

Česká zemědělská univerzita v Praze  
Technická fakulta

**Svařování výbuchem**  
Bakalářská práce

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

Vypracoval: Ondřej Holý

PRAHA 2011

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod vedením pana prof. Ing. Milana Brožka CSc. a použil jen parametrů citovaných v příložené bibliografii a poznatků získaných při exkurzi ve společnosti Explosia a.s.

.....  
podpis autora

# Poděkování

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce panu prof. Ing. Milanu Brožkovi CSc. za pomoc, kterou mi poskytl při zpracování této bakalářské práce.

Dále děkuji panu ing. Ladislavu Velehradskému Ph.D., řediteli firmy Explosia a.s. za exkurzi, kterou mi umožnil, zejména pak panu Ing. Petru Nesvadbovi, který mě celou exkurzí provázel a sdělil mi mnoho cenných informací.

# Svařování výbuchem

**Abstrakt:** Tato bakalářská práce se zabývá problematikou výbuchového svařování kovů. V úvodní části popisuje původ a princip samotného procesu. V následujících kapitolách je průběh celého procesu podrobněji popsán. V další části se práce zaměřuje na druhy výbuchového svařování a jejich využití v praxi. Poslední část je věnována konkrétním kombinacím kovů a aplikacím, ve kterých se vyskytují.

**Klíčová slova:** kov, základová deska, krycí deska, trhavina, detonace, svar, bimetal

## Explosive welding

**Summary:** This thesis deals with the explosive welding of metals. The introductory section describes the origins and principles of the process itself. In subsequent chapters, the entire process is described in more detail. In another part of the work focuses on the types of explosive welding, and their use in practice. The last part is devoted to specific combinations of metals and applications in which they occur.

**Key words:** metal base plate, cover plate, explosive, detonation, weld, bi-metal

# Obsah

|  |           |
|--|-----------|
| ÚVOD .....   | 1         |
| <b>1. CÍL A METODIKA PRÁCE .....</b>                   | <b>2</b>  |
| 1.1 CÍL PRÁCE.....                                     | 2         |
| 2.2 METODIKA.....                                      | 2         |
| <b>2. PODSTATA SVAŘOVÁNÍ VÝBUchem.....</b>             | <b>3</b>  |
| 2.1 ZÁKLADNÍ PRINCIP VÝBUCHOVÉHO SPOJE .....           | 3         |
| 2.2 CHOVÁNÍ KOVU PŘI DYNAMICKÉM ZATÍŽENÍ .....         | 3         |
| 2.3 VLNY NAPĚTÍ A KRITICKÁ RYCHLOST ÚDERU .....        | 4         |
| 2.4 VZÁJEMNÉ PŮSOBENÍ VLN NAPĚTÍ .....                 | 4         |
| 2.5 ZÁKLADNÍ USPOŘÁDÁNÍ PŘI VÝBUCHOVÉM SVAŘOVÁNÍ ..... | 5         |
| 2.6 SRÁZ DESEK A VZNIK SVARU .....                     | 6         |
| 2.7 METALURGICKÁ STRÁNKA PROCESU .....                 | 8         |
| <b>3. DRUHY VÝBUCHOVÉHO SVAŘOVÁNÍ .....</b>            | <b>8</b>  |
| 3.1 VÝBUCHOVÉ PLÁTOVÁNÍ ROVINNÝCH PLOCH.....           | 8         |
| 3.2 VÝBUCHOVÉ SVAŘOVÁNÍ NEROVINNÝCH PLOCH .....        | 10        |
| 3.3 BODOVÉ A LINIOVÉ VÝBUCHOVÉ SVAŘOVÁNÍ.....          | 11        |
| 3.4 VADY A JEJICH ODSTRANĚNÍ.....                      | 11        |
| 3.5 KONTROLA VÝBUCHOVÝCH SVARŮ .....                   | 13        |
| 3.6 STŘELIŠTĚ PRO VÝBUCHOVÉ SVAŘOVÁNÍ .....            | 16        |
| <b>4. VÝBUŠINY A JEJICH VLASTNOSTI.....</b>            | <b>16</b> |
| 4.1 ROZDĚLENÍ VÝBUŠIN .....                            | 17        |
| 4.1.1 Střeliviny .....                                 | 17        |
| 4.1.2 Trhaviny .....                                   | 17        |
| 4.1.3 Třaskaviny.....                                  | 18        |
| 4.1.4 Rozněcovadla .....                               | 18        |
| 4.2 TRHAVINY PRO VÝBUCHOVÉ SVAŘOVÁNÍ.....              | 19        |
| <b>5. VÝHODY A NEVÝHODY VÝBUCHOVÉHO SVAŘOVÁNÍ.....</b> | <b>20</b> |
| 5.1 VÝHODY .....                                       | 20        |
| 5.2 NEVÝHODY .....                                     | 21        |
| <b>6. VLASTNOSTI SPOJOVANÝCH KOVŮ .....</b>            | <b>21</b> |
| 6.1 OCEL PLÁTOVANÁ KOROZIVZDORNÝMI KOVY .....          | 21        |
| 6.1.1 Konstrukční ocel a korozivzdorná ocel .....      | 21        |
| 6.1.2 Konstrukční ocel – měď a slitiny.....            | 22        |
| 6.1.3 Konstrukční ocel a titan .....                   | 22        |
| 6.1.4 Konstrukční ocel a hliník .....                  | 23        |
| 6.1.5 Speciální kombinace kovů.....                    | 24        |
| 6.2 OTĚRUVZDORNÉ A RYCHLOŘEZNÉ OCELI.....              | 24        |
| 6.3 OSTATNÍ MATERIÁLY .....                            | 25        |
| <b>7. UPLATNĚNÍ VÝBUCHOVÉHO SVAŘOVÁNÍ V PRAXI.....</b> | <b>25</b> |
| 7.1 SVARY ROVINNÝCH PLOCH .....                        | 26        |
| 7.2 SVARY VÁLCOVÝCH PLOCH .....                        | 27        |
| 7.3 BODOVÉ A LINIOVÉ VÝBUCHOVÉ SVAŘOVÁNÍ.....          | 29        |
| <b>8. ZÁVĚR.....</b>                                   | <b>30</b> |
| <b>9. POUŽITÁ LITERATURA .....</b>                     | <b>31</b> |

## Úvod

Energie výbušin se dříve užívalo převážně k destruktivním účelům. K získávání nerostných zdrojů, ve stavebnictví a v hojné míře ve vojenském průmyslu. V posledních desetiletích našlo využití energie výbuchu své uplatnění v hutnickém a strojírenském průmyslu. Umožňuje spojování a tváření kovových materiálů, které by bylo podle dosavadních konvenčních postupů takřka nemožné provést, nebo jen velmi obtížně a v omezené míře. Velkým přínosem je využití energie výbušin při svařování kovů. Výbuchové svařování umožňuje vytvářet pevné spoje mezi stejnými kovy, ale i mezi kovy libovolné tloušťky s velmi odlišnými chemicko fyzikálními vlastnostmi, jakožto i rozdílnou hustotou, teplotou tání i jinou krystalografickou mřížkou. Lze jím omezit nedostatky, ke kterým dochází v důsledku vysokých teplot při tavném svařování jako, je tvorba intermetalických křehkých fází a zhoršení korozní odolnosti.

Výbuchové svařování se nejvíce uplatňuje ve své velkoplošné variantě, kterou je výbuchové plátování. Touto metodou vznikají například bimetalové plechy nejrůznějších materiálových kombinací o plošných rozměrech až několik desítek m<sup>2</sup>. Vynikají přesnou tloušťkou ušlechtilé krycí vrstvy navařené na téměř neomezeně tlustém základním kovu. Takto vyrobené bimetaly nahrazují ve velké míře trubkovnice a pláště tlakových nádob, vyráběné z masivního ušlechtilého kovu a tím přinášejí jeho velkou materiálovou a finanční úsporu. Výbuchové svařování otevírá cestu novým možnostem zpracování, zvýšení kvality daných procesů, úsporu materiálu a významné snížení nákladů. [1, 3]

# **1. Cíl a metodika práce**

## **1.1 Cíl práce**

Cílem práce je objasnění podstaty, základních principů a postupů výbuchového svařování kovů. Podmínky za jakých můžeme tento druh svařování uskutečnit, chování kovů v průběhu vzniku spoje. Budou popsány základní druhy výbuchových svarů a jejich specifikace. Dále budou uvedeny druhy výbušnin, jejich vlastnosti a stručné charakteristiky. Které výbušiny se hodí pro výbuchové svařování, které nikoliv. Metody zjišťování kvality svarového spoje, vady vzniklých spojů a jejich odstranění. Kde je možné výbuchové svařování provádět, jeho výhody a nevýhody.

V jakých odvětvích se uplatňuje, konkrétní příklady použití a porovnání s konvenčními svářecími postupy a jeho přínos v praxi. Práce zmiňuje nejčastěji užívané kombinace kovů a v jakých konkrétních aplikacích se užívají.

## **2.2 Metodika**

Informace použité pro psaní této bakalářské práce byly získány z tištěné odborné literatury zabývající se touto problematikou. Zobrazovaná schémata vytvořil autor práce dle schémat zobrazených v odborné literatuře. V práci jsou použity fotografie pořízené autorem při návštěvě firmy Explosia a.s. a jsou použity s jejím souhlasem. Při zmíněné návštěvě byly získány některé další poznatky k řešené problematice, které byly při psaní práce také využity.

## **2.Podstata svařování výbuchem**

Podstata výbuchového svařování spočívá v působení energie výbuchu trhaviny na navařovaný kov, který leží v určité vzdálenosti od základového kovu. Trhavina spočívá na kovu, který budeme urychlovat. Při výbuchu je navařovaný kov vlivem expanze zplodin výbuchu vržen značnou silou a rychlostí na základový kov tak, že vejdou v činnost meziatomové vazebné síly. Celý proces trvá v řádu mikrosekund. Na úspěch svářecí operace má vliv velké množství faktorů a zásad, bez jejichž dobrých znalostí je dosažení kvalitního svarového spoje vyloučeno. [1, 4, 7]

### **2.1 Základní princip výbuchového spoje**

Princip výbuchového svařování byl objeven spíše jako náhodný jev při studiu kumulativních náloží za druhé světové války. Byly zjištěny svary jejich kovových kuželkových výstelek, ovšem nebylo tomu věnováno příliš pozornosti. Skutečný objev a následný rozvoj výbuchového svařování nastal až v 50. letech 20. století, kdy docházelo při již užívaném procesu výbuchového tváření k náhodným výskytům spoje mezi tvářeným plechem a lisovnicí. Tehdy ovšem probíhalo svařování podle stejné konfigurace jako tváření a to přenosem energie na kov přes vodní prostředí. Tato technologie se však velmi rychle vyvinula do dnešní podoby, kdy se svařování stává kontaktní operací. [1, 4]

### **2.2 Chování kovu při dynamickém zatížení**

Kov a trhavina jsou v přímém kontaktu. Při detonaci je kov vystaven krátkodobému působení vysokých tlaků vznikajících v detonační vlně. Podobný účinek má i náraz rychle letící desky na nehybný kov, který je doprovázen vlnou napětí se strmým čelem (rázovou vlnou). Její amplituda často převyšuje až pětsetkrát statickou mez kluzu kovu. Doba, za kterou je nezatížený kov uveden do stavu vysokého napětí je mnohdy i jen  $10^{-9}$  s. Maximální tlak působí jen několik mikrosekund a potom rychle klesá. Čelo velmi silné rázové vlny se v kovu šíří rychlostí převyšující rychlost zvuku v kovu, což vyvolává změnu mechanických, fyzikálních a jiných vlastností a může vést i k porušení jeho celistvosti. [1, 4]



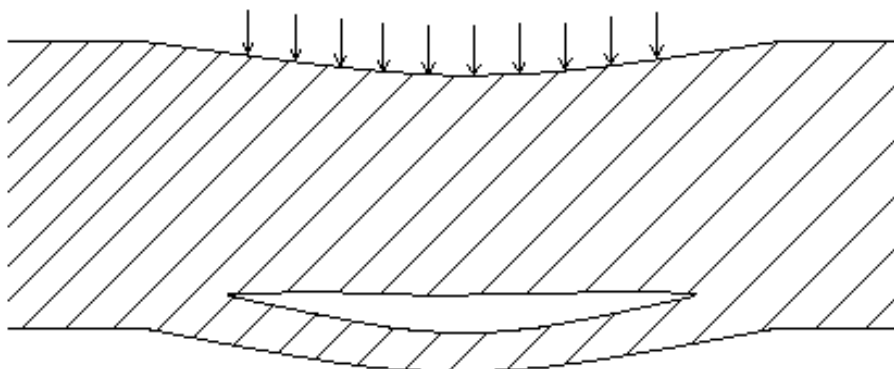
## 2.3 Vlny napětí a kritická rychlost úderu

V podmínkách velmi rychlé deformace, kterou vyvolá rázová vlna, není kov zatěžován stejnoměrně. Zatěžování má vlnový charakter. Vlna napětí postupuje kovem určitou rychlostí, stejně tak postupují určitou rychlostí částice kovu. Je-li amplituda vlny napětí menší, než dynamická mez kluzu, šíří se kovem vlna pružná. Pružné vlny podélné se šíří kovem přibližně rychlostí zvuku v kovu a jsou tahové a tlakové. Pokud dopadne na kov dostatečně silný silový impuls, takže amplituda napětí vlny převyšuje dynamickou mez kluzu, postupuje kovem vlna plastická. Pokud dosáhne úder příliš velké rychlosti, dojde k překročení určité meze pevnosti a při namáhání tahem k porušení soudržnosti materiálu. Odolnost rázovému zatížení se u různých kovů značně liší. Pro příklad u železa je kritická rychlost nárazu  $3,05 \times 10^{-2} \text{ mm}/\mu\text{s}$ , oproti tomu u Hadfieldovy oceli činí hodnota  $25 \times 10^{-2} \text{ mm}/\mu\text{s}$ . [3, 5]

## 2.4 Vzájemné působení vln napětí

Při výbuchovém zpracování kovů musíme respektovat zákonitosti odrazu a interference (vzájemné ovlivňování, prolínání, střetávání, křížení) vln napětí. Obzvláště při odrazu rázové vlny od volného povrchu kovu, nebo při střetu odražených tahových vln v rohu atd. Při odrazu rázové vlny se šíří zpět od volného povrchu vlna tahová, interferující s doznívající přetlakovou fází původní rázové vlny. Pokud tahové napětí vzniklé touto tahovou vlnou překročí dynamickou mez pevnosti v tahu, vznikne výtrž obr. 1. Podobná situace může nastat v rohu desky, kde střet dvou tahových vln vytvoří trhlinu. [3, 5]

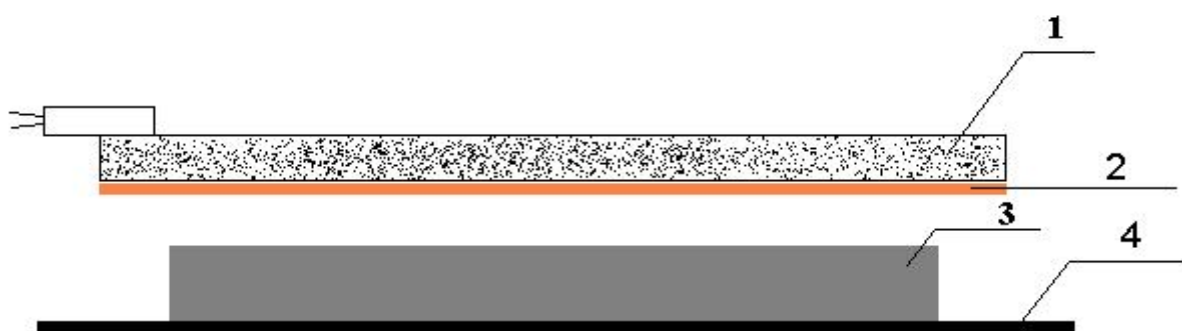
Obr. 1 Výtrž



## 2.5 Základní uspořádání při výbuchovém svařování

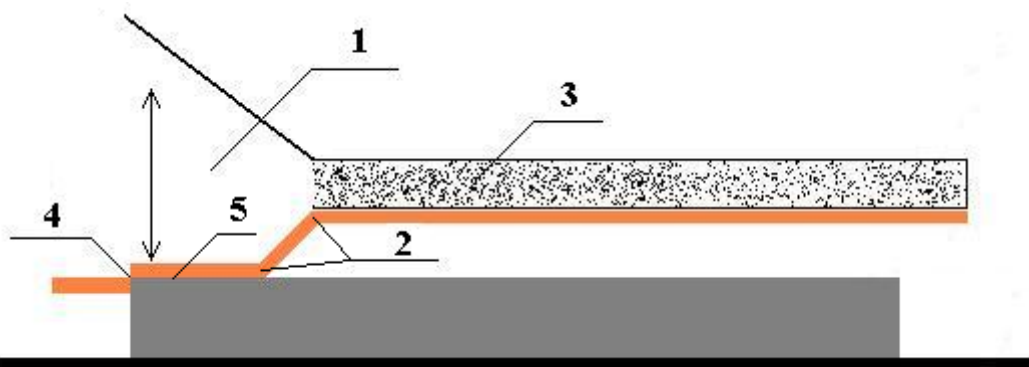
Uspořádání je patrné na obr. 2. Na pevném podkladu (4) je umístěna deska základního kovu (3), jehož povrch bude pokryt vrstvou krycího kovu. Deska z krycího kovu (2) je umístěna v určité vzdálenosti od základní desky. Nejčastěji se užívá rovnoběžné uložení desek (paralelní uspořádání). Za určitých podmínek je možné i uspořádání pod úhlem. Na krycím kovu je umístěna vrstva trhaviny (1), která je iniciována ze strany, aby detonace urychlila plátovaný kov postupně v celé délce, od jednoho kraje ke druhému. [3, 5, 8]

Obr. 2 Základní uspořádání při výbuchovém svařování



Při detonaci se plátovaná deska odklání od původního směru a je urychlena tlakem detonačních zplodin na potřebnou rychlost. Plátující kov dopadá na základní desku pod dynamickým úhlem. Místo srážu urychlované a základové desky se pohybuje detonační rychlostí trhaviny. Na obr. 3 je znázorněn průběh urychlení krycího plechu a jeho rychlý ohyb a opětovné narovnění (2), podobný zvlnění. Oblast postupující detonace, kde tlak unikajících zplodin (1) naráží na okolní vzduch a urychlovaný kov. Dosud nezreagovaná trhavina (3), místo, kde obvykle dochází k odštíření přesahů plátovaného kovu o hranu základového kovu (4) a již navařený vrchní kov (5), kde došlo vlivem značných tlaků a plastické deformace ke spojení meziatomových vazeb. [3, 5, 8]

Obr. 3 Průběh urychlení krycího kovu

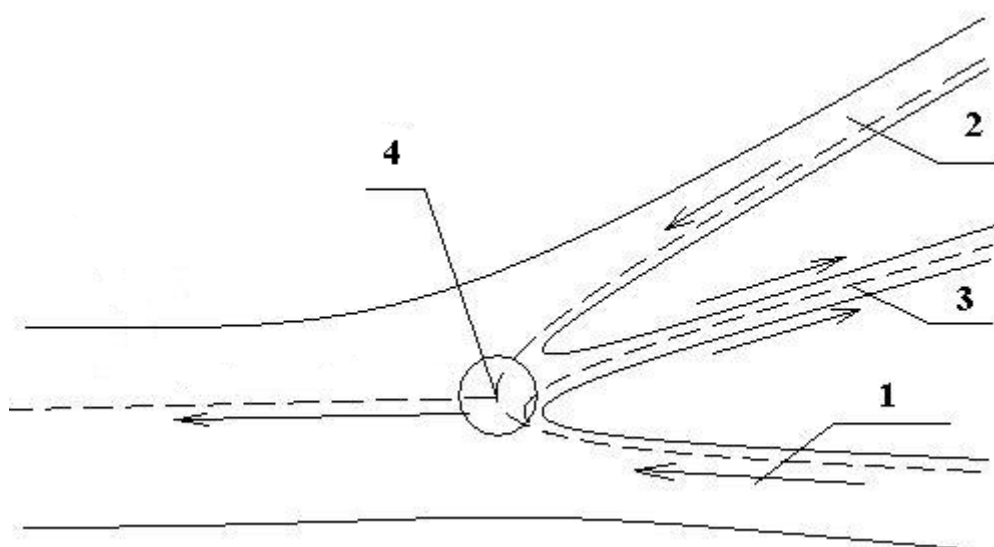


## 2.6 Sráz desek a vznik svaru

Sráz desek může probíhat podzvukovou, nebo nadzvukovou rychlostí. Je tím myšlena rychlost, kterou se pohybuje zvuk ve svařovaných kovech. Limitní hranicí je nižší rychlost jednoho z kovů. Při nadzvukovém urychlení se posun místa srážu pohybuje vysokou rychlostí, při které vznikají příliš silné rázové vlny. Jakmile jejich čela dorazí na opačné povrchy desek, začnou se zpět šířit vlny expanzní, které způsobí odtržení vnitřních povrchů od sebe a ke svaru tak nemůže dojít. Zároveň dojde vlivem obrovské rychlosti a tlaku mezi deskami ke značnému ohřevu vytlačovaného vzduchu a k natavení povrchu jedné, nebo obou desek. Už tento samotný fakt vylučuje vznik spoje, protože k natavení materiálu dojít nesmí. Spoj vznikne pouze na základě kontaktu kovově čistých, tepelně neovlivněných povrchů.

Při podzvukovém srážu, pro většinu kovů rychlost detonace do 4000 m/s, nepůsobí nežádoucí rázové vlny v jeho místě a nedosahují takové síly, aby ohrozily vznik spoje. Za působení vysokých tlaků dochází k intenzivní plastické deformaci na sebe dopadajících povrchů. Důležitý je dostatečně vysoký dynamický úhel v místě dopadu desek. Kovy se za těchto podmínek chovají podobně jako kapalina a při jejich srážu vzniká tzv. trysk obr. 4. Materiál plátující desky (2) a základové desky (1) přitéká do místa srážu (4), spojí se do proudu částic a směřuje dopředu před místem spoje v podobě trysku (3). [3, 5]

Obr. 4 Trysk



Rychlost trysku v běžném prostředí, myšleno ve vzduchu je zhruba 1,5 násobek detonační rychlosti. Ta umožňuje i přes jeho nízkou hmotnost odnášet z povrchů plátovaných kovů oxidy a jiné drobné nečistoty, které se neodstranily při mechanickém a chemickém čištění materiálu v přípravě. Díky tomu na sebe dopadají dokonale kovově čisté povrchy a dojde ke kvalitnímu vlnitému spoji obr. 5.

*Obr. 5 Vlnitý spoj*



Vlnitý spoj charakterizuje vzájemné přetékání obou kovů. Materiál základní desky je vytlačován do tvaru valu před bodem srázu. Když je trysk valem zcela zablokován, přenesse se místo srázu na vrchol valu. Vytvořený převis je obrovským tlakem zmáčknut a vzniká opět trysk. Bod srázu se přenesse na dno vlny, vytvoří se nový val a celý proces se opakuje. V důsledku toho se zvětší styčná plocha obou kovů a roztrhají se zbytky oxidačních povlaků, které nestihl odnést trysk. Aby mohlo dojít ke vzniku svaru, musí být dodrženy určité základní podmínky. Spojované kovy musí být dostatečně houževnaté a schopné alespoň minimální tažnosti. Urychlovaná deska je vystavena dvěma rychlým, po sobě následujícím ohybům. První při urychlení a druhý při srázu. V případě její nízké tažnosti by mohlo dojít ke vzniku trhlin v důsledku periodické deformace. Tlak vyvolaný nárazem plátující desky musí překonat dynamickou mez kluzu materiálu desky základní. Rychlost detonace, jak již bylo zmíněno, nesmí překročit rychlost zvuku v ani jednom z kovů. [3, 5]

## **2.7 Metalurgická stránka procesu**

Vznik kvalitního spoje z metalurgického pohledu vyžaduje od svařovaných kovů schopnost tvořit spolu slitiny, případně sloučeniny. Není přitom podmínkou, aby v sobě byly kovy rozpustné. Například olovo, které netvoří tuhý roztok s mědí nebo železem, lze přesto na tyto kovy plátovat. Stejně je to u stříbra na ocel, u mědi na molybden atd. Kovy, které spolu tvoří roztoky, můžeme spojovat bez problémů, např. železo a nikl, měď a nikl. Některé kombinace kovů spolu vytváří intermetalické sloučeniny, které mají zpravidla nekovový charakter, jsou značně tvrdé a křehké. Jsou jimi železo a hliník, železo a titan, titan a hliník, měď a titan, železo a molybden. Výbuchové svařování je pro tyto kombinace kovů jediný možný způsob spojení, neboť konvenčním způsobem sváření vznikají vlivem dlouhotrvajícího ohřevu křehké intermetalické fáze. Takto vzniklý svár je nevyhovující. Při svařování výbuchem dochází díky velkým tlakům ke zpevnění kovů, u oceli může dojít i ke zjemnění zrna vlivem rázové vlny. [1, 2]

## **3. Druhy výbuchového svařování**

Výbuchovým svařováním lze vytvářet velkoplošné svary rovinných i válcových ploch, konstrukční svary liniové (švové) a bodové.

### **3.1 Výbuchové plátování rovinných ploch**

Plátováním se vytvářejí především bimetaly větších plošných rozměrů. Užívá se pouze paralelní uspořádání jak je patrné z obr. 2. To zaručuje vyrovnaný průběh celého procesu a nejsou omezeny rozměry soustavy. Distanční spára mezi deskami je tak velká, aby na této dráze dosáhl urychlovaný plech požadované rychlosti nutné ke spojení, ne však zbytečně větší, aby nebylo mezi pláty příliš vzduchu. Zpravidla to bývá dvojnásobek síly urychlovaného plátu, avšak vždy záleží na konkrétní kombinaci kovů a jejich tloušťkách. Povrch základní desky je rovinný, většinou třískově opracovaný. Deska může být umístěna přímo na pevnou zem, nebo na masivní kovadlinu, např. ocelovou desku. Jak bude základní deska uložena závisí na její tloušťce a na tloušťce plátující desky. Pokud je tenká základní deska uložena pouze na pevnou zem, dojde při detonaci k její deformaci do vypouklého miskovitěho tvaru, který by se obtížně rovnal. Proto se ukládají na masivní kovadliny, které zabrání jejich promáčknutí, dojde pouze k prohnutí do oblouku, které je snadněji vyrovnatelné. Nutnost uložení tenké základní desky na pevnou kovadlinu platí i při

navarování tlustého vrchního plátu. Účinek energie trhaviny by byl snížen, protože urychlený plát by uvedl do pohybu i základní desku a mohl by vzniknout nedokonalý spoj. Tlustou základní desku menších rozměrů lze plátovat přímo na tvrdém terénu. Dostatečně tlustá znamená alespoň desetinásobek hmotnosti krycí desky. [1, 2]

Plátovanou desku je třeba na kontaktní straně dobře očistit. Lze to provést kartáčováním, broušením, mořením. Před samotným uspořádáním obě styčné plochy očistíme a odmastíme organickým rozpouštědlem. Plátovaná deska se nad základovou desku umístí pomocí distančních systémů do rovnoběžné polohy. Pokud se krycí plát při svých rozměrech a pod hmotností trhaviny neprohýbá a je dostatečně tuhý, stačí jej podepřít v rozích např. na dřevěné špalíky. Tenké pláty podepřeme rovnoměrně v celé jejich ploše na vhodné distanční opěrky. Těmi mohou být dráty zapuštěné přímo do krycího plechu nejlépe ze stejného materiálu. Další možností je uložení spirálek z tenkého plechu na základní desku a na ně položit krycí plech. Horní plát musí ze všech stran přesahovat přes základní desku minimálně o její tloušťku a ještě velikost rámu. Díky tomu se plát navaří po celé ploše základní desky i přes jeho mírné posunutí při urychlení. Přesahy plátu do tloušťky asi 8 mm (záleží na druhu kovu) jsou ustříženy při srázu o hrany spodní desky. [1, 2]

Pokud je vrchní plát tlustší, nebo z houževnatého materiálu, může způsobit na krajích při snaze o ustřížení značnou deformaci základní desky a tím snížit využitelnou plochu celého bimetalu. V takovém případě pomůže vyfrézování drážky, tedy zeslabení materiálu na spodní ploše kopírující základní desku, kde dojde snáze ke střihu. K výbuchovému plátování se užívají nejčastěji sypké trhavinové směsi, ty budou podrobněji rozebrány v dalších kapitolách. Na horní straně urychlovaného plátu je k tomuto účelu instalován rám, nejčastěji ze dřeva, do kterého se trhavina nasype. Pravítkem je pak uhlazena do roviny přesně podle rámu. Ten musí být k horní desce připevněn, nejčastěji přišroubován vruty, které do něj prochází skrz plech. Iniciace ploché trhavinové nálože musí probíhat od kraje a co nejvíce rovnoměrně v celé šíři. Toho docílíme páskem z plastické brizantní trhaviny (trhaviny s vysokou rychlostí detonace), který vložíme před nasypáním směsi do rámu po celé šíři jedné strany a s přesahem několika desítek mm ven z rámu. Díky jeho velké detonační rychlosti dojde k rychlé iniciaci hlavní trhavinové nálože podél jedné strany nálože. K vyčnívajícímu pásku je pak přichycena rozbuška, kterou na dálku odpálíme elektrickým proudem. Sestava na venkovním střešti položena na zemi obr. 6. Při detonaci na ocelové kováčtině dochází k odmrštění bimetalu do určité vzdálenosti od místa uspořádání. Je nutné s tím z bezpečnostních důvodů počítat.

Nezakrytou plochu kovadliny můžeme chránit před odlétávajícími kousky např. dřevěnou deskou, kartonem, sololitem, pískem. [1, 5]

*Obr. 6 Sestava na venkovním střelišti*



### **3.2 Výbuchové svařování nerovinných ploch**

Jedná se o plochy jednoduchých definovaných tvarů. V podstatě lze plátovat každou obecnou plochu, pokud neobsahuje ostré hrany a její křivost nepřesáhne určitou mez. Výbuchové svařování lze velmi dobře aplikovat v sousém válcovém nebo kuželovém uspořádání. Jedná se např. o výstelkování otvorů, opláštění kruhové tyče nebo trubky. U všech nerovinných ploch prodělává urychlovaný kov nejen ohyb, ale je zároveň v celé ploše roztahován, nebo stlačován. Potřebná rychlost detonace závisí na poměru hmotnosti trhaviny a hmotnosti trubky na jednotku délky ve směru osy. Můžeme navařovat zevnitř trubky (výstelkování), trhavina tvoří výplň trubky. V tom případě dochází k roztažení materiálu v celé ploše. Pokud navařujeme zvenku (opláštění), trhavina tvoří obal, dochází k stlačování. Vzájemné uspořádání je paralelní jako při plátování, musíme však obzvláště dbát na vzájemné přesné sousé ustavení. Nelze korigovat případnou nepravidelnost tvarů změnou distance. Čelo vlny detonace musí být v každém případě kolmé na osu tělesa, tj. detonace v náloži probíhá ve směru povrchu. Takto můžeme plátovat všechny obecné válcové plochy nekruhového průřezu, případně neuzavřené. I zde platí, pokud je stěna plátovaného dílu příliš tenká, je nutné použít kovadlinu. Při výstelkování ve formě objímky, u opláštění v podobě trnu vloženého dovnitř. [1, 7, 6]

### 3.3 Bodové a liniové výbuchové svařování

Bodové a liniové svařování představuje proces, při kterém není svar vytvářen homogenně v celé ploše kovových desek, ale pouze v izolovaných bodech nebo liniích. Princip je totožný jako u plošných svarů. V určitých bodech nebo liniích je krycí plech urychlen detonací přiložených soustředěných náložek. Při srážu krycího kovu se základním materiálem vznikne svarový spoj. Zásadní rozdíl oproti plošnému plátování spočívá ve výrazné nehomogenitě bodového spojení v důsledku měnících se parametrů srážu. Tento jev nastává díky lokálně uložené náložce. Krycí plech je v místě detonace deformován vysokým tlakem unikajících zplodin a vzniká v něm vypuklina, jejíž střed naráží na základní desku při nulovém úhlu srážu. Přímo v tomto středu tedy svár vzniknout nemůže, ale v jeho okolí se šíří soustředné kružnice při vzrůstajícím úhlu srážu a současně s klesající rychlostí, až se v určité vzdálenosti od středu zastaví. V místě, kde začal úhel srážu nabývat nenulových hodnot vzniká svar a končí v místech, kde rychlost detonace klesne pod minimální mez nutnou pro vznik spoje. Takto vzniká spoj proměnlivého charakteru, který má v půdorysu tvar mezikruží při rovnoběžném uspořádání a tvar elipsy v případě úhlového uspořádání. Při bodovém svařování se užívají speciální náložky, které jsou velmi lehké, a proto jich může být současně iniciováno větší množství. Díky tomu lze sestrojít ruční nástroj, do kterého se vloží jednotlivá náložka a můžeme tak zcela bezpečně provést bodový svár. U liniového výbuchového svaru vzniká spoj na stejném principu jako u svaru bodového. Táhlá náložka podobná bleskoviči se zvláštním obalem vytvoří v urychlovaném plechu deformaci tvaru žlábků, po jehož obou stranách dochází ke svaru. Detonační rychlost náložky není limitována rychlostí zvuku kovu, může být i vyšší. V ose náložky ke svaru opět nedojde. Sráž se šíří symetricky, šikmo k ose na obě strany. [1, 3, 7]

### 3.4 Vady a jejich odstranění

Nejčastější vady výbuchově plátovaných bimetalů jsou necelistvosti. Podle velikosti dělíme na vady bodové a plošné. Bodové vady (obvykle ploška do 100 mm<sup>2</sup>) mohou být způsobeny přítomností cizího tělesa v prostoru mezi deskami při plátování, nebo lokální vadou spojovaných povrchů (jamka, vryp). Vyhneme se jim důkladným očištěním styčných ploch v přípravné fázi a kvalitním opracováním desek a jejich důkladným výběrem. Plošné vady mohou vznikat ze stejných důvodů jako vady bodové. Pokud je příčina jejich vzniku jiná, napoví nám to místo výskytu v bimetalu. Pokud je plošná vada u kraje, nechali jsme



příliš malé přesahy navařované desky s trhavinou. Pokud můžeme jednoznačně vyloučit vliv nerovnosti desek, nevhodně jsme řešili umístění distančních opěrek. Větší necelistvost mimo okraje může být způsobena negativním sklonem plátující desky např. vlivem prohnutí v určitém místě až k základní desce. Pak vzniká vada ve formě viditelné vybouleniny. Pokud se vyskytují nepravidelné vady v celé ploše a spojená místa jsou spíše ojedinělá, znamená to buď užití příliš slabé nálože, nebo špatně zvolená distance. Podobné následky má i špatný kontakt tenké základní desky s kovadlinou. [1, 6]

Malá houževnatost použitých materiálů se projeví trhlinami v základní nebo plátující desce. Pokud již nemůžeme zmenšit velikost nálože a použít trhavinu s nižší detonační rychlostí, nejsou použité materiály, nebo jejich konkrétní kombinace vhodné k výbuchovému svařování. Trhliny se mohou u plátující desky vyskytovat, i když použijeme dobře tvárný materiál. Vzniknou při ustavení pod větším úhlem v důsledku přílišného prodloužení v průběhu plátování. Také proto je lepší volit paralelní uspořádání.

Pokud nedojde ke spoji vůbec, znamená to příliš rychlou a silnou, nebo příliš slabou detonaci. Lze to určit podle povrchu nespojených kovů. Pokud je jeden, nebo oba povrchy natavené či jinak deformované, byla detonace příliš silná a rychlá obr. 7. Pokud povrch nejeví žádné známky poškození a plech pouze narazil na základní desku, v krajích se o ní zdeformoval a ke svaru nedošlo, byla detonace pro tuto kombinaci kovů příliš slabá obr. 8.

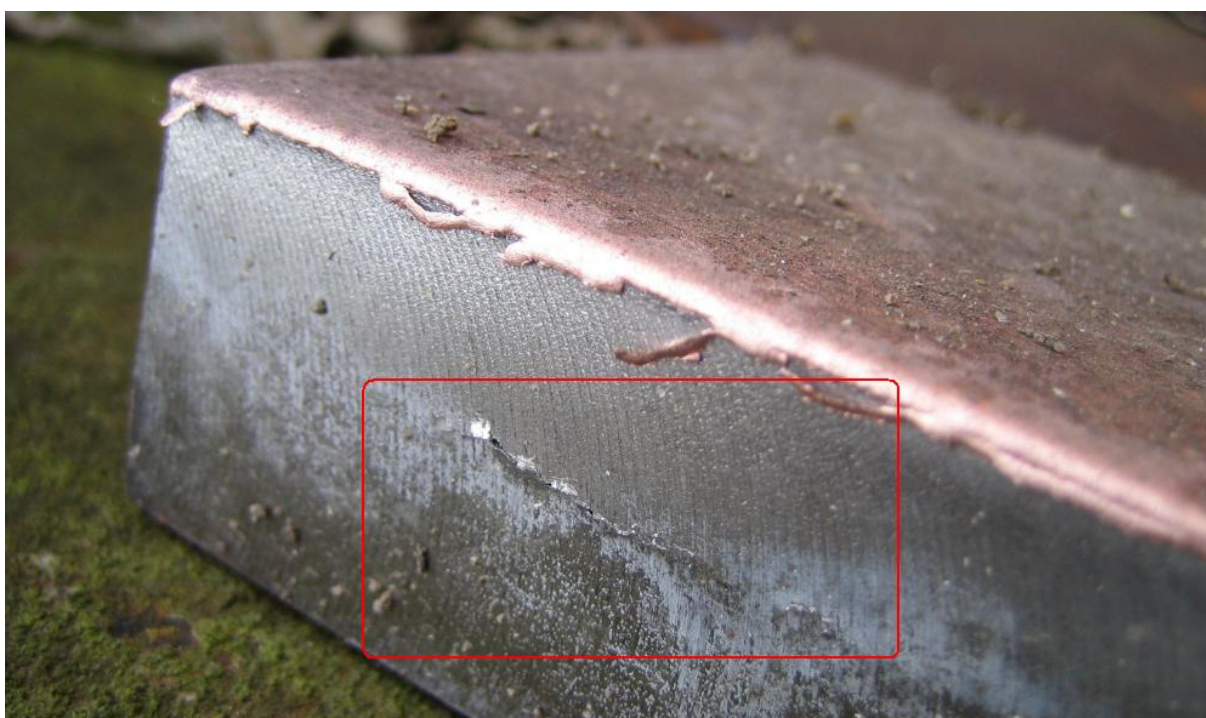
*Obr. 7 Příliš silná a rychlá detonace*

*Obr. 8 Příliš slabá detonace*



Výtrž v základní desce (plošné, nebo na konci) obr. 9 vzniká působením silné tahové vlny. Jsou způsobeny nadměrně silnou náloží a zejména vysokou rychlostí detonace. Vyhneme se jim užitím vhodnější trhaviny a použitím kovadliny. Můžeme také použít pomocnou desku prodlužující vzadu desku základovou a tím zamezit výstupu tlakové vlny ze základní desky na volný povrch. [3, 4]

*Obr. 9 Výtrž*



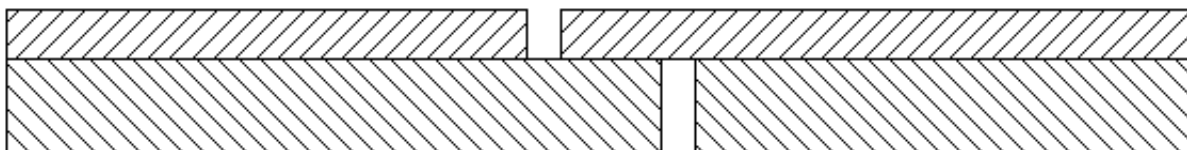
### **3.5 Kontrola výbuchové svařky**

Kvalitu bimetálových spojů lze kontrolovat buď destruktivní, nebo nedestruktivní metodou. Při destruktivním způsobu dochází ke zničení bimetálu. Rozřeže se na kousky, které podrobujeme zkouškám. Užívá se jich v sériové výrobě k průběžným kontrolám, nebo podrobným zkoumáním příčiny vzniku vady. Oproti tomu při nedestruktivních metodách nedochází k poškození a můžeme kontrolovat každý vyrobený kus. Vady, které jsou patrné na povrchu, můžeme odhalit vizuální prohlídkou, případně si můžeme pomoci lupou. Stejně tak můžeme prohlídkou identifikovat nečistosti, které souvisí s okrajem. [1, 3]

Poklepem vhodného kladiva určíme oblast necelistvosti. Projeví se zastřeným zvukem. V místě kvalitního spoje je zvuk zvonivý. Abychom určili přesně místa necelistvosti a bodové vady, použijeme ultrazvukové defektoskopové metody. Konkrétně metodu odrazovou. Princip spočívá ve vysílání ultrazvukových impulzů pomocí sondy přiložené k povrchu bimetalu. Sledujeme amplitudu a dobu příchodu odraženého signálu. Podle těchto ukazatelů spolehlivě najdeme výskyt vady v prostoru pod sondou. Na přístroji se zobrazuje vyslaný a zobrazený signál tak, že můžeme přímo odečíst hloubku a rozsah vady. Podmínkou správného měření je dokonalý kontakt mezi sondou a kovem. Ten zajistíme vazební kapalinou (olej, voda). [1, 3]

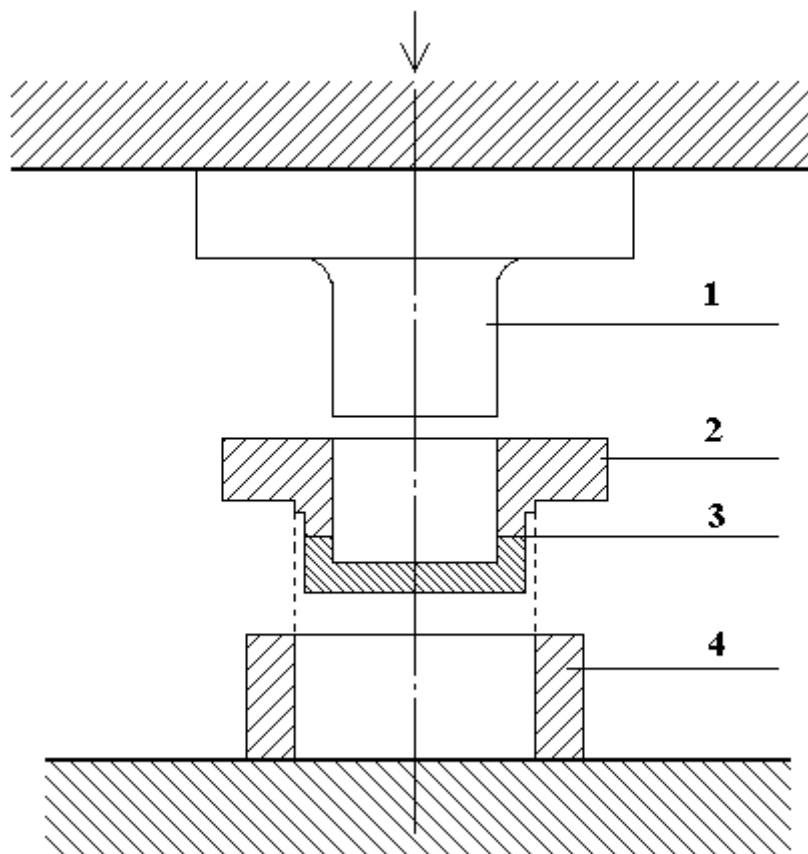
Destruktivní metody v sobě zahrnují metalografické vyšetření struktury svaru, mechanické zkoušky soudržnosti a pevnosti spojení. Bimetal je rozříznut po směru srázu, aby byly v řezu patrné vlny ve spoji. Jiný směr řezu zkreslí, nebo vůbec nevypoví o charakteru spojení. Při měření průběhu zpevnění je směr řezu libovolný. Zkoušku soudržnosti bimetalu lze provést ohybem přes trn. Nazývá se „zkouška lámavosti“, při které je tyč z bimetalu ohýbána dovnitř plátující vrstvou vně ohybu, anebo ohýbána do boku. Podobně probíhá zkouška krutem. Sleduje se případné oddělení obou kovů. Stříhovou pevnost spoje můžeme zjišťovat tahem na zkušebních tyčích, upravených podle obr. 10. [1, 3]

*Obr. 10 Zkouška pevnosti ve stříhu*



Další možností je zkouška kolmým tahem. Její uspořádání je patrné na obr. 11. Provádí se na válečkových vzorcích (2) vyrobených z bimetallické desky. Ve středu válečku je vyfrézovaný otvor, který prochází základním kovem a končí zhruba v polovině naplátovaného kovu. Váleček se opírá o opěrný kroužek (4) základovým kovem a trn (1) procházející otvorem tlačí na plátovaný kov. Dochází tak k tahovému namáhání spoje (3).

*Obr. 11 Zkouška kolmým tahem*



Výše popsané zkoušky jsou v podstatě statické. Existuje i zkouška dynamická, při které je spoj zatěžován rázovou vlnou. Standardní generátor vybudí rovinnou rázovou vlnu utlumenou na potřebnou hodnotu definovanými tlumícími deskami. Takto utlumená vlna projde vzorkem bimetalu. Způsobí buďto odtržení naplátované vrstvy, nebo přetržení krčku základního materiálu, podle jejich skutečných rázových pevností. Vzorek je možno takto testovat pouze jednou, proto je potřeba k vystupňování zátěže více vzorků, což je hlavní nevýhoda této zkoušky. [1, 3]

### 3.6 Střeliště pro výbuchové svařování

Umístění prostoru střeliště musí být v souladu s hygienickými a bezpečnostními normami a směrnicemi. Je nutné vzít v úvahu vysokou rizikovost při práci s výbušinami a vlivy hluku na okolí. Střeliště může být nezakrytý ve volném prostoru umístěný odpalovací prostor, nebo částečně zakrytý bezpečnostními valy. Tyto varianty předpokládají umístění v dostatečné vzdálenosti od lidských obydlí a pracovišť. Nebo zcela zakrytý a akusticky odizolovaný prostor, např. výbuchová komora v podobě tunelu, které lze vybudovat i v hustěji osídlených místech. V prostoru střeliště musí být dodrženy bezpečné vzdálenosti skladů výbušin od ostatních objektů a vymezen manipulační prostor a bezpečnostní okruh, kterými bude zajištěna bezpečnost osob. [1, 3]

## 4. Výbušiny a jejich vlastnosti

Výbušina je látka, případně směsí látek, které jsou schopné prodělavat výbuchovou přeměnu. Jejím znakem je vysoká rychlost chemické reakce doprovázená uvolňováním tepla, samovolným šířením a tvorbou plyných výbuchových zplodin. Vlivem těchto plynů a vysoké teploty, vzniká v místě výbuchového rozkladu vysoký tlak. Uvolněná energie je soustředěna v poměrně malém prostoru, přeměna tepelné energie v mechanickou probíhá rozepnutím plynů do okolí výbušiny. Důležitým znakem každého výbuchu je především jeho vysoký výkon. Teplo uvolněné při výbuchu běžných výbušin dosahuje kolem 4000 kJ kg<sup>-1</sup>, většina spalných paliv dosahuje mnohem vyšších hodnot, reakční doba u výbušin je však velmi krátká, podle druhu výbušiny 10<sup>-3</sup> až 10<sup>-6</sup> s. Díky tomu může výkon detonující výbušiny dosáhnout snadno 10<sup>7</sup> až 10<sup>8</sup> kW kg<sup>-1</sup>. [1, 3]

Podle rychlosti přeměny a hlavně podle rozložení tlaku rozeznáváme tři druhy výbuchu:

- výbuchové hoření
- vlastní výbuch (výbuch II. řádu)
- detonace (výbuch I. řádu.).

U výbuchového hoření probíhá přeměna natolik pomalu, že vznikající zplodiny stačí z místa reakce odtékat. V místě rozkladu se tlak nezvyšuje. Rychlost hoření je závislá nejen na druhu výbušiny, ale také na vnějších podmínkách, hlavně na tlaku v okolním prostředí.

S rostoucím tlakem se rychlost hoření zvyšuje, avšak ani při tlacích kolem  $10^2$  Mpa nepřesáhne 1 m/s. Pokud umístíme výbušinu do uzavřeného prostoru, bude se tlak stále zvyšovat díky vznikajícím plynným zplodinám, které nemohou unikát. Vlivem toho se bude zvyšovat i rychlost výbuchové přeměny.

Nastane druhá fáze, tedy vlastní výbuch (výbuch II. řádu). Zvyšuje se tlak v reakční zóně nad tlak okolí a roste rychlost reakce v čase. Ta je ovlivněna mnoha faktory a může dosáhnout až  $10^3$  m/s. V tento moment obvykle přechází vlastní výbuch v detonaci.

Detonace je stacionární forma výbuchu, šíří se maximálně možnou, konstantní rychlostí, převyšující rychlost zvuku v dané látce. Od hoření, které probíhá v důsledku tepelné vodivosti, difúze a záření se podstatně liší. Šíří se stlačením látky rázovou vlnou. Není tolik závislá na teplotě a okolním tlaku a její velikost se pohybuje mezi  $1 \times 10^3$  až  $9 \times 10^3$  m/s. Tlak v reakční zóně (u tuhých nebo kapalných výbušin) o několik řádů převyšuje tlak v nezreagované výbušině. [1, 3]

## **4.1 Rozdělení výbušin**

Dělí se na kondenzované (tuhé a kapalné), nebo plynné. Podle použití se kondenzované dělí na tři hlavní skupiny: 1. střeliviny, 2. trhaviny, 3. třaskaviny.

### **4.1.1 Střeliviny**

Hlavním typem jejich výbuchové přeměny je výbuchové hoření. Dělí se na mechanické směsi okysličovadel s palivy a koloidní roztoky nitrátu celulózy v želatinátorech (bezdymné prachy). Používají se v různých zbraních, kde udělují počáteční rychlost střelám. Při zpracování kovů se užívají ojediněle a to při výbuchovém tváření plechů.

### **4.1.2 Trhaviny**

U trhavin je hlavním typem výbuchové přeměny detonace. Pro výbuchové zpracování kovů mají největší význam. Jsou to většinou výbušiny nepřímé, to znamená, že je k jejich výbuchové přeměně zapotřebí silnější podnět. K detonaci se přivádějí obvykle rozbuškou. V průmyslových aplikacích se užívají z ekonomických důvodů převážně směsné trhaviny. Ty se podle způsobu použití dělí na povrchové, důlní skalní, důlně bezpečné a trhaviny pro speciální použití. První tři se užívají v dolech a lomech na trhací práce, stavební trhací práce, destrukce apod. Poslední jmenované se užívají též pro výbuchové zpracování kovů. [1, 3]

Podle konzistence jsou průmyslové trhaviny pevné, plastické, poloplastické a sypké. Obsahují zpravidla dvě hlavní skupiny látek – okysličovadla a paliva. Nejčastější okysličovadla jsou anorganické dusičnany, především dusičnan amonný. Obsahují kyslík, potřebný k dokonalé oxidaci a tvoří obvykle více než 50 %, někdy i 95 % celkové hmotnosti trhaviny. Jako nejčastěji užívaná paliva slouží různé organické látky, jako minerální oleje, nafta a další ropné produkty, dřevná moučka, dřevěné uhlí. Dále pak kovové prášky, zejména hliníkový. Další příměsi jsou zcitlivující látky, např. nitroglycerin, nitroglykol a trinitrotoluen. Aby detonace dosáhla vysoké rychlosti je potřeba směs jemně rozemlít a důkladně zhomogenizovat všechny složky. [1, 3]

#### **4.1.3 Třaskaviny**

Vyznačují se vysokou citlivostí na vnější podněty jako je plamen, náraz, tření. Vlivem působení těchto podnětů snadno vybuchují. Jsou proto také na rozdíl od trhavin a střelivin označovány jako primární výbušiny. Přecházejí velmi rychle od výbuchového hoření přes vlastní výbuch k detonaci. Proto se užívají hlavně k iniciaci sekundárních výbušin. Zahrnují široké spektrum látek, pro technickou praxi jsou však nejvíce významné třaskavá rtuť, azid olovnatý, trinitrezorcínát olovnatý a tetrazen. Přepravují se kvůli jejich vysoké citlivosti jen jako hotové výrobky, tj. rozněcovadla. [1, 3]

#### **4.1.4 Rozněcovadla**

Slouží, jak bylo již nastíněno v předchozím odstavci jako iniciátory sekundárních výbušin. Dělí se na hlavní a pomocná. Hlavní se dále dělí na iniciátory určené k předání tepelného impulsu při roznětu střelivin – zápalky a iniciátory určené k vyvolání detonace – rozbušky. Rozbušky mohou být zážehové nebo elektrické. Elektrické mají většinou podobu kovové dutinky, do které jsou přivedeny dva tenké kabely zakončené odporovým můstkem obaleným pyrotechnickou složí. Následuje primární třaskavinová náplň a sekundární trhavinová náplň. Proces výbuchu roznětky probíhá takto: přívodem elektrického proudu rychle vzroste teplota v odporovém můstku a zapálí se pyrotechnická slož okolo něj. Výšleh tohoto plamene spustí primární třaskavinovou náplň, jejíž detonace se přenesse na sekundární náplň brizantní trhaviny (většinou pentritu). Pomocná rozněcovadla jsou zápalnice a bleskovice. Zápalnice je tvořena vhodným druhem černého prachu zvaného duše, opředěním a obalem. Vypadá jako silnější kabel, dodává se namotaná na velkých cívkách. Používá se k iniciaci zážehových rozbušek. Bleskovice se podobá sestavou zápalnici, její duše je však tvořena brizantní trhavinou, nejčastěji pentritem. Užívá se k přenosu detonační vlny mezi jednotlivými

náložemi. Rychlost výbuchu neseného bleskovicí dosahuje 7000 m/s. V některých aplikacích se užívá jako samostatná nálož. Bleskovice mají různé barvy, pro snadné rozlišení. [1, 3]

## 4.2 Trhaviny pro výbuchové svařování

Základní podmínkou pro vznik spoje je, aby rychlost detonace nepřesáhla rychlost zvuku v žádném z kovů ze spojované kombinace. Pokud však chceme dosáhnout kvalitního spoje, potřebujeme rychlost detonace ještě podstatně nižší. Pro běžně používané materiálové kombinace se pohybuje rychlost detonace mezi 2000 – 3500 m/s. Z toho plyne požadavek na trhaviny vhodné pro výbuchové svařování. Musí mít stabilní režim detonace i v neutěsněných náložích a malou detonační rychlost. Další potřebnou vlastností je nízká dolní mezní vrstva. To znamená, aby si trhavina udržela stabilní průběh detonace, i když bude nanášena v tenké vrstvě. Tento požadavek je nutný při plátování tenkými plechy nebo foliemi. Pokud bychom v takovém případě použili trhavinu s vysokou dolní mezní vrstvou, kterou je k udržení stabilní detonace zapotřebí nanést v tlusté vrstvě, byla by detonace již příliš mohutná a došlo by k deformaci plechu. Dále je nutné, aby byly bezpečné při manipulaci a fyziologicky nezávadné. Na plátování velkých ploch je zapotřebí značné množství trhaviny a pracovníci s ní přicházejí při aplikaci přímo do styku. Dále nesmějí stárnout, musí si během skladování zachovat stejné výbušinářské, chemické a fyzikálně mechanické vlastnosti. [1, 3]

Trhaviny pro výbuchové svařování rozdělujeme do dvou skupin. První jsou amoniedkové trhaviny upravené tak, aby dosahovaly detonační rychlosti maximálně 3500m/s. Nevýhodou je závislost detonační rychlosti na tloušťce nálože a vyšší dolní mezní vrstva, sklon k navlhávání a tvrdnutí. Druhou skupinu tvoří sypké směsi individuálních krystalických trhavin s inertními (z necitlivujícími) přísadami např. hliníkový prášek, které snižují objemovou hustotu energie nálože. Výsledkem je nižší detonační rychlost. Jsou jimi např. směsi trinitrotoluenu s chloridem sodným ve formě pevných desek, nebo sypké trhaviny s odstupňovanými detonačními parametry. U nás byly k výbuchovému plátování vyvinuty trhaviny nesoucí označení Semtex. Název vznikl jako spojení částí slov Semtín a Explosia. Explosia je podnik zabývající se mj. výrobou výbušin, výbuchovým svařováním a sídlí v Semtíně u Pardubic. [1, 3]

Semtex se vyrábí v sypké a plastické podobě. Sypké trhaviny mají označení Semtex S a vyznačují se velmi nízkou stabilní detonační rychlostí a kromě Semtexu S 25 mohou detonovat i ve velmi tenké vrstvě. Mají dobrou sypnost a nespékají se. Jsou vhodné



především k plátování kovů. Plastické trhaviny Semtex 1A a Semtex 10 SE jsou voděodolné, mají dobrou přílnavost a jsou určeny především k výbuchovému zpevnování kovů. Užívají se také k přípravě počínových náloží. Speciální plastické trhaviny s nízkou detonační rychlostí vyráběné ve formě plátů různých tloušťek se užívají k plátování výrazně nerovinných ploch, jako jsou např. trubky. [1, 3]

## **5. Výhody a nevýhody výbuchového svařování**

Výhody a nevýhody výbuchového svařování kovů vyplývají zejména při srovnávání s konvenčními způsoby svařování, kvalitou vzniklých svarů, využitelností v průmyslu a náročnosti zhotovení.

### **5.1 Výhody**

Obecně lze jako hlavní výhody uvést široké spektrum kovových kombinací, které můžeme svařovat výbuchem. Pokud bychom některé z nich chtěli svařovat konvenčními způsoby, narazili bychom na spoustu technologických překážek. Se vznikem výbuchového svařování vznikly tedy kombinace kovů do té doby nemožné a neproveditelné. Můžeme navařovat plát kovu na téměř libovolně tlustou základovou desku. Rovněž lze svařit několik desek stejného kovu najednou. Při výbuchovém svařování dochází i ke zpevnění materiálů vlivem vysokých tlaků, naopak není negativně ovlivněn působením tepla, tedy nevznikají křehké intermetalické fáze, jako při konvenčním svařování. Díky tomu výbuchový spoj vykazuje vysokou pevnost a dá se dobře opracovávat.

Vzniklý bimetal lze bez problémů válcovat a ohýbat. Při paralelním uspořádání desek lze spojovat plochy o rozloze několika desítek m<sup>2</sup> naráz. Během několika mikrosekund vznikne obrovský kus kvalitního bimetalu, který by jiným způsobem ani vyrobit nešel. Velkým přínosem je úspora nákladů, protože nemusíme vyrábět potřebný technologický prvek z masivního ušlechtilého kovu, ale daný kov navaříme za použití levné trhaviny v tenké vrstvě na běžný levnější materiál. Úsporu můžeme najít i v hmotnosti. Otěrem namáhaný díl nezhotovíme z masivní těžké tvrzené oceli, ale použijme jen její tenký plátek a navaříme jej např. na hliníkový základ. Dostaneme lehký díl s vysokou odolností proti otěru. V porovnání s tavným svařováním je výbuchové levnější a méně časově náročné. Lze tak zhotovit požadované kombinace v krátkých dodacích lhůtách. [3, 6, 7]

## 5.2 Nevýhody

Nevýhody plynou z jeho samotné podstaty a tou je práce s výbušninami. Ta je náročná na bezpečnost pracovníků a prostor. Při plátování velkých desek může být použito i několik tun trhaviny. Takové množství vyvolá při detonaci značný akustický účinek a tyto práce můžeme provádět pouze na izolovaných střelištích vzdálených kilometry od obydlených míst. Většinou jsou jimi vojenské cvičné prostory, nebo specializovaná pracoviště. Takových bývá jen velmi málo a většinu výbuchové svařování lze provádět pouze tam. Proces přípravy před samotným výbuchem je velmi specializovaný a náročný na správnost provedení a jakékoliv pochybení může mít za následek nezdár celé operace. V mnohých případech se svařuje větší počet komponent najednou a případný nezdár může způsobit značné finanční ztráty. Pokud např. opláštujeme velký trubkový dílec, který potřebujeme jako celý kus a detonace neproběhne z nějakého důvodu v celé ploše, škoda je nenapravitelná, proces již nelze znova uskutečnit a materiál je znehodnocen. Tedy není prakticky možné samotný vznik svaru a průběh detonace v daný moment kontrolovat ani již nijak ovlivnit. Musíme vše co nejpečlivěji zvládnout v přípravě. [3, 6, 7]

## **6. Vlastnosti spojovaných kovů**

Nejčastěji se výbuchově svařují kovy rozdílných fyzikálních a chemických vlastností. Vznikne homogenní materiál, který vykazuje ty lepší vlastnosti použitých kovů a zároveň eliminuje ty horší.

### **6.1 Ocel plátovaná korozi-vzdornými kovy**

Základový plech z legované a uhlíkové oceli lze plátovat mědí, korozi-vzdornou ocelí titanem, hliníkem, tantalem, niklem a slitinami těchto kovů. Vznikne tím v podstatě nový materiál spojující výhody použitých kovů.

#### ***6.1.1 Konstrukční ocel a korozi-vzdorná ocel***

Bimetal složený z těchto ocelí byly známě již před vznikem výbuchového svařování. Vyráběly se tavným navařením, hutnicky (válcování ze združeně litych ingotů), nebo válcováním za tepla. Díky tomu jsou jejich vlastnosti dobře známé. S nástupem výbuchového svařování se ovšem kvalita těchto bimetalů značně zlepšila a samotná výroba zjednodušila. Nedochozí k promísení materiálů, k tepelnému ovlivnění plátující vrstvy a nevznikají v ní

póry. Tloušťka krycí vrstvy je rovnoměrná a nezměněn je i povrch, proto ho není třeba ani dodatečně opracovávat. Důležité je, že nedochází k negativní změně struktury materiálů jako při tavném svařování a všechny vlastnosti povrchu kovu jsou tedy stejné jako před spojením. Ani při následném tepelném zpracování nedochází ke změně struktury. Při mikrostrukturním zkoumání těchto bimetalů po intenzivním tváření, byla zjištěna výrazněji ovlivněná vrstva ve spoji, její tloušťka je však v řádu desetin milimetru. [3, 4]

### **6.1.2 Konstrukční ocel – měď a její slitiny**

Čistá měď se na ocel plátuje ze všech kovů nejlépe. Ke kvalitnímu vlnitému spoji dochází při širokém rozsahu podmínek svařování, snese rychlost detonace v rozmezí 1500 až 4500 m/s. Důvodem toho jsou mimořádně příznivé vlastnosti mědi, kterých nedosahuje žádný jiný běžně užívaný kov. Vykazuje výbornou tvárnost i za studena, což umožňuje vznik vlnitého rozhraní, velkou hustotu, díky které způsobí dostatečnou plastickou deformaci v základní desce i při nižších srázových rychlostech, dobře se rozpouští v mnoha kovech a má dobrou tepelnou vodivost. Ta zabraňuje vzniku natavenin ve svarovém rozhraní i při mezních podmínkách srážu. Měď se kvůli svým vhodným vlastnostem uplatňuje nejen jako samotná protikorozní vrstva, ale také jako mezivrstva kovů, které je problematické spojit přímo. Slitiny mědi již nejsou svařitelné v tak širokém spektru podmínek, jako čistá měď. Přesto se však běžně plátují bez problémů. S větší pevností se setkáme u slitin s niklem, nižší houževnatost a teplota tání pak charakterizuje bronzy a mosazi. Ty je třeba plátovat v měkce žíhaném stavu.

I v tomto případě nahradilo výbuchové plátování dřívější způsoby spojování (naplavování, tavné návary). Plátováním vzniklý bimetal dosahuje lepších kvalit ve všech směrech. Krycí vrstva je homogenní a bez pórů, není třeba ji třískově opracovávat, což významně snižuje náklady a čas. U kombinace mosazi s uhlíkovou ocelí nabyla zjištěna ztráta korozní odolnosti a pevnosti ve střihu ani po několika cyklech tepelného zatížení v rozpětí 20 °C až 400 – 700 °C. Stejně tak tomu je i při kombinaci mosazi a oceli, která byla podrobena podobnému tepelnému cyklu. [1, 4]

### **6.1.3 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 jednak velmi drahé a také nevhodné pro nízkou tepelnou

odolnost, ohřátý nad 200 °C ztrácí svou pevnost. Vytvoření bimetalu ocel–titan řeší oba problémy. Je však technologicky náročné a vyžaduje přesný postup a dodržení všech parametrů srázu. Již při malé odchylce svařovacího procesu může dojít k natavení styčných ploch a spoj není dostatečně kvalitní. Pokud se podaří plátovací proces bezchybně zvládnout, mohou vzniknout karbidy a intermetalické fáze v důsledku difúze za zvýšených teplot při zpracování, nebo používání bimetalu. Titan tvoří intermetalické sloučeniny nejen s ocelí, ale také např. s niklem, mědí atd. Pomocná mezivrstva připadá v úvahu pouze z niobu nebo zirkonia. Ty ovšem tvoří intermetalické sloučeniny s železem. Je tedy potřeba další mezivrstva a to např. slitina mědi. Výsledné složení vrstev vypadá takto: titan – niob – slitina mědi – ocel, kde ovšem slitina mědi tvoří nejméně pevný článek soustavy. Při správném uspořádání splátujeme všechny najednou, rozměr této vícevrstvé desky je však značně omezen, jsou proto vyráběny pouze pro zvláštní součásti. V praxi má hlavní význam přímé plátování titanu na ocel, podmínkou je dokonale zvládnutý proces plátování. Pro zachování dobrých vlastností bimetalu ho nesmíme zahřívat nad 560 °C při následném svařování a dalším použití. [3, 4]

#### **6.1.4 Konstrukční ocel a hliník**

Naválcováním hliníku na pás měkké oceli lze také vytvořit bimetal, ovšem jako vícevrstvý korozivzdorný materiál jej použít nemůžeme, právě kvůli omezeným rozměrům a mechanickým vlastnostem měkké oceli. Hliník má přitom vynikající korozivzdorné vlastnosti v různých agresivních prostředích. Jeho využitelnost ve formě kvalitního bimetalu, kde pevná ocel přejímá mechanické zatížení, je zřejmé. Výbuchovým plátováním je možné jej vyrobit, tato aplikace se však řadí k technologicky nejobtížnějším. Chová se přesně obráceně, než výše zmiňovaná měď. Jeho malá hustota není schopna přimět povrch základové desky k potřebné plastické deformaci a nízká teplota tání zapříčiní natavení povrchu hliníku dříve, než by mohl začít vznikat vlnitý spoj. Tyto vlastnosti se projeví o to výrazněji, tvoří-li základovou desku austenitická korozivzdorná ocel. Hliník navíc tvoří intermetalické křehké fáze s většinou kovů. Rozsah parametrů svařovacího procesu, při kterém se vytvoří kvalitní bimetal, je velmi úzký. Řešením je použití speciálních trhavin, které tyto parametry splňují, a tím získáme bimetalu výborných vlastností. Snesou ohyb o 180° aniž by došlo k oddělení vrstev a pokud dojde k lomu, vždy mimo svar. Podmínkou je vznik vlnitého spoje. U běžných uhlíkových ocelí jej umíme vytvořit bez větších problémů, u austenitických záleží na tvrdosti jejich povrchu. Výskyt křehkých fází v bimetalu roste se zvyšující se teplotou. Tento jev do určité míry odstraní mezivrstva ze slitiny hliníku. Pro zvýšení kvality spoje se může použít

i několik mezivrstev, výsledná kombinace pak vypadá takto: korozivzdorná ocel – nikl – titan – čistý hliník – slitina hliníku. Všechny kombinace, kde je použit hliník se užívají v zařízeních s nízkým tepelným zatížením. [3, 4]

### **6.1.5 Speciální kombinace kovů**

Velmi drahým a vzácným kovem je tantal. Vyniká vysokou odolností proti organickým i anorganickým kyselinám. Nabízí se jeho plátování na pevnější oceli, protože jeho pevnost je poměrně malá. Při výbuchovém svaření se zvýší asi o 30%, přesto lze ohýbat o 180°, tvářet a válcovat za studena. Další málo užívaný kov je molybden. Vykazuje odolnost vůči vodíku i za vysokých teplot, tuto vlastnost má jako jediný ze všech technických kovů. Proto se z bimetalu ocel – molybden vyrábějí syntézní zařízení v chemickém průmyslu, v nichž se vyskytuje atomární vodík. K výrobě bimetalů se užívá také nikl, častěji však jeho slitiny, např. niklu a mědi v poměru 2 : 1, kterým se říká monely. Vykazují lepší mechanické vlastnosti než čistý nikl. Speciálními slitinami niklu vznikají také žárovevné bimetaly. Velmi problematické je výbuchové plátování olovem na ocel. Je však odolný proti kyselině sírové, proto jsou jeho bimetaly užitečné v chemickém průmyslu. Nesnáze vznikají již při ustavení desek, protože olovo je velmi měkké a těžké. Ustavit jej přesně rovnoběžně v určité vzdálenosti od základového kovu je obtížné. Pokud tento problém vyřešíme, nastává další v podobě malé rychlosti šíření zvuku v olovu. Bylo vyzkoušeno několik pokusů jak zvýšit rychlost zvuku. Těsně před plátováním se olovo ochladí kapalným dusíkem, to zvýšilo rychlost šíření zvuku téměř o 700 m/s. Jediným skutečně účinným způsobem je použití trhaviny s detonační rychlostí do 1200 m/s. Vzniklý spoj je zcela homogenní, ukázala to zkouška smáčivosti, když se olovo navařené na ocel dodatečně roztavilo a smáčelo ocel v celé ploše (za normálních podmínek se ocel olovem nesmáčí). [3, 4]

## **6.2 Otěruvzdorné a rychlořezné oceli**

Oceli legované manganem vynikají vysokou otěruvzdorností a houževnatostí. Nejdůležitějšími zástupci jsou Hadfieldovy oceli. Jelikož jsou však drahé a velmi obtížně se zpracovávají, je výhodné naplátování na lépe obrobitelnou podložku. Další zástupce je Abrazit. Lze jej plátovat i v nežíhaném stavu a vzniklý bimetal bez problémů kalit a popouštět pro získání požadovaných vlastností. Kombinací nekalitelné houževnaté a dobře obrobitelné oceli s ocelí rychlořeznou, resp. nástrojovou, získáme vynikající materiál pro přípravu řezných nástrojů. Výbuchové splátování těchto kovů nečiní potíže, je však nutné, aby byly

urychlované rychlořezné oceli v měkce žíhaném stavu. Pevnost spoje u těchto ocelí vždy převyšovala pevnost základního materiálu. [3, 4]

### **6.3 Ostatní materiály**

Výbuchově svařovat můžeme nejen dva kovy k sobě, ale také více vrstev kovů. Vícevrstvé materiály mají větší odolnost proti balistickému průrazu než materiály homogenní o stejné hmotnosti. Tento jev platí, pokud mají-li vrstvy střídavě nízkou a vysokou akustickou impedanci, např. 0,127 mm (1/20") tlustý hliník v 11 vrstvách a Hadfieldova ocel. Rozdílná teplotní roztažnost bimetalů splátovaných do obvykle poměrně tlusté desky je relaxována plastickou deformací méně pevné složky. Rozdílné teplotní roztažnosti se již dlouho využívá u tenkých bimetalických pásků v měřicích a regulačních zařízeních (hlavně v elektrotechnice). U nich totiž nedojde k plastické deformaci méně pevného kovu, ale k jeho smrštění, nebo naopak roztažení. To způsobí ohýbání celého pásku, které závisí na aktuální teplotě. Pokud se teplota vrátí na výchozí hodnotu, pásek se opět narovná. Dříve byly spojovány pájením, nýtováním, nebo naválcováním. Výbuchovým svářením se jejich výroba zjednodušila a zkvalitnila.

Bronzy jsou vhodné materiály pro výrobu kluzných uložení. V bimetalu se jejich kluzná schopnost obohatí o celkovou houževnatost základovým kovem, navíc je stačí plátovat v tenké vrstvě a to pevnost celého segmentu ještě zvýší, protože pevný podklad přímo podpírá měkkou kluznou vrstvou. Zhotovují se z něj ložisková pouzdra, vodící lišty atd. Bimetaly bronz – ocel můžeme válcovat a tepelně opracovávat, pevnost a celistvost spoje tím není nijak narušena. [3]

## **7. Uplatnění výbuchového svařování v praxi**

Výbuchovému svařování připadá největší podíl ze všech operací výbuchového zpracování kovů. Jak v objemu celkové produkce, tak v rozmanitosti a použitelnosti ve strojírenství, chemickém průmyslu, jaderné energetice a elektrotechnickém odvětví. Lze svařovat rovinné i nerovinné plochy, provádět bodové i liniové svary.

## 7.1 Svary rovinných ploch

Většinu z výbuchově svařovaných aplikací tvoří právě svary rovinných ploch. Hlavním odběratelem takto vyrobených bimetalů je chemické strojírenství. Na základovou desku z oceli stačí v poměrně tenké vrstvě naplátovat drahý korozivzdorný kov a dostaneme požadovaný materiál, který vyniká vysokou korozní odolností a zároveň dobrou pevností. Ve všech směrech dosahuje lepších vlastností, než kterých bychom byli schopni dosáhnout tavným navařením. Krycí vrstva je všude stejně tlustá, jednolitá a vykazuje výbornou soudržnost se základovým kovem. Jako základní kovy jsou nejčastěji použity uhlíkové, nebo nízkolegované oceli. Jako krycí vrstvy používáme korozivzdorné oceli, hliník, měď a její slitiny, titan, zirkonium, tantal. Její tloušťka se obvykle pohybuje od 2 do 10 mm. Může být však tenká i 0,1 mm, nebo naopak tlustá 20 až 30 mm. Pro výrobu reaktorových nádob, výměníků tepla, cisteren, destilačních kolon a dalších podobných zařízení slouží plechy velkých formátů. Např. kombinace titanu o tloušťce 2 mm a uhlíkové oceli 22 mm byla využita k výrobě série reaktorových nádob o průměru 2,45 m a délky 7 m. Nahradil se tím starý způsob výroby, při kterém byla titanová výstelka obtížně pájena k plášti stříbrnou pájkou. Za vysokých teplot a tlaků se titanová výstelka oddělovala. [3, 8]

Další uplatnění nachází výbuchové plátování při výrobě bimetalických trubkovic výměníků tepla. Umožňuje zhotovit polotovary ve tvaru kruhovky, která vyžaduje jen malé opracování a nevzniká téměř žádný nevyužitelný bimetalický odpad. Hlavním důvodem, proč se plátování velmi dobře uplatnilo v chemickém průmyslu je, že tavné svařování naráží v tomto odvětví na značné překážky. Nesprávně zvolený režim může způsobit promísení základového a krycího kovu a způsobit vznik intermetalických křehkých fází. Při výrobě kluzných ložisek nahradila kombinace tenkostěnné pánve a hliníkové výstelky původní masivní ložiskové pánve.

Vynikajících vlastností dosahuje kombinace základní konstrukční uhlíkové oceli a nástrojové oceli. Užívá se např. při výrobě funkčních částí nůžek na kůži a papír. Výbuchový svar má vysokou pevnost a ta se nemění ani při opakovaném tepelném zpracování. Problematiku svařitelnosti některých kombinací kovu běžnými postupy řešilo jejich nýtování. Při stavbě lodí se tyto kombinace užívají velmi často. Pro dosažení dobré stability, je nutné umístit těžiště lodi co nejnižší. Proto se konstrukce palubních nadstaveb vyrábějí z hliníku, který je výrazně lehčí než, ocel ze které bývá vyroben trup lodě. Svaření těchto kovů je však běžnými postupy obtížné. Jediným možným spojem bylo nýtování, ten je

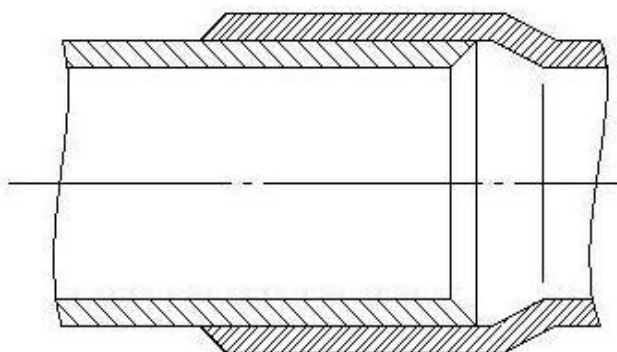
však pracný a vykazuje nízkou korozní odolnost. Výbuchovým svařováním lze hliník s ocelí bez problémů svařit a zhotovit tzv. přechodové mezikusy. Jedná se o dva k sobě přivařené kovy požadované kombinace, velikosti a tvaru. Mezikusy pak můžeme již tavně navařit ocelovou stranou k trupu lodi a na vrchní stranu z hliníku navařit hliníkovou konstrukci nadstavby. V praxi se toto řešení velmi osvědčilo a nevykazuje žádné nedostatky. [3, 8]

## 7.2 Svary válcových ploch

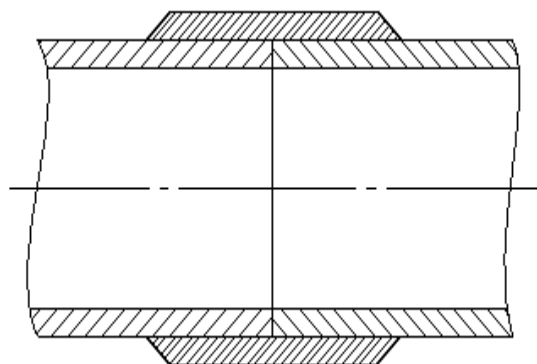
Do silnostěnných reaktorových válcových nádob lze navařit korozivzdorné výstelky. Provádí se to přímo do již hotových nádob. Pro usnadnění spojení těchto chemických nádob s přírodním potrubím jsou dodána přírubová hrdla, jejichž vnitřek je výbuchově naplátován korozivzdornou vrstvou. Běžná je i bimetrická úprava trubek pro chemické strojírenství a jadernou energetiku. Např. ocelové trubky s měděnou výstelkou používané pro výrobu syntetického etanolu. Lze vyrábět i bimetrické válce nebo tyče z levné konstrukční uhlíkové oceli opláštěné z venku ušlechtilou vrstvou. Vhodnou kombinací kovů dosáhneme korozivzdorných vlastností povrchu, nebo odolnost proti otěru. Opláštěné tyče mají využití např. také jako speciální elektrody.

Významnou technologií je výbuchové svařování trubek. Uvažujeme dvě možnosti provedení spoje: přeplátování konců trubek obr. 12, nebo naplátování objímky na trubky sesazené k sobě obr. 13.

*Obr. 12 Vzájemné přeplátování trubek*



*Obr. 13 Opláštění objímkou*





Těmito způsoby lze vyrobit rovněž přechodové trubkové mezikusy, kterými se dají spojovat trubky z rozdílných materiálů klasickými svářecími metodami. Neobvyklé kombinace kovů jako je zirkonium a jeho slitiny, berylium atd. se užívají v jaderné energetice vzhledem k jejich schopnosti absorbovat neutrony. Rozsáhlou oblast užití výbuchového svařování tvoří zavařování trubek do trubkovnic výměníků tepla. Oproti upevnění a zavaření tavným svarem vykazuje výbuchově provedený spoj vyšší stupeň spojení. Dojde k upevnění i zavaření v jedné operaci a dosažení vysoké odolnosti při mechanickém namáhání. Existuje mnoho variant těchto procesů, všechny jsou však prováděny dvěmi základními metodami uspořádání, paralelního a úhlového. V trubkovnici je otvor o průměru trubky, kterou do něj budeme navařovat. Jelikož je trubka v otvoru natěsnána a mezi ní a trubkovnicí tedy není žádná distance, nemohl by výbuchový spoj vzniknout, protože by nedošlo k dostatečnému urychlení materiálu. Proto musíme požadovanou distanci vytvořit. [3, 8]

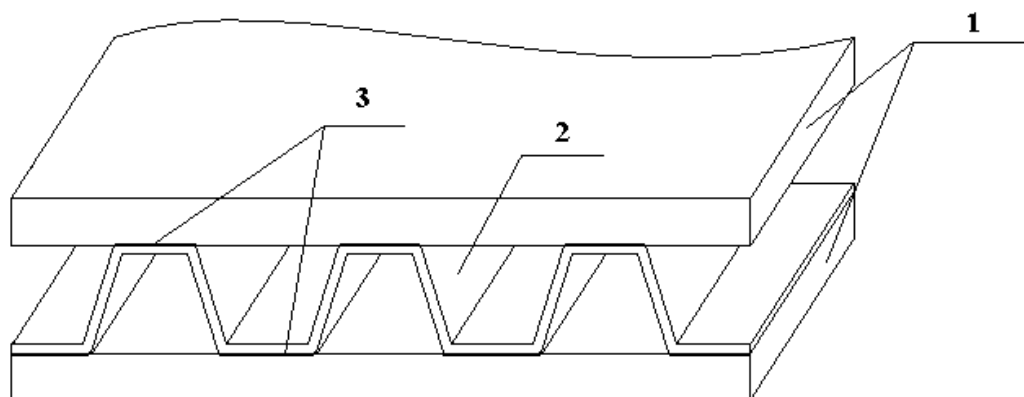
Při paralelním uspořádání se průměr otvoru z vnitřní strany trubkovnice rovnoměrně zvětší tak, aby vznikla požadovaná distance mezi ním a trubkou. Zvětšení zasahuje zhruba do půlky trubkovnice. Potom již může dojít ke svaru. Do trubky v délce rozšíření se umístí trhavina, detonace probíhá od kraje ke středu, dochází k roztažení trubky ve vnitřním zvětšeném osazení a ke svaru. Při úhlovém uspořádání se nezvětšuje část otvoru rovnoměrně, ale do tvaru trychtýře, který se od kraje ke středu zmenšuje až do průměru trubky. A právě tento kónusový tvar zajistí potřebnou distanci nutnou k urychlení. Zde však detonace probíhá zevnitř ke kraji, protože při úhlovém uspořádání musí probíhat detonace z místa bližšímu k vrcholu úhlu.

Pokud by tomu tak nebylo a výbuch by šel od kraje ke středu, rychlost detonace by se značně zvyšovala a ke srážce by nakonec došlo v celé ploše najednou, což je nepřípustné. Stejně jako při plátování rovinném, tak i zde musí urychlovaný kov, tedy trubka o kousek přecházet z trubkovnice, aby vznikl svár až do kraje. Přesahy se při srážce ustříhnou o hranu otvoru v trubkovnici. Průměry zavařovaných trubek jsou nejčastěji od 15 do 60 mm o tloušťce stěny 3 mm. Zavařují se takto např. trubky z hliníkové mosazi do trubkovnic z hliníkového bronzu pro zařízení na výrobu etylénglykolu, mosazné trubky do mosazných trubkovnic pro odsolovače mořské vody. U výměníků tepla je občas nutné zaslepení konců netěsných trubek. To lze provést dálkově odpálenou zaslepovací zátkou. [3, 8]

### 7.3 Bodové a liniové výbuchové svařování

V praxi se užívá obvykle ve dvou oblastech. Pokud není požadován homogenní spoj v celé ploše, třeba při plátování tenkostěnné vrstvy krycího kovu, užije se pouze lokálních spojů se základním materiálem. Druhou oblast využití představuje svařování jednotlivých konstrukčních dílů. Oproti celoplošnému výbuchovému svaru není potřeba při lokálním přivaření zdaleka takové množství trhaviny. Za dodržení bezpečnostních podmínek lze svařování provádět přímo v areálu konkrétního podniku. Použití lokálních svarů v ploše omezuje tloušťka pláště a způsob namáhání takového dílce. Nelze jej užít tam, kde bude spoj namáhán tapelnými a tlakovými rázy. Liniové (švové) svary jsou také vhodné k výrobě odlehčených konstrukcí, jedna z variant je na obr. 14. Mezi dvěma pláty (1) je v celé ploše profilovaný dílec (2), s plochými vrcholy, které tvoří kontaktní místa obou ploch. V místě těchto vrcholů se umístí pásy s náplní trhaviny, při detonaci vznikne spoj (3) mezi plátem a vrcholy profilované výplně. [3, 5]

*Obr.14 Odlehčená konstrukce*



Tvar výplně může být různý, záleží na konkrétní konstrukci. Bodově lze svařovat např. ploché hliníkové vodiče široké 50 mm a síle v rozmezí 4 až 10 mm. Aby bylo možné provádět svary přímo v montážní dílně, nebo v terénu, je trhavina umístěna ve speciálních pouzdrech a její hmotnost činí maximálně 10 g. Lokální výbuchové spoje nahradily objímky se šrouby spojující hliníkové a měděné vodiče elektrifikovaných železničních tratí. Nově vzniklé spojení je výrazně kvalitnější a levnější než spoj mechanický. Švové výbuchové svařování nahradilo tavné při výrobě nádrží z vysokopevné martenzitické vytvrditelné oceli, určených pro kapalná raketová paliva. Působením agresivního prostředí původní tavné svary praskaly. [3, 5]

## **8. Závěr**

Po dlouhá léta bylo tavné svařování jednou z mála technologií jak vytvořit poměrně kvalitní nerozebíratelný spoj mezi kovy. S příchodem nedestruktivního využití energie, uvolněné při výbuchu, vznikl samostatný obor nazvaný výbuchové svařování. Ve velmi krátkém čase za působení obrovských tlaků dojde ke spojení meziatomových vazeb kovů bez výrazného ovlivnění jejich struktury. Tento objev byl bez nadsázky mezníkem v kovo zpracujícím průmyslu. Otevírá široké možnosti, které ani dnes nejsou zdaleka vyčerpány. Díky tomuto způsobu svařování vznikly do té doby neznámé materiály výjimečných mechanických a fyzikálních vlastností. Při nízkých nákladech na samotné svaření je i jeho ekonomický přínos velmi pozitivní. S postupným osvojením celého procesu a dalším podrobným zkoumáním se podařilo dosáhnout kvalitního spoje mezi téměř všemi druhy známých kovů a jejich slitin. Rovněž spektrum tvarů, které lze takto zpracovávat je značně široké. Nejčastější je spoj rovinných ploch, ten je spolehlivě zvládnutelný v rozsahu desítek metrů čtverečních, v téměř neomezené tloušťce základní desky. Jsou však již dobře propracovány svary nerovinných a válcových ploch, trubek a tlustých kabelů, kolejnic apod.

Výbuchové svařování převyšuje kvalitou vzniklého spoje ve všech směrech tavné svařování. Většina takto vzniklých svarů ani tavným způsobem provést nelze. Proto se od něj v těchto průmyslových aplikacích upustilo a nahradilo je svařování výbuchové. Uplatnění takto vyrobené materiály nachází v chemickém průmyslu. Jsou z nich např. vyrobeny tlustostěnné válcové reaktorové nádoby s výstelkou z korozi vzdorného kovu navařenou přímo do hotové nádoby, bimetalické trubky pro potravinářský průmysl a mnoho dalších dílů pro jadernou energetiku, strojírenství, teplárenství apod. Obzvláště praktické jsou bimetalické mezikusy pro spojování segmentů z rozdílných kovů. Pomocí nich je pak možné spojit segmenty přímo na místě tavným svařením. Použitím dílu, jehož povrch tvoří ušlechtilý kov a nosná část je z levného materiálu výrazně snížíme náklady, hmotnost a zlepšíme jeho vlastnosti. V současnosti je tato technologie běžně využívána po celém světě, největšími producenty výbuchově svařených dílů jsou USA a Čína, kde jsou schopni spolehlivě svařovat pláty obrovských rozměrů a Rusko. V České republice má výbuchové svařování také velkou tradici. Byla zde v druhé polovině minulého století vyvinuta speciálně pro tyto účely trhavina nesoucí označení Semtex, která je známá a používána po celém světě. [3, 1, 2]

## **9. Použitá literatura**

- [1] 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.
- [2] Ezra, A.A.: *Principles and Practice of Explosive Metalworking*. London: Industrial Newspapers Limited, 1973. 270 s. ISBN 0-90199405-7
- [3] CHLÁDEK, Lubomír – NĚMEČEK, Josef – VACEK, Jan. *Výbuchové svařování kovů a příbuzné procesy*. První vydání. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1979. 224 s. Typové číslo: L13-E1-IV-31f/22616. ISBN neuvedeno.
- [4] CROSSLAND, B.: *Explosive Welding of Metals and its Application*. Oxford: Clarendon Press, 1982. ISBN 0-19-859-119-5.
- [5] BLAZYNSKI, T.Z.: *Explosive Welding, Forming and Compaction*. Essex: Applied Science Publishers Ltd., 1983. ISBN 0-85334-166-4
- [6] KUNCIPÁL, J. – PILOUS, V. – DUNOVSKÝ, J.: *Nové technologie ve svařování*. První vydání. Praha: SNTL, 1984. 291 s. ISBN neuvedeno.
- [7] BLAŠČÍK, F. et al.: *Technológia tvárnenia, zlievárenstva a zvárania*. Bratislava: ALFA, 1988. 832 s. ISBN neuvedeno.
- [8] ITOH, S. – HOKAMOTO, K. – FUJITA, M.: *Explosion, Shock Wave and Hypervelocity Phenomena in Materials*. Switzerland: Trans Tech Publications Ltd., 2004. ISBN 0-87849-950-4.

Seznam obrázků:

|   |    |
|---|----|
| Obr. 1 Výtrž .....  | 4  |
| Obr. 2 Základní uspořádání při výbuchovém svařování ..... | 5  |
| Obr. 3 Průběh urychlení krycího kovu .....                | 5  |
| Obr. 4 Trysk .....  | 6  |
| Obr. 5 Vlnitý spoj .....                                  | 7  |
| Obr. 6 Sestava na venkovním střelišti.....                | 10 |
| Obr. 7 Příliš silná a rychlá detonace .....               | 12 |
| Obr. 8 Příliš slabá detonace .....                        | 12 |
| Obr. 9 Výtrž .....  | 13 |
| Obr. 10 Zkouška pevnosti ve stříhu .....                  | 14 |
| Obr. 11 Zkouška kolmým tahem .....                        | 15 |
| Obr. 12 Vzájemné přeplátování trubek .....                | 27 |
| Obr. 13 Opláštění objímkou .....                          | 27 |
| Obr. 14 Odlehčená konstrukce .....                        | 29 |