace s výbušninami a akustický účinek procesu.

Použité zdroje:

BERNASOVÁ, Eva et. al. *Svařování*. 1. vydání - dotisk. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988. 200 s. ISBN neuvedeno

Crossland, B.: *Explosive Welding of Metals and its Application*. Oxford: Clarendon Press, 1982. ISBN 0-19-859-119-5.

HOLÝ, Ondřej. *Svařování výbuchem* (Bakalářská práce). Praha: TF ČZU 2011

HRIVŇÁK, Ivan. *Teória zvariteľnosti kovov a zliatin*. 1. vydání. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, 1989. 344 s. ISBN 80-224-0016-5

CHLÁDEK, Lubomír – NĚMEČEK, Josef – VACEK, Jan. *Výbuchové svařování kovů a příbuzné procesy*. 1. vydání. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1979. 224 s. ISBN neuvedeno

CHLÁDEK, Lubomír – NĚMEČEK, Josef – VACEK, Jan. *Výbuchové svařování a plátování kovů*. První vydání. Pardubice: Výzkumný ústav průmyslové chemie, 1973. 132 s. Evid. tisk. číslo: 60/788/73. ISBN neuvedeno.

ITOH, Sanae. - HOKAMOTO, Kazuyuki. *Explosion, Shock Wave and Hypervelocity Phenomena in Materials II*. Trans Tech Publications Ltd., Switzerland 2007, ISBN: 0-87849-465-0

KOVAŘÍK, Rudolf – ČERNÝ, František. *Technologie svařování*. 1. vydání - dotisk. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2008. 198 s. ISBN 978-80-7082-697-3

KUNCIPÁL, Josef et. al. *Teorie svařování*. 1. vydání. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1986. 272 s. ISBN neuvedeno

KUNCIPÁL, Josef – PILOUS, Václav – DUNOVSKÝ, Jiří. *Nové technologie ve svařování*. 1. vydání. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1984. 292 s. ISBN neuvedeno

NESVADBA, Petr. *Výbuchové navařování tenkých kovových vrstev a mezivrstev a příprava trhavin vhodných k těmto účelům*. Univerzita Pardubice, Fakulta chemicko – technologická, Ústav energetických materiálů, 2006, p. 32.

TURŇA, Milan. *Špeciálne metódy zvarania*. 1. vydání. Bratislava: ALFA, vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatury, 1989. 384 s. ISBN 80-05-00097-9

WEMAN, Klas. *Welding processes handbook*. 1. vydání. Cambridge: Woodhead Publishing, 2003. 193 s. ISBN 0-8493-1773-8

KOTORA, Bohumír. Výbuchové svařování vysokým dynamickým tlakem. *Technik*, 10. 11. 2010, 18. ročník, strana 50.

CARTON, Eric. *Wave Forming Mechanisms in Explosive Welding* [online] 2004 [cit. 2013-12-3]. Dostupné z: <http://www.scientific.net>

Explosia, a.s. *Trhaviny* [online] 2003 [cit. 2013-3-10]. Dostupné z: <http://www.explosia.cz/?show=trhaviny#t1>

Havelka, Pavel. *Internetový magazín Automig.cz* [online]. Migatronig.cz a.s.: [cit. 16. 2. 2013]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/obalena-elektroda-mma/>

Seznam obrázků:

OBR. 1 SCHÉMA SVAROVÉHO SPOJE	4
OBR. 2 TUPÝ SVAR	5
OBR. 3 KOUTOVÝ SVAR.....	5
OBR. 4 OCHRANNÁ FUNKCE STRUSKY	9
OBR. 5 OBALENÉ ELEKTRODY	9
OBR. 6 SLOUPOVÝ AUTOMAT ESAB PRO OBVODOVÉ SVARY.....	11
OBR. 7 SCHÉMA ELEKTROSTRUSKOVÉHO SVAŘOVÁNÍ	12
OBR. 8 SCHÉMA METODY MIG, MAG	14
OBR. 9 DETAIL SVARU MIG, MAG	14
OBR. 10 SCHÉMA METODY WIG	15
OBR. 11 SVAR HLINÍKU	15
OBR. 12 OPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ BODOVÉ.....	16
OBR. 13 ODPOROVÉ SVAŘOVÁNÍ ŠVOVÉ	16
OBR. 14 SCHÉMA ROTAČNÍHO SVAŘOVÁNÍ	19
OBR. 15 OHŘÁTÍ V MÍSTĚ TŘENÍ.....	19
OBR. 16 SCHÉMA SVAŘOVÁNÍ TŘENÍM V PLOŠE.....	20
OBR. 17 VZNIK SVARU TŘENÍM	20
OBR. 18 ŠVOVÝ SVAR MĚDĚNÉHO PLECHU	21
OBR. 19 ZAŘÍZENÍ PRO DIFÚZNÍ SVAŘOVÁNÍ	22
OBR. 20 SCHÉMA ROVINNÉHO PLÁTOVÁNÍ	23
OBR. 21 SCHÉMA SESTAVY	28
OBR. 22 TRYSK	29
OBR. 23 VZNIK VLNITÉHO ROZHRANÍ	30

OBR. 24 VLIV ÚHLU DOPADU NA TVORBU VLN.....	31
OBR. 25 KELVIN – HELMHOLTZOVA INSTABILITA	31
OBR. 26 OPLÁŠŤOVÁNÍ A VÝSTELKOVÁNÍ	32
OBR. 27 BODOVÝ SVAR.....	33
OBR. 28 LINIOVÝ SVAR.....	33
OBR. 29 VÝBUCHOVÉ SVAŘOVÁNÍ TRUBEK.....	35
OBR. 30 ZAVAŘOVÁNÍ TRUBEK DO TRUBKOVNIC	35
OBR. 31 LINIOVÉ SVARY LEHKÝCH KONSTRUKCÍ	36
OBR. 32 AMATÉRSKÉ NÁVARY.....	40
OBR. 33 NÁVAR NA PLNÝ PROFIL	40
OBR. 34 PROFESIONÁLNÍ NÁVARY	41
OBR. 35 OBOUSTRANNÝ KOUTOVÝ „T“ SVAR	41
OBR. 36 NÁVARY METODOU TIG.....	42
OBR. 37 ELEKTROVIBRAČNÍ NÁVARY VÁLCOVÉ TYČE	43
OBR. 38 OTĚRU VZDORNÉ NÁVARY.....	43
OBR. 39 PŘÍPRAVA SESTAVY	45
OBR. 40 NANÁŠENÍ SYPKÉ TRHAVINY	45
OBR. 41 VÁŽENÍ TRHAVINY.....	46
OBR. 42 UMÍSTĚNÍ SESTAVY NA ODPALIŠTI	46
OBR. 43 SESTAVA PO DETONACI	47
OBR. 44 VÝBUCHOVĚ SVAŘENÝ BIMETAL.....	47
OBR. 45 VZORKY 12 A 13 Z VÝBUCHOVÝCH NÁVARŮ.....	49
OBR. 46 ŘEZ MATERIÁLŮ	50
OBR. 47 ŘEZ VODNÍM PAPEREM	51
OBR. 48 VZORKY PO ROZŘEZÁNÍ A STROJOVÉM VÝBRUSU	51
OBR. 49 SVAŘOVÁNÍ RUČNÍ OBALENOU ELEKTRODOU	52
OBR. 50 OBALENÁ ELEKTRODA.....	53
OBR. 51 KOUTOVÝ „T“ SVAR	53
OBR. 52 METODA TIG	54
OBR. 53 TRUBIČKOVÉ TVRDONÁVARY POLOAUTOMATEM MOG.....	54
OBR. 54 OBVODOVÝ NÁVAR ELEKTROVIBRAČNÍM NAVAŘOVÁNÍM MAG.....	55
OBR. 55 VÝBUCHOVÉ PLÁTOVÁNÍ	56
OBR. 56 VELIKOST VLNITÉHO ROZHRANÍ	57
OBR. 57 VZOREK 4 - SVAROVÉ ROZHRANÍ.....	58
OBR. 58 VZOREK 4 - NÁVAR.....	59
OBR. 59 NEOVLIVNĚNÝ ZÁKLADNÍ MATERIÁL	59
OBR. 60 ZAČÁTEK TEPELNĚ OVLIVNĚNÉ OBLASTI	60
OBR. 61 SVAROVÉ ROZHRANÍ.....	60

OBR. 62 VLNITÉ ROZHRANÍ A STRUKTURA	61
OBR. 63 ZHUTNĚNÍ ZRN.....	62
OBR. 64 ROZDÍLNÉ VELIKOSTI VLN	62
OBR. 65 ROTACE VLN V JEDNOM SMĚRU.....	62

Seznam tabulek:

TAB. 1 ROZMĚRY VÝBUCHOVĚ SVAŘOVANÝCH KOVŮ	44
TAB. 2 PARAMETRY VÝBUCHOVÉHO SVAŘOVÁNÍ	48
TAB. 3 PARAMETRY ZKUŠEBNÍCH NÁVARŮ	49