

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra materiálů a strojírenské technologie



Bakalářská práce

Využití hybridních spojů v konstrukci automobilů

Vedoucí práce

doc. Ing. Petr Valášek, Ph.D.

Autor

Jan Ferkl

© 2021 ČZU v Praze



Česká zemědělská univerzita v Praze
Technická fakulta

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Autor práce:	Jan Ferkl
Studijní program:	Technika a technologie v dopravě a spojích
Obor:	Silniční a městská automobilová doprava
Vedoucí práce:	doc. Ing. Petr Valášek, Ph.D.
Garantující pracoviště:	Katedra materiálu a strojírenské technologie
Jazyk práce:	Čeština
Název práce:	Využití hybridních spojů v konstrukci automobilů
Název anglicky:	Use of hybrid bonds in construction of automobiles
Cíle práce:	Cílem bakalářské práce je shromáždit a analyzovat aktuální poznatky o možnostech a limitách perspektivních metod spojování v konstrukci automobilů. Na základě závěrů z literárního rozboru předmětné problematiky stanoví bakalář přínos práce.
Metodika:	Současný stav řešeného problému (literární rešerše). Závěry a přínos práce.
Doporučený rozsah práce:	cca 30 stran
Klíčová slova:	Materiálové inženýrství, metody spojování, synergický efekt

Doporučené zdroje informací:

1. BROCKMANN, Walter. Adhesive bonding: materials, applications and technology. Weinheim: Wiley-VCH, 2009. ISBN 9783527318988;3527318984;9783527310913;3527310916;.
2. Časopisy: Applied composite materials, Composites part B, Journal of Adhesion and Adhesives, Strojírenská technologie, Manufacturing Technology
3. EHRENSTEIN, Gottfried W. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 8086960293;9788086960296;.
4. GIBSON, I., D. W. ROSEN a B. STUCKER. Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. Second. London;New York;Heidelberg;Dordrecht;: Springer, 2015. ISBN 9781493921126;1493921126;.
5. MATTHEWS, F. L. a R. D. RAWLINGS. Composite materials: engineering and science. 1st. Boca Raton: CRC, 1994. ISBN 9780849306211;0849306213;.
6. MILTON, Graeme W. The theory of composites. 1st. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2002. ISBN 0521781256;9780521781251;.
7. SKÁLOVÁ, Jana et al. Nauka o materiálech. 4. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2010. ISBN 9788070432440;8070432446;.

Předběžný termín obhajoby: 2020/2021 LS - TF

Elektronicky schváleno: 22. 1.
2020

**prof. Ing. Miroslav Müller,
Ph.D.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno: 19. 2.
2020

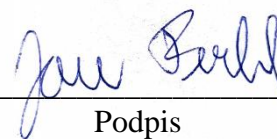
doc. Ing. Jiří Mašek, Ph.D.

Děkan

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci "Využití hybridních spojů v konstrukci automobilů" jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou citovány v práci a uvedeny v seznamu použitých zdrojů na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že jsem v souvislosti s jejím vytvořením neporušil autorská práva třetích osob.

V Praze dne 14.05.2021



Podpis

Poděkování

Rád bych touto cestou poděkoval doc. Ing. Petru Valáškoví, Ph.D., vedoucímu mé bakalářské práce, za ochotu, vstřícnost a cenné rady, které mi pomohly při zpracování bakalářské práce. Také bych rád poděkoval své rodině, která mě při bakalářském studiu podporovala.

Využití hybridních spojů v konstrukci automobilů

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá základními materiály využívaných při konstrukci automobilů a jejich hybridním způsobem spojování. Na začátku práce jsou krátce popsány materiály a jejich vlastnosti využívané v automobilovém průmyslu. Poté práce navazuje na hybridní a také perspektivní metody spojování materiálů v automobilovém průmyslu, u kterých je popsán jejich princip, klady a zápory daných metod.

Klíčová slova: materiálové inženýrství, metody spojování, synergický efekt

Use of hybrid bonds in construction of automobiles

Abstract

This thesis of this work deals with the basic materials used in the construction of automobiles and their hybrid methods of connection. At the beginning of the work are briefly described the materials and their properties that are being used in the automotive industry. Afterwards the work follows the hybrid and also other promising methods of joining materials in the automotive industry, which describes their principle and pros and cons of those methods.

Keywords: material engineering, joining methods, synergistic effect

Obsah

1 Úvod.....	9
2 Cíl práce a metodika	10
2.1 Cíl práce	10
2.2 Metodika	10
3 Materiály spojované v automobilovém průmyslu.....	11
3.1 Ocel	11
3.2 Hliník.....	11
3.3 Hořčík.....	11
3.4 Polymery a kompozity	11
4 Hybridní spoje.....	13
4.1 Spojování s využitím lepení	13
4.1.1 Lepení v kombinaci s lemováním.....	14
4.1.2 Lepení ve spojení s mechanickými bodovými spoji.....	15
4.1.3 Kombinace lepení a tavného svařování	18
4.1.4 Injekční spojovací prostředky pro lepení.....	22
4.2 Metody spojování využívající nýtování	22
4.2.1 FBJ metoda (Friction bit joining)	22
4.2.2 F-SPR metoda (Třecí samořezné nýtování).....	23
4.2.3 SPR metoda (Self-piercing riveting).....	23
4.3 Metody využívající svařování	24
4.3.1 FSW metoda (Friction stir welding)	25
4.3.2 MIG plazmové svařování.....	27
4.3.3 RSW (Resistance Spot Welding).....	29
4.3.4 SSW metoda (Friction Stir Spot Welding)	29
4.3.5 TWB metoda (Tailored welded blanks).....	31
4.3.6 Hybridní svařování za použití laseru	31
5 Závěr.....	37
6 Seznam použitých zdrojů	38
7 Seznam obrázků	42

1 Úvod

Bakalářská práce „Využití hybridních spojů v automobilovém průmyslu“ se zabývá vybranými metodami spojování, na které jsou v tomto odvětví kladeny čím dál větší nároky, a to v souvislosti s tlakem na větší bezpečnost automobilů, snižování jejich hmotnosti a také s ohledem na ekologičtější výrobu v automobilovém průmyslu, největší podíl produkce skleníkových plynů je totiž právě v něm.

V následujících kapitolách se budu snažit popsat blíže tuto problematiku. Přiblížím klady a zápory jednotlivých hybridních spojů – kombinace lepení a mechanického spojování, hybridních metod používající nýty, kombinace lepení a tavného svařování, hybridních metod využívající svařování a hybridního svařování za použití laseru.

Jednotlivé metody mezi sebou porovnam a specifikuji materiály, při nichž je vhodné jejich použití.

Touto bakalářskou prací bych chtěl oslovit všechny, kteří se zajímají o hybridní spojování využívaném v automobilovém průmyslu. Pro větší názornost jsou v textu použity obrázky a nákresy.

Česká republika patří mezi největší výrobce automobilů nejen v Evropě, ale i ve světě. Automobilový průmysl, zejména výroba automobilů je nejdále ze všech průmyslových odvětví. K hlavním trendům patří tlak automobilek na snižování nákladů a zvyšování efektivity výroby nejen v továrnách ale i u dodavatelů. Důležitý faktor do budoucna, který ovlivní automobilový průmysl je i zpřísnování ekologických požadavků a bezpečnostních standardů.

2 Cíl práce a metodika

2.1 Cíl práce

Cílem této práce je shromáždit aktuální poznatky o perspektivních metodách spojování v konstrukci automobilů.

2.2 Metodika

Metodikou této práce je vypracování literární rešerše, která popisuje téma perspektivních metod spojování v automobilovém průmyslu. Při literární rešerši bylo využito citačních databází Scopus a Web of Science, které poskytují přístup k odborným článkům o daném tématu.

3 Materiály spojované v automobilovém průmyslu

3.1 Ocel

Materiál výjimečně všestranný, pokud jde o tvarovatelnost, pevnost a cenu. Mezi další přednosti můžeme zařadit recyklovatelnost, dobrou absorpci energie při nehodě a jednoduché spojování. Ocel jako taková podléhá korozi, které předejdeme pozinkováním. Nevýhodou oceli je vyšší hmotnost než u alternativních materiálů. [1]

3.2 Hliník

Oproti strukturám z oceli lze použitím hliníku snížit hmotnost až na polovinu, také nám ale vzroste cena přibližně na dvojnásobek. Snižování hmotnosti nemůžeme využít naplno kvůli modulu pružnosti. Zatímco u oceli je $E=210$ GPa, u hliníku to činí pouze 69 GPa. Jelikož tuhost řadíme mezi primární vliv na konstrukci, musíme kvůli nižšímu modulu provést kompenzace v tloušťkách materiálu. Hliník je hůře formovatelný a svařitelný než ocel, tím rostou i výrobní náklady. Hliník samotný nepodléhá korozi. [1]

3.3 Hořčík

Nejlehčí ze všech technických kovů s hustotou pouze 1,74 g/cm³. Je přibližně o třetinu lehčí než hliník a více než čtyřikrát lehčí než ocel. Výroba probíhá pouze v podobě litých komponent. [1]

3.4 Polymery a kompozity

Polymery používané pro karoserie lze rozdělit na termoplasty a termosety. Termoplasty jsou materiály s vysokou molekulovou hmotností, které změkčují nebo se taví působením tepla. Zpracování termosetu vyžaduje nevratnou přeměnu základní pryskyřice s nízkou molekulovou hmotností na polymerovanou strukturu. Výsledný materiál nelze přetavit ani reformovat. Kompozity se skládají ze dvou nebo více odlišných materiálů, které při kombinaci vytvářejí vlastnosti, které nelze jednotlivě dosáhnout pomocí jednotlivých složek. Při použití u karoserií jsou hlavním kompozitním materiálem vyztužené plasty. Pod pojmem skleněné vlákno se rozumí plastová pryskyřice vyztužená složkou ze skleněných vláken. Pryskyřice definuje tvar dílu, drží vlákna na místě a chrání je před poškozením. Hlavními

výhodami kompozitů jsou jejich relativně vysoká pevnost a nízká hmotnost, vynikající odolnost proti korozi, tepelné vlastnosti a rozměrová stabilita. Pevnost polymerního kompozitu se bude zvyšovat s procentem vláknitého materiálu a je ovlivněna orientací vláken. Přizpůsobení orientace a koncentrace souborů může proto umožnit zvýšení síly v konkrétní oblasti součásti. [1]

4 Hybridní spoje

Během hybridního spojování dochází ke dvěma nebo více spojovacím operacím a to buď současně, nebo postupně, což vede k vylepšeným vlastnostem spoje díky synergické interakci únosnosti za provozních podmínek. [2]

4.1 Spojování s využitím lepení

Jednou z možností, jak kombinovat výhody mechanického spojování a lepení, je použití technik hybridního spojování. V tomto případě se v prvním kroku procesu vytvoří konvenční lepicí spoj a poté se ve druhém kroku procesu mechanicky spojí. Mechanický spoj fixuje součásti tak, aby bylo možné sestavu přímo dále zpracovávat. Konečná pevnost hybridního spoje, známá také jako provozní pevnost, je dosažena po úplném vytvrzení lepidla. [3]

Nejběžnějším typem hybridního spoje je použití lepidla a bodového spoje, jako je například mechanický spojovací prvek (např.: nýt nebo závitové zařízení) nebo bodový svar.

Používá se hlavně pro spojování plechových materiálů, ale existují i aplikace zahrnující vytlačování a tenké odlitky.

Hlavními výhodami kombinace metody bodového spojování s lepidlem jsou:

- výroba spojitých, těsných spojů
- obecně lepší pevnost (jak statická, tak dynamická)
- zvýšená tuhost spojů
- zlepšená odolnost vůči odlupování a nárazům (bodový spoj zabraňuje růstu trhlin v lepené vazbě)
- při ztrátě funkčnosti jednoho typu spoje je stále aktivní druhý typ spoje
- možnosti spojování různorodých materiálů [2]

Další důležitou výhodou je, že okamžitý účinný bodový spoj fixuje polohu komponent, dokud nedojde k vytvrzení lepidla, díky tomu je proces montáže výrazně zkrácen a usnadněn.

Lepidlo se obvykle nanáší na povrchy, které se mají spojit, před tím, než dojde k fixaci bodovými spoji. [2]

Nejběžnější hybridní metody používané pro spojování plechů jsou:

- lepení/lemování
- lepení/ odporové bodové svařování

- lepení/ nýtování
- lepení/ klinčování
- lepení plus další mechanické způsoby spojování (šrouby, atd.)

Za hybridní metodu spojování lze také považovat kombinaci dvou různých typů metod lepení, například kombinace lepidla citlivého na tlak spolu se strukturálními lepidly. Tento postup může nabídnout výhody, pokud jde o zpracování a nosnost, kde je vyžadována vysoká úroveň statické i dynamické mechanické odolnosti. [2]

Lepidla citlivá na tlak můžeme také kombinovat s konstrukčními termosetovými lepidly a vytvořit tak tepelně vytvrditelnou technologii lepení citlivou na tlak. Takzvané pásky pro strukturální lepení vykazují vlastnosti citlivé na tlak při okolní teplotě, ale lze je vytvrdit, za účelem se vytvoření strukturálních vlastností podobné lepidlu při teplotách nad 140°C. [2]

4.1.1 Lepení v kombinaci s lemováním

Zavírací panely, jakou jsou například dveře, kapoty a víka zavazadlového prostoru jsou obvykle vyrobeny z vnějšího panelu, který je lemován (případně přichycen) přes vnitřní panel kolem jeho obvodu. Zatímco technika lemování vytváří dostatečně silné mechanické spoje, dnes se v přírubách široce používají lepidla, která poskytují lepší pevnost, tuhost, odolnost proti nárazu a ochranu proti korozi. [2]

Slepení příruby lemu probíhá v karosárně montážního závodu, tj. před lakováním. Panely karoserie jsou vylisovány a tvarovány z válcovaných plechů, takže mohou být pokryty zbytky různých maziv (válcovací oleje, maziva a nebo tažné směsi). Hliníkové povrchy jsou obvykle opatřeny, a řádně předupraveny pro lepení (vyčištěné a předem naolejované nebo pokryté suchým mazivem). Obecně se však v lisovacím zařízení nepoužívá žádný krok čištění, který by odstranil aplikovaná lisovací maziva. [2]

Lepidlo se nanáší pomocí vířivých, perličkových nebo jemných trysek. Aby se zabránilo „nulové mezeře“ v přírubě lemu, obsahuje většina lepidel s lemovými lemy skleněné kuličky, aby byla zajištěna konstantní vzdálenost mezi vnějším a vnitřním panelem. Poté je umístěn vnitřní panel, vnější panel je ohnut kolem vnitřního panelu a tvoří lemovou přírubu. Velikost kuliček je pečlivě kontrolována, aby vyplňovala linii vazby, a zároveň aby nebyla vytlačena. Lepidla, která uniknou z lepicí linky, mohou zapříčinit kontaminaci zařízení a způsobila by problémy s čistotou a údržbou v montážním závodě. V ideálním případě by přebytečné

lepidlo pomohlo utěsnit řezanou hranu (kde je obnažen holý kov), ale problémy se znečištěním zařízení jsou obvykle považovány za kritičtější. [2]

V této fázi může být zaveden krok vytvrzování, jako je indukční vytvrzování. Může to být úplné vytvrzení nebo jen tolik, kolik je potřeba k zabránění jakémukoliv pohybu vnitřního k vnějšímu panelu během následného zpracování. V závislosti na použitém lepidle udržuje „předželatinace“ indukčním ohřevem lepidlo na svém místě a zvyšuje tak odolnost vůči vymývání lepidla. [2]

Ve většině případů nejsou uzavírací panely spojené lemem s přírubou předem vytvrzeny. Jsou připevněny ke zbytku karoserie v bílé barvě a odeslány do lakovny, kde je karoserie vyčištěna, opatřena základním nátěrem (elektrolytické nanášení filmu na bázi fosforečnanu zinečnatého, včetně vytvrzení v peci) a natřena. Vytvrzování lepidla je dokončeno v lakovacích pecích. [2]

Jedním z důvodů pro použití lepidla v lemovém lemu je omezení nebo vyloučení použití bodových svarů nebo mechanických bodových spojů k držení vnitřních a vnějších panelů pohromadě. Takové bodové spoje jsou někdy patrné na vnějším panelu, což vyžaduje povrchovou úpravu nebo leštění před lakováním. Přesto však obvykle existuje několik zbývajících bodových spojů, které drží panely pohromadě, dokud lepidlo nevytverdne, čímž se snižuje náchylnost lepidla k jakémukoli zatížení odlupováním. [2]

Lepidla s lemy na lemy musí splňovat širokou škálu požadavků. Nesmí narušovat integritu bodových svarů nebo mechanických bodových spojů a nesmí během procesu spojování uniknout a dostat se na spojovací zařízení. Musí vykazovat zlepšené smáčení mazacími fóliemi, aby bylo zajištěno správné spojení příruby lemu na olejových nebo tažených kovech. Zkreslení panelu během vytvrzování musí být minimální, lepidla by měla být tolerantní k přetvrzení během vypalování laku a v neposlední řadě musí vykazovat dobrou strukturální pevnost, vynikající dlouhodobou životnost a odolnost proti korozi. V praxi se používají různé typy jednosložkových nebo dvousložkových lepidel. [2]

4.1.2 Lepení ve spojení s mechanickými bodovými spoji

Hybridní spoje kombinující lepení s bodovými spoji lze obecně vytvořit jedním ze tří způsobů:

1. Metoda „fixace“, při které se lepidlo nejprve nanáší na spojované díly. Jakmile jsou komponenty spojeny, je dokončen bodový spoj. Následuje vytvrzení lepicí vrstvy.

2. Injekční metoda, při které jsou části spojeny bodovým spojem před vstřikováním lepidla do mezery mezi součástmi. Kapilární působení způsobuje, že se lepidlo šíří po celém kloubu. Lepicí vrstva poté ztverdne.
3. V postupné metodě jsou díly spojeny po nanesení lepidla. [2]

Většina průmyslových aplikací využívá metodu „fixace“. Zbylé metody se využívají jen zřídka.

Tyto typy hybridních spojů se obecně používají ke spojování plošných materiálů a zahrnují lepidlo ve spojení s bodovým spojem, jako je mechanický spojovací prvek, klínový spoj nebo třením svařovaný spoj. Lepidlo se nanáší na povrchy, které mají být spojeny, před montáží a fixací pomocí bodových spojů. Podobných výsledků je dosaženo kombinací odporového bodového svařování s lepením. [2]

Lepidla použitá v těchto hybridních vazbách jsou převážně kapalná lepidla jako jednosložková vytvrzování za tepla nebo dvousložková vytvrzovaná epoxidová lepidla při pokojové teplotě. Kombinace adhezivního lepení citlivého na tlak s mechanickým spojováním však může ve zvláštních případech také nabídnout výhody. Mezi zjevné výhody lepidel citlivých na tlak patří vlastnosti rychlé fixace díky lepivosti, snadné nanášení a viskoelastické vlastnosti vytvářející vysokou úroveň odolnosti proti nárazu a tlumení vibrací pro lepené spoje citlivé na tlak. [2]

Hybridní spoje využívající lepicí pásy citlivé na tlak nebo lepicí pásy s vlastnostmi citlivými na tlak v kombinaci s mechanickým spojováním vykazují vynikající vlastnosti, pokud jde o počáteční odolnost proti roztržení a odlupování. Negativní interference lze pozorovat pouze v případě klinčování. Za přítomnosti lepicí pásy citlivé na tlak se nedosáhne správného blokování lisovacího lisu. [2]

Vlastnosti samolepicí akrylové lepicí pásy značně usnadňují celkový proces hybridního spojování. Například kombinace akrylové pásy citlivé na tlak se samonapichovacími nýty vede k hybridním spojům s vynikající odolností proti odlupování bez nutnosti tepelného vytvrzování. Tato praxe se přednostně používá pro montáž dílů v konečné montáži (tj. na lakovaném těle). [2]

4.1.2.1 Lepení a klinčování

V této variantě se bodové spoje vyrábějí pomocí lisovací technologie. Výhodou klinčového lepení je proces studeného spojování, ale ve srovnání s jinými technikami mechanického

spojování je jediným spotřebním materiálem lepidlo, které se nanese na jednu ze spojovaných součástí a tyto dvě položky se umístí k sobě. Spojované součásti jsou poté okamžitě podrobeny procesu lisování, jenž způsobí, že ze spoje vytéká jen určité množství lepidla.

Jakmile dojde ke klinčování, kloub se nechá ztvrdnout. [2]

Je nutná řádná kontrola operace lisování. Existuje riziko vzniku „kapes“, kdy je ještě tekuté lepidlo vytlačeno z místa sevření a nelze dosáhnout požadované upínací síly. [2]

Spojovací spáry nejsou tak silné jako nýtované nebo bodově svařované spoje. Proto se klinčové lepení používá hlavně pro méně náročné aplikace v automobilovém průmyslu, např. pro spojování oceli s hliníkem v oblastech, kde je konstrukční zatížení relativně malé. [2]

4.1.2.2 Lepení a nýtování

Tato kombinace se vyvinula z převládající technologie spojování při výrobě hliníkových konstrukcí karoserie automobilů, zejména při použití hliníkových plechů. [2]

Lepidlo se předem nanese na fayingové povrchy, vytvoří se spoj a vloží se nýty. Lepidlo je vytlačeno samořezným nýtem a obklopuje výsledné mechanické spojení. Ve spoji náročném na lepidlo slouží nýty jako dorazy odloupení, a tím kompenzují inherentní nedostatek lepidla ve výkonu odlupování. Naproti tomu lepidlo vyniká stříhovým výkonem. Čistým výsledkem je spoj, který vykazuje výrazně lepší pevnost ve smyku a odlupování a mnohem lepší životnost při únavě. [2]

Výsledkem je značný potenciál ke snížení tloušťky plechu (a snížení hmotnosti). Nýty vytvářejí bodová zatížení a koncentrace napětí. Materiál mezi spojovacími body přenáší zatížení z jednoho bodu do druhého, ale nepodílí se na „spojování“, i když je součástí „spoje“. Přidáním lepidla přispívá materiál mezi spojovacími body k zvládnutí napětí v celém spoji. Proto je ve strukturálních aplikacích vyžadováno také méně přesné mechanické spojení pro přenos relativně vysokých zatížení bod-bod. Navíc redukovaný kovový rozchod může celkově umožnit vyšší únavovou životnost. [2]

Je třeba řádně kontrolovat následnou operaci mechanického spojování, aby se zajistilo, že škrábání lepidla nevede k místním nedokonalostem. Zvláštní význam má zamezení otevřených kanálů k okrajům švů, protože by mohly způsobit vážné problémy s korozí.

[4]

Kombinace metod lepení a nýtování se rozšířila v moderních karoseriích pro spojování oceli a hliníku. [5]

4.1.2.2.1 Lepení a “slepé” nýtování

Ve zvláštních případech může být užitečná také kombinace lepení se slepým nýtováním. V tomto případě se lepidlo nanáší na jednu z dřívě vyvrtaných součástí. Poté se položky spojí, spoj se slepě nýtuje a lepidlo se nechá vytvrdnout. Pokud se používá dvousložkový lepicí systém, je důležité, aby byl spoj dokončen během doby použitelnosti produktu. Také tento proces spojování způsobuje, že některé lepidlo vytéká ze spoje. [2]

4.1.2.3 Lepení v kombinaci s jinými mechanickými spojovacími prostředky

V zásadě lze všechny typy mechanických spojovacích prostředků kombinovat s lepením. Při konstrukci Lotus Elise se například používaly závitové spojovací prvky v kombinaci se strukturálním lepením. Šrouby drží sestavu pohromadě během vytvrzení lepidla, upínají součásti dohromady, aby poskytly kontakt kov na kov a pomohly odolat odlupovacím silám během nárazu. [2]

4.1.2.4 Lepení v kombinaci s technikami spojování v pevné fázi

Experimentálně byla hodnocena kombinace třecího bodového svařování s lepením. Lepidlo neslouží pouze k lepení, ale také utěsňuje mezeru mezi spojovanými plechy. Pozitivní účinky této hybridní spojovací metody byly pozorovány u odlišných Al / Mg svarů. Zdá se, že lepidlo potlačilo tvorbu velkých křehkých intermetalických sloučenin během procesu svařování. Nejsou však známy žádné další aplikace. [2]

Byly také provedeny experimentální zkoušky kombinující lepení a ultrazvukové svařování s použitím břišních spojů plechů EN AW-6022-T4. Ani v tomto případě však nedošlo k žádnému dalšímu vývoji. [2]

4.1.3 Kombinace lepení a tavného svařování

4.1.3.1 Lepení v kombinaci s odporovým bodovým svařováním (Weldbonding)

Weldbonding je hybridní metoda montáže, která zahrnuje jak procesy svařování, tak lepení. Tvrdí se, že poskytuje výhody obou procesů při minimalizaci nevýhod. Výhody okamžité pevnosti a vysoké odolnosti proti odlupování poskytované svary doplňují adhezivní výhody rovnoměrného rozložení napětí, odolnosti proti únavě a vibracím, zlepšené pevnosti a trvanlivosti a flexibility designu. [6]

Weldbonding, který byl původně vyvinut v bývalém Sovětském svazu a používán při výrobě dopravních letadel, postupem času si našel cestu také do automobilového průmyslu. Ve srovnání se samotným bodovým svařováním nebo lepením nabízí následující výhody:

- Zvýšená vytrvalostní únava, protože je snížen faktor koncentrace stresu v kloubu.
- Vylepšená absorpce energie.
- Vylepšená odolnost vůči životnímu prostředí.
- Vylepšená tolerance přechodných odchylek při zvýšené teplotě.
- Úspory nákladů lze dosáhnout ve srovnání se samotným lepením. Bodový svar upne spoj tak, že není nutné nákladné obrábění.
- Weldbonding automaticky zajišťuje funkci utěsnění spáry, která u mechanicky upevněných spojů vyžaduje další postup.
- Napětí ve svařovaných spojích jsou nižší a rovnoměrnější než u srovnatelných bodových svařovaných spojů. To zajišťuje pro danou konstrukci spoje zvýšenou pevnost ve smyku v tahu a / nebo vzpěru v tlaku. Přítomnost bodového svaru poskytuje ve srovnání se samotným lepením lepší schopnost přenášet zatížení mimo rovinu. [2]

Weldbonding lze plně automatizovat a využívat pomocí robotických systémů. Úspěšně byl aplikován na hliníkové a ocelové podklady o tenkém rozměru a v menší míře na titan. [7],[8]

Kombinace lepení a odporového bodového svařování umožňuje návrháři k maximalizaci výkonu vozidla (např. torzní tuhost karoserie, únavu, snížení hmotnosti atd.) při zachování relativní snadnosti a rychlosti montáže.

Jedná se o jednu z nejběžnějších technologií hybridního spojování používaných ve výrobě velkoobjemových automobilů (speciálně pro automobily náročné na ocel). Dominantní společná konfigurace, která se skládá z normálně překrývaných listů, je velmi vhodná pro oba procesy buď jednotlivě, nebo v kombinaci. Proces svařování je obecně plně automatizovaný a využívá robotický proces dávkovacími systémy. Dnes se používají spíše strukturální lepidla, než lepidla s nízkou pevností nebo tmely. [2]

Lepidlo se obvykle nanáší na jeden list v oblasti, která má být spojena. Po sestavení se odporové bodové svary provádějí přes lepidlo. Před skutečným zahájením svařování vytlačuje síla elektrody lepidlo, aby se získal elektrický kontakt mezi plechy a svar lze tak vyrobit běžným způsobem. Místní zahřátí generované během bodového svařování způsobuje jen omezené poškození kolem svaru. Nakonec je lepidlo vytvrzeno a montáž dokončena. [2]

Normálně se používají tepelně vytvrzující lepidla pastového typu, protože jsou stabilní a mají konzistentní viskozitu při pokojové teplotě. Typicky jsou taková lepidla vytvrzována v laku pečící trouby až do 180 ° C po dobu 30 minut. Některá lepidla jsou k dispozici také ve formě pásky a obsahují plnivo kovových částic, které umožňuje vytvoření počátečního elektrického kontaktu pro bodové svařování. [2]

V automobilových aplikacích jsou lepidla a těsnicí materiály svařeny, aby se zlepšila pevnost spoje, rozložení zatížení, únavové vlastnosti a utěsnění spoje. Zatímco u ocelových materiálů, nenarazíte na žádné zvláštní obtíže, bylo zapotřebí určité vývojové práce pro slitiny hliníku. Stav povrchu (nebo předchozí povrchová úprava) hliníkových plechů musí být správně vybrána, aby byla zajištěna dlouhodobá trvanlivost lepidla, zejména v obtížných servisních podmínkách, ale nesmí se zasahovat do procesu bodového svařování. Bylo zjištěno, že je nezbytný speciální, přísně kontrolovaný krok povrchové úpravy hliníku požadované konzistentní kvality povrchu, která zajišťuje dlouhodobou trvanlivost lepených spojů v nepříznivém prostředí (např. v přítomnosti vlhkosti, zejména při zatížení), ale přesto nabízí požadovaný bodový svařovací výkon (kde je obvykle nízký odpor nutný). Aby bylo zajištěno správné vyplnění spáry lepidlem, je nutná dobrá kontrola procesu svařování. V procesu svařování mohou být obrobky a nástroje více náchylné ke kontaminaci v důsledku vytlačení lepidla ze spáry. Také je třeba vzít v úvahu otázky bezpečnosti a ochrany zdraví spojené s používáním lepidel. Jejich svařování může vytvářet nebezpečné výpary, proto je třeba použít vhodné ventilační a odsávací systémy. [2]

Úspěch kroku odporového bodového svařování závisí především na síle aplikované elektrodami k přemístění lepidla před jeho zahájením (během „doby stlačování“). Proto je třeba učinit několik konkrétních doporučení:

- Elektrody sférického tvaru napomáhají toku lepidla z místa svaru.
- Doba stlačení musí být dostatečně dlouhá, aby umožnila tečení lepidla (obvykle ~ 1 s).
- Teplota silně ovlivňuje viskozitu lepidla. Příliš nízké teploty (teploty okolí nebo chlazení vodou) znesnadňují přemístění lepidla.
- Výhodou může být profil svařovacího proudu, který využívá předehřátí k zahřátí lepidla před svařováním. [2]

4.1.3.2 Lepení v kombinaci s jinými svařovacími procesy

Obloukové nebo paprskové svařování lze použít k výrobě housenek, které spojují horní a dolní plechy. Různé hybridní procesy spojování svarem byly hodnoceny s omezeným úspěchem.

Jako příklad byla zkoumána kombinace procesu bodového svařování modifikovaným kovovým inertním plynem (MIG) s lepením. V dalším experimentu byl ke svařování hořčíku použit proces „Plazmového obloukového svařování“, kombinace plazmového obloukového svařování a lepení. Bylo zjištěno, že přítomnost mezilehlé vrstvy hrála důležitou roli.

Existence adhezivní vrstvy však neměla jen výhody, ale také některé nevýhody. Během tavného svařování se lepidlo rozkládá a vytváří množství produktů rozkladu. Výsledkem je značná pórovitost svaru, a tím pokles vlastností svarového spoje. [2]

Další hybridní koncept spojování, nazývaný laserové spojování svarem, byl testován spojením hořčíkové slitiny AZ31B (horní list) s hliníkovou slitinou EN AW-6061 (spodní list). Tvorba křehkých intermetalických fází ve fúzní zóně by mohla být účinně omezena. Zdá se, že stoupající páry lepidla brání pohybu kapalného hořčíku směrem dolů. Svar je tedy složen z dvoufázové směsi s méně intermetalickými sloučeninami a pevnějším roztokem.

Proces sestává ze čtyř fází:

1. roztírání lepidla na spodní povrch listu
2. vyvíjení tlaku a montáž
3. laserové (bodové nebo švové) svařování
4. vytvrzování lepidlem.

Hybridní montážní proces, který kombinuje laserové svařování a lepení („Laser weld bond“) k vytvoření vyšší pevnosti ve smyku a odlupování ve srovnání s konvenčním svařováním nebo samotné lepení bylo rovněž hodnoceno ve výrobě letadel.

Ukázalo se, že proces laserového svařování je životaschopnou alternativou spojování vyrábět pevnosti spojů, které přesahují požadavky na pevnost spojů cílového nýtu.

Koncepty kombinující procesy lepení a svařování obloukem nebo paprskem v této práci popsane ještě dnes, nejsou připraveny pro praktické použití v automobilovém průmyslu. Je nutný další vývoj.

[2]

4.1.4 Injekční spojovací prostředky pro lepení

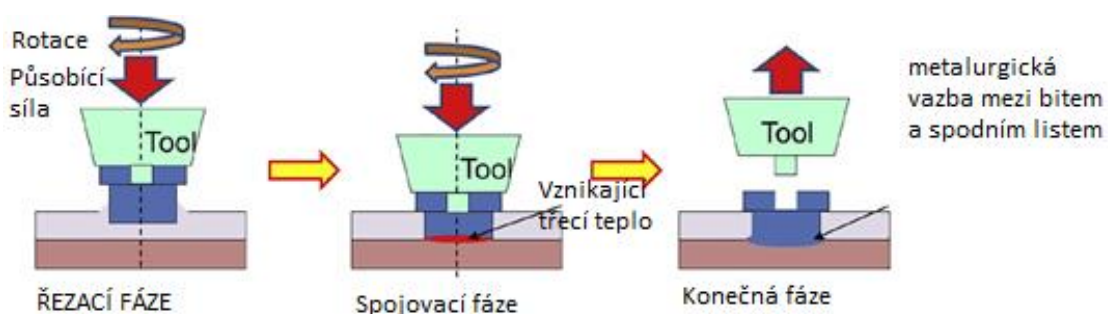
AdhFAST®, objevený společností TWI, je hybridní spojovací technologie, která se liší od výše popsaných metod tím, že se lepidlo zavádí do spoje po sestavení konstrukce pomocí spojovacích prvků. Lepidlo se vstříkuje do spáry pomocí speciálně navržených spojovacích prostředků, které obsahují prostředek pro řízení vzdálenosti mezi horním a spodním podkladem. To poskytuje větší kontrolu nad tloušťkou spojovacího vedení, a tím i lepší spolehlivost procesu a kvality spoje, maximalizující výhody technologie hybridních spojů. Konstrukce spojovacího prvku je velmi flexibilní a musí umožňovat pouze tři funkce: zadržování, rozteče a vstřikování. Vstřikování lepidla lze provádět ručně nebo automatizovaným způsobem. Zatím nejsou ovšem známy žádné automobilové aplikace. [9]

4.2 Metody spojování využívající nýtování

4.2.1 FBJ metoda (Friction bit joining)

Metoda používaná ke spojování různých materiálů (hliníku s pokročilými vysokopevnostními ocelmi).

Proces spojování za pomoci třecích bitů. V tomto procesu jsou vrstvy plechu umístěny přes sebe. Poté je bit přiváděn při určité rotaci do dílu. Dojde tak k proříznutí horní vrstvy a ke kontaktu se spodním materiálem během pokračujícího axiálního pohybu. Teplo uvolněné třením a aplikovaný tlak materiály změkčuje. V této fázi se otáčení zastaví a pohon se odpojí, tím je bit metalurgicky spojen s materiálem spodní vrstvy a mechanicky připevněn k horní vrstvě materiálu. Schéma metody FBJ můžeme vidět na obr. 1. [10]

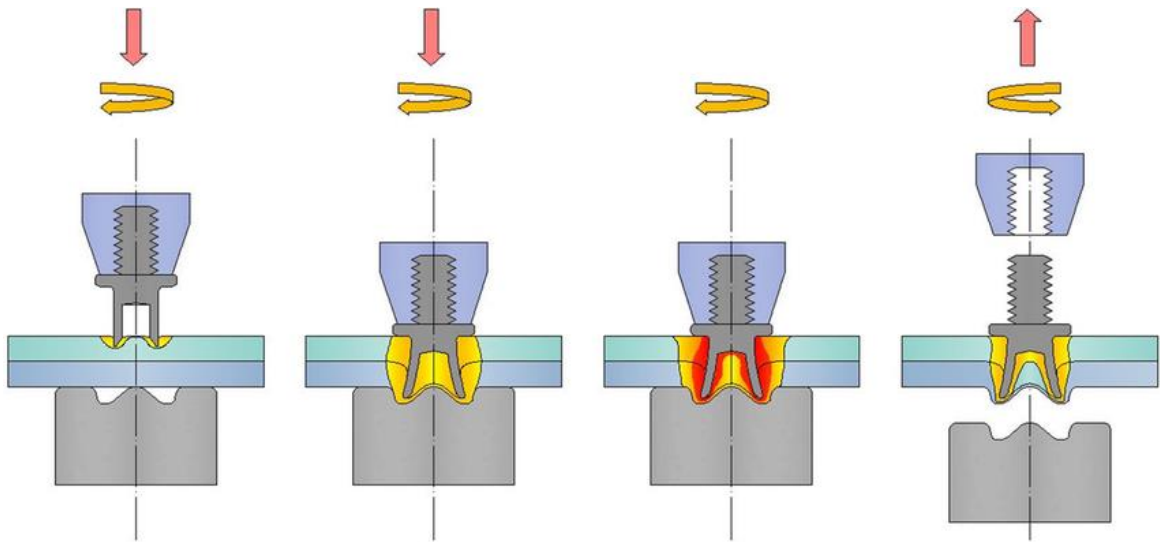


Obrázek 1 FBJ metoda [10]

4.2.2 F-SPR metoda (Třecí samořezné nýtování)

Spojení lisování a nýtování. Kombinace metod SPR a FSSW.

V tomto procesu (obr. 2) je nýt vražen do materiálu, tak je vytvořeno třecí teplo mezi nýtem a okolními plechy. Jakmile stopka nýtu plně vstoupí do plechu, zastaví se pohyb rotujícího nýtu směrem dolů. V závěrečné fázi procesu se otáčení nýtů zastaví a nýtovací zařízení se odpojí. [2],[10]



Obrázek 2 F-SPR metoda [26]

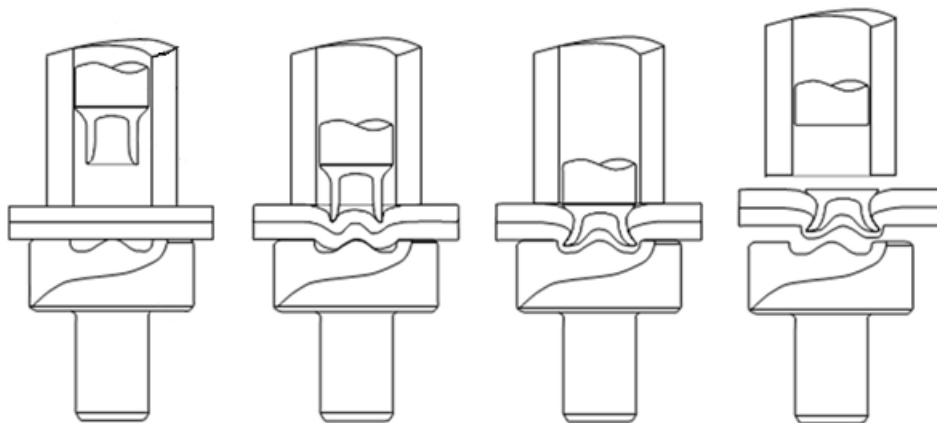
4.2.3 SPR metoda (Self-piercing riveting)

Samořezné nýtování bylo poprvé použito začátkem 90. let ke spojování hliníkových panelů u Audi A8.

Technika tváření za studena, která se používá k mechanickému upevnění dvou nebo více vrstev materiálu pomocí nýtů. Nýt prorazí horní list a spojení se dosáhne zajištěním nýtu do spodního plechu. Tato technika (obr. 3) je rozdělena do následujících fází:

1. Plechy, které mají být spojeny jsou sevřeny dohromady mezi držákem polotovaru a protlačovací matricí.
2. Polotrubkový nýt je posouván pod razníkem podávacím systémem. Razník je poháněn dolů pomocí hydraulického nebo elektrického systému, tím tlačí nýt přes vrstvy materiálu.
3. Nýtovací fáze. Dřík nýtu působí jako střížník, který proniká do celé tloušťky vrchního plechu. Spodní vrstva je propíchnuta pouze částečně, dokud nýt nereaguje na vliv matrice.

4. V tomto bodě nýt pronikne do matrice a vytvoří mechanický spoj. Působící síla způsobí, že spodní vrstva se plasticky deformuje a pronikne do dutiny formy. Výsledkem je, že spodní vrstva se přizpůsobuje tvaru dutiny a vytvoří dno knoflíkové dírky.
5. Uvolnění spojených vrstev materiálu. [11]



Obrázek 3 SPR metoda [27]

4.3 Metody využívající svařování

Další důležitá skupina technik hybridního spojování zahrnuje kombinaci dvou různých metod svařování. Tato kombinace se většinou používá v konstrukčních aplikacích za účelem spojení silnějších plechových materiálů, výlisků či odlitků. Díky této kombinaci je možné dosáhnout optimální kvality svaru a rychlosti svařování využitím výhod jednotlivých podprocesů. Ačkoli pojem hybridního svařování v zásadě zahrnuje jakoukoli jinou kombinaci svařovacích technik (například plazmový oblouk/MIG, plazmový oblouk/ laserové svařování), v praxi se používá metoda MIG rozšířená o laserový svařovací proces.

Kombinace metody mechanického a fúzního spojování ve formě hybridní technologie má malý praktický význam, ačkoliv kombinace některých technik mechanické fixace a následného procesu fúzního svařování by mohla být považována za sekvenční hybridní spoj.

[2]

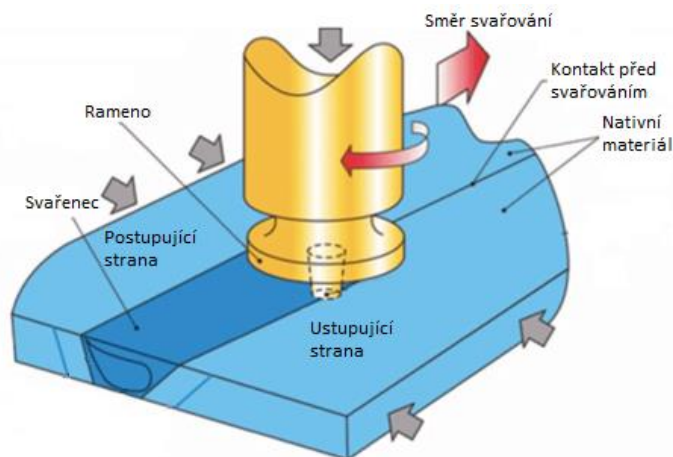
Postupné použití dvou různých metod mechanického spojování lze v praxi pozorovat poměrně často. Používá se pouze jeden případ současného použití dvou různých metod mechanického spojování. [2]

Termín „hybridní svařování“ se často používá k popisu svařovacího procesu Laser-MIG, ale jsou také další kombinace technik svařování používané v praxi (např. plazmový oblouk a MIG svařování).

Kombinace dvou svařovacích technik umožňuje využití výhod co nejvíce snížit negativní faktory jednotlivých technik. Je však je důležité si uvědomit, že techniky hybridního spojování je třeba přizpůsobit každému konkrétnímu případu má-li být dosaženo maximální spolehlivosti. Dobrým příkladem je vliv na profil svaru. [2]

4.3.1 FSW metoda (Friction stir welding)

Tato metoda otevírá možnosti pro spojování různých komponentů, tam kde náklady zakazují použití spojovacích prostředků, lepidel či nýtů. Protože FSW (Třecí bodové svařování) nezahrnuje objemové tavení komponent (nejvyšší teplota FSW je přibližně 0,6-0,9 bodu tání materiálu ve stupních Kelvina. Patří mezi nejvhodnější svařovací techniky pro spojování různých druhů materiálů (např. ocel a hliník). V automobilovém průmyslu byla aplikace metody FSW zaměřena na tři obecné oblasti. Mezi ně patří spojování extrudovaných dílů za účelem vytvoření „větších profilů“, spojování svařovaných polotovarů na míru a bodové svařování pro různé montážní aplikace. FSW, jehož schéma můžeme vidět na obr. 4, nabízí v každém z těchto příkladů řadu výhod a potenciál pro snížení nákladů. Avšak nákladově efektivní a spolehlivé spoje mezi lehkými materiály budou vyžadovat významný vývoj. FSW je termomechanický svařovací proces, při kterém se rotující válcový svarový nástroj obsahující osazení nástroje a kolík (pin) sondy pohybuje podél svařovací oblasti spojovaného obrobku. Nejprve je kolík sondy ponořen do oblasti svaru obrobku, tak se generuje třecí teplo. Při dalším ponoření svarového nástroje se vytvoří další třecí teplo, kdy se rotující osazení nástroje dostane do kontaktu s horní plochou obrobku. Toto teplo je dostatečné pro změkčení materiálu kolem čepu sondy a pod osazením nástroje. Kombinované působení kolíku sondy a osazení nástroje vede k silné plastické deformaci a toku plastifikovaného kovu, ke kterému dochází při pohybu nástroje podél oblasti svaru. V procesu FSW se materiál dopravuje z přední části nástroje k zadní hraně, kde síla nástroje směrem dolů kuje obrobek. [2],[12]



Obrázek 4 FSW metoda [28]

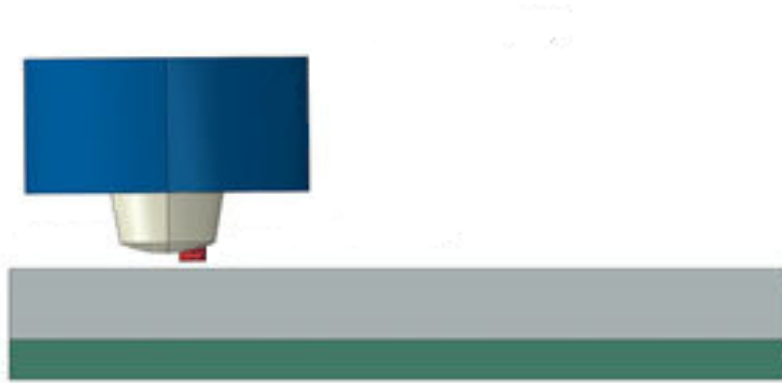
4.3.1.1 FSS metoda

Derivace metody FSW. Používá upravené nástroje na svařování oceli a hliníku. Nástroj se skládá z ofsetové jehly na vrchní části špičky nástroje. Jehla je v podstatě přitlačena do předvrtaného otvoru na sondě. Během vlastního kontaktu, materiál s nejnižším bodem tání (hliník) je umístěn na vršek materiálu s vysokým bodem tání (ocel). Posléze během spojovací fáze řezací část nástroje prořezává materiál s vyšší teplotou tání, který je umístěn pod materiál s nízkou teplotou tání. Jak se nástroj otáčí a posouvá dopředu (viz. obr. 6), průřez ve spodním materiálu vytváří mikroskopické háky (kotvy) a ty mechanicky blokují rozhraní mezi horním a dolním plechem. V tomto případě řezačka interaguje hlavně se spodním plechem, během toho je horní rameno nástroje v kontaktu s horním listem. To má za následek plastickou deformaci při nízkém bodu tání a řezání materiálu s vysokým bodem tání dole. Tento fenomén je hlavní výhodou procesu FSS, protože se díky němu dá vyhnout tvorbě prázdných míst během spojování materiálů, které mají velké odlišnosti ve svých fyzikálních vlastnostech (teplot tání), příklady použití metody můžeme vidět na obr. 5. Tento proces byl využit například při spojování



Obrázek 5 Příklady použití FSS metody [10]

hořčíkové slitiny a zinkem potažené vysokopevnostní nízkolegované slitiny a také hliníku a měkké oceli. Bylo vyzkoušeno mnoho různých parametrů svařování, včetně různé rychlosti posuvu, otáčení a také hloubky. Z toho byly nalezeny optimální svařovací parametry, díky kterým bylo dosaženo perfektních svarů. [13],[14]



Obrázek 6 FSS metoda [29]

4.3.2 MIG plazmové svařování

MIG plazmové svařování je vysoce výkonný svařovací proces, který byl vyvinut speciálně pro svařování hliníku. Kombinace MIG a plazmového obloukového svařování dosahuje zvýšení rychlosti tavení přídavného drátu přidáním plazmového oblouku a umožňuje lepší předehřátí obrobku a přídavného drátu, tím se zabrání defektům za studena při zahájení svaru. Pro ruční svařování je to však nevhodné z důvodu požadovaných velkých svařovacích hořáků. [2]

Tento proces je variací metody svařování MIG, při které je oblouk MIG zúžen pomocí plazmového plynu. Na rozdíl od konvenčních hořáků MIG má plazmový hořák MIG druhou vnitřní, vodou chlazenou trysku, kterou proudí plazmový plyn. MIG elektroda je umístěna ve středu a prstencová elektroda, ve které je generován plazmový oblouk, je umístěna po obvodu. Plazmový plyn, obvykle argon, je ionizován vysokofrekvenčními impulsy mezi drátem a plazmovým obloukem, zapálí pilotní oblouk, který pak ionizuje celý sloupec plynu mezi plazmovým obloukem a obrobkem. Stejně jako při svařování MIG funguje vnější vrstva plynu jako štít pro plazmový oblouk, aby se zabránilo roztavenému kovu reagovat s okolním vzduchem. [2]

Tavná síla svařovacího oblouku MIG se zvyšuje přidáním plazmového oblouku. Plazmový oblouk dále předehřívá obrobek a drát, tak se zabrání defektům za studena (bez fúze) na začátku svaru. „Horký“ drát lze přivádět vyšší rychlostí, následkem je vyšší tavicí výkon. Vyšší tepelný příkon zlepšuje přemostění mezery, ale může také vést k tepelnému zkreslení

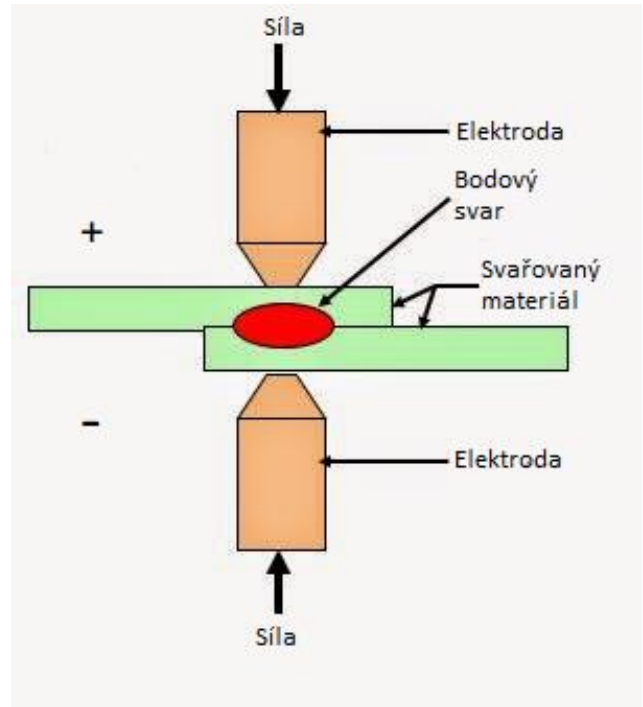
obrobku. Proces plazmového svařování MIG se tedy používá pouze ve zvláštních případech (např. Při svařování hliníkových komponent s velkou tloušťkou stěny).

V technologii Super-MIG® se používá mírně odlišná konfigurace oblouku. Tato hybridní svařovací technologie kombinuje plazmový oblouk a techniku plynového kovového oblouku do jednoho funkčního svařovacího systému. Poskytuje možnosti svařování, které nejsou k dispozici u každé ze dvou svařovacích technologií samostatně. Zařízení kombinuje plazmový hořák a MIG hořák v jednom zpracovatelském hořáku. Osy nespoteřovatelné elektrody (plazmový oblouk) a spotřební elektrody (MIG oblouk) jsou umístěny v ostrém úhlu obráceném k obrobku. Plazmový oblouk ve vedoucí poloze tedy vytváří klíčovou díрку a následující oblouk MIG pracuje typicky v režimu vodivého svařování, aby vyplnil mezeru vytvořenou plazmovým obloukem. Čistým výsledkem je, že hybridní proces se spoléhá na plazmový oblouk pro hluboké proniknutí a vysokou účinnost oblouku a rychlost nanášení kovu procesu MIG pro dokončení svaru. [2]

Interakce mezi tokem plazmového oblouku a obloukem MIG podporuje ohřev drátu a přenos proudu na anodovém místě (na konci plnicího drátu MIG), kde se tvoří kapičky roztaveného svarového kovu a následně se oddělí. Hybridní proces používá pro dosažení maximální rychlosti zpracování a pro provoz v režimu přenosu postříku elektrody se záporným plazmovým obloukem a kladnou MIG elektrodu. Magnetická síla způsobuje vychýlení plazmového oblouku směrem k přední části svarové lázně, tak kompenzuje přirozenou tendenci plazmového oblouku postupovat za osou hořáku během vysokorychlostního svařování. Výsledným efektem je zvýšení tuhosti a stability plazmového oblouku, vedoucí ke zvýšení hloubky průniku a rychlosti svařování ve srovnání s konvenční technologií MIG. [2]

4.3.3 RSW (Resistance Spot Welding)

Odporové bodové svařování je dominantní metoda pro spojování ocelových karoserií. Tato metoda (viz. obr. 7) není vhodná k spojování oceli a hliníku. Tento typ hybridního spoje by měl být zvolen pouze v případě, že existuje jen možnost dodatečného úplného vytvrzení lepidla při vysoké teplotě. Spoj může vydržet mnohem větší napětí před selháním kvůli homogennímu rozložení napětí na rozdíl od vlastního bodového svařování. Může se také zlepšit celková tuhost součástí a odolnost proti nárazu, pokud je vybráno tvrdé lepidlo a je použito se správnými součástmi. Nevýhody spočívají v tom, že konstrukce je třeba od začátku navrhovat s ohledem na lepení, a to vyžaduje pečlivé plánování, dobrou kontrolu procesu a specializované procesní vybavení. [4]

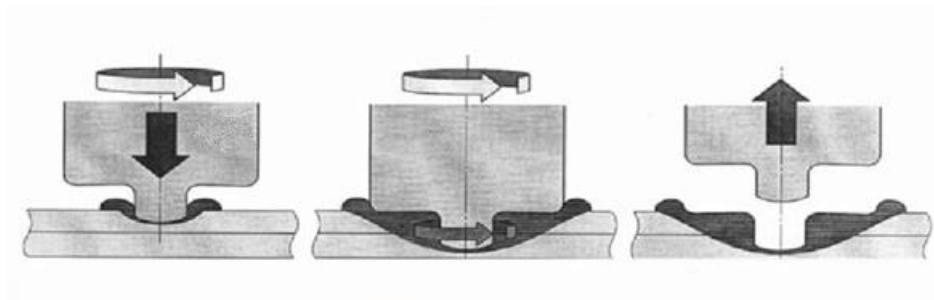


Obrázek 7 Odporové bodové svařování [30]

4.3.4 SSW metoda (Friction Stir Spot Welding)

Třecí bodové svařování je relativně nová alternativní technologie pro spojování vícevrstevných struktur (hliník s ocelí).

Používá se k výrobě bodových svarů překrývajících se plechů. U bodových svarů je svarový nástroj ponořen do vrchního plechu do kontrolované hloubky, zatímco kolík nástroje zcela proniká do horního plechu a částečně do spodního překrývajícího se plechu. Třecí teplo generované mezi osazením nástroje a horním plechem, spolu s míchacím účinkem čepu nástroje ve spodním plechu, plasticky deformuje překrývající se plechy a vytvoří spojení v pevné fázi (viz. obr.8). [12],[15]



Obrázek 8 FSSW metoda [31]

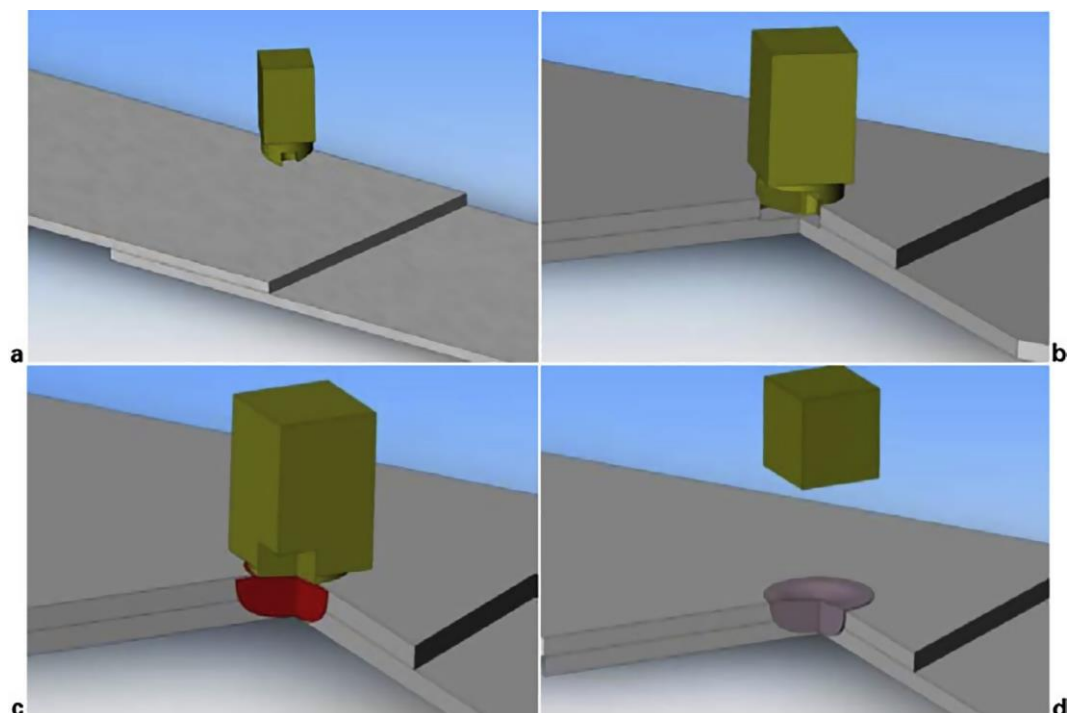
4.3.4.1 FSSW metoda s přidaným stlačením materiálu

Byla vyvinuta pro účely eliminace odsazení nebo důlků vznikajících na povrchu při použití konvenčního bodového svařování. Použití této techniky je vhodné nejen pro spojování hliníkových slitin a oceli, ale je možná nejzajímavější aplikace, která se týká spojování polymerních kompozitů s hořčíkem. [16],[17]

4.3.4.2 ABC-FSSW metoda

Používá se pro svařování hliníkové slitiny o tloušťce jeden milimetr s nízkouhlíkovým ocelovým plechem.

Zajímavou alternativou FSSW je metoda spojení FSSW v kombinaci s abrazivním kruhem. Tato metoda byla úspěšně přizpůsobena pro rychlé svařování s přesahem 1 mm tlusté hliníkové slitiny s nízkouhlíkovou ocelí (viz. obr.9). Během tohoto procesu se v konfiguraci s překrytím používá nástroj s kolíkem, který mírně proniká do ocelového plechu v místě kde je ponořen do hliníkového plechu. Poté se pohybuje po kruhové dráze s rádiusem ekvivalentnímu průměru sondy, aby vytvořil souvislou spojenou oblast. Nástroj se poté přesune do středu kruhu a odpojí se, aby získal osově symetrický tvar. Bylo dokázáno, že tento proces je efektivní technikou k vytvoření metalurgických spojů mezi různorodými slitinami ve chvíli, kdy se nástroj pohybuje po kruhové dráze a může být použita sonda pro čištění oceli na celé ploše a odhalení povrchů bez oxidů během svařování. Přenos elektronového mikroskopu na rozhraní spoje neodhalil žádnou intermetalickou reakční vrstvu, díky pevnému svaru. Silná metalurgická vazba a prostředí bez IMC přispívají k možnosti dosažení vysokých pevností svarů. [18]



Obrázek 9 ABC-FSSW metoda [10]

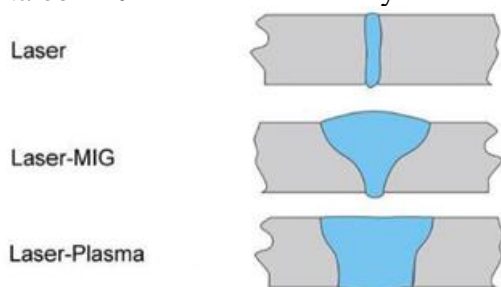
4.3.5 TWB metoda (Tailored welded blanks)

Metoda svařování vyvinutá pro automobilový průmysl, kombinující různé druhy ocelí, nebo Al-slityny ale ne spolu dohromady o odlišných tloušťkách, pevnostních vlastnostech (Re), či povrchových úpravách na sestavení velkého svařence. Používání TWB metody svařování dochází ke snížení hmotnosti karoserie a tím i snížení ceny za použitý materiál. Metoda TWB kombinuje několik typů svařování, z nichž se především využívá svařování laserem a odporové bodové svařování.

TWB jsou polotovary svařovaných desek dohromady za účelem vytvoření jediného polotovaru pro následující tvářením kovů (tažení nebo ražení). [19],[20]

4.3.6 Hybridní svařování za použití laseru

Na obr. 10 můžeme vidět svary vzniklé vybranými druhy metod.



Obrázek 10 Schéma svarů jednotlivých kombinací [10]

4.3.6.1 Laser – obloukové svařování

Kombinace laserového světla a elektrického oblouku do procesu hybridního svařování existuje od 70. let, ale zavedení do průmyslových aplikací nějakou dobu trvalo. Hybridní laserový oblouk svařování je proces spojování, při kterém se provádí obloukové svařování a laserové svařování současně, ve stejné svarové lázni a ve stejné svařovací operaci.

Protože laser je primárně zvyklý zajistit schopnost hlubokého průniku, energeticky náročné laserové zdroje (CO₂, Nd: YAG, dioda, vlákno atd.) jsou přednostně kombinovány s jakýmkoli svařovacím procesem (MIG svařování, TIG svařování, plazmové svařování).

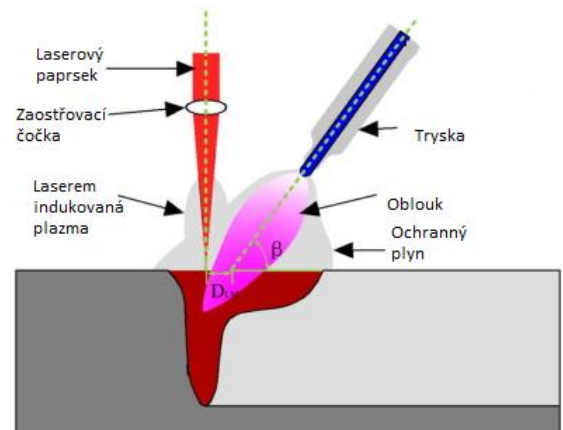
Hybridní laserové svařování MIG (často také označované jako GMA) a laserové svařování TIG (často označované jako GTA) jsou však možná nejběžnějšími kombinacemi.

Hybridní proces vykazuje jednotlivé výhody svařovacího procesu laserovým paprskem i obloukem, pokud se provádí samostatně. Lze vytvořit svary s hlubokým průnikem srovnatelné s laserovými, ale zároveň je tolerance ke spojení spojů a výsledný profil svaru srovnatelnější s obloukovými svary. Dále lze použít spotřební materiál pro obloukové svařování (a směsi plynů), které vede k vyššímu stupni kontroly kvality a vlastností svaru než při laserovém svařování. [2]

Při hybridním svařování dodává laserový paprsek teplo do svarového kovu v horní části švu, kromě tepla z oblouku, tj. oba procesy svařování působí současně ve stejné zóně procesu. V závislosti na tom, který oblouk nebo laserový proces se používá, a v závislosti na parametrech se procesy budou navzájem ovlivňovat v různé míře a různými způsoby. Také charakter celkového procesu lze ovlivnit ve větší či menší míře buď laserem, nebo obloukem. [2]

Existuje také možnost postupné konfigurace, kdy dva samostatné svařovací procesy působí postupně, ale stále ve společné svarové lázni. V tomto případě se největšího efektu dosáhne, pokud se k vytvoření kořenového průchodu použije laserový paprsek a k vyplnění průchodu se použije obloukové svařování MIG nebo TIG. Tam, kde existují dva samostatné svary, následný tepelný vstup z oblouku znamená, že oblast svařovaná laserovým paprskem je po svaru tepelně zpracována. [2]

Největší potenciál hybridního svařování laserovým obloukem je v přidavku přídavného materiálu. Proto je hybridní svařovací proces kombinace laser a MIG (viz.obr. 11) v současnosti nejpreferovanější metodou hybridního svařování laserovým obloukem. Použitím procesu MIG (kontinuální nebo pulzní oblouk) jako procesu oblouku při laserovém hybridním svařování lze zvýšit schopnost přemostění mezery, protože je lépe kontrolováno přidávání přídavného kovu a objem přídavného kovu může být vyšší než při použití studeného drátu společně s plazmou nebo obloukem TIG. [2]



Obrázek 11 MIG v kombinaci s laserem [32]

4.3.6.1.1 Laser - MIG svařování

Laser-MIG obloukové hybridní svařování je nový a efektivní svařovací proces, který organicky kombinuje laserový zdroj tepla a zdroj elektrického oblouku. Má výhody jak laserového svařování, tak i obloukového svařování [21]

Efektivním využitím laserového zdroje tepla lze udržovat stabilitu oblouku při zvyšování rychlosti svařování a současně lze řešit problém nedostatečného průniku obloukového svařování. [22]

Na druhé straně může použití zdrojů elektrického oblouku vyřešit problém špatné přizpůsobivosti laserového svařování za podmínek obrábění s velkou mezerou. Může také zlepšit špatný svařovací účinek laseru na vysoce reflexní materiály. [23], [24]

Proto může hybridní technologie svařování laserem-MIG oblouku splňovat požadavky na zpracování velkých mezer a vysokých rychlostí svařování v průmyslové výrobě. Při zlepšování efektivity výroby může snížit požadavky na přesnost upnutí v průmyslové výrobě a v konečném důsledku stále získat dobré výsledky svařování. Díky těmto výhodám se stala jednou z nejslibnějších a nejučinnějších svařovacích technologií v průmyslu. [25]

Laser a MIG oblouk mají společnou procesní zónu a svarovou lázeň. Proces lze řídit takovým způsobem, že svařovací technika MIG poskytuje vhodné množství roztaveného výplňového materiálu k překlenutí mezery a uzavření spoje, zatímco laser poskytuje vysoké výkonové

hustoty potřebné k zajištění požadované hloubky penetrace a umožní vyšší rychlosti svařování. Hybridní technika je tedy rychlejší než samotné svařování MIG a spojené komponenty podléhají menšímu zkreslení. [2]

Jakmile laserový paprsek narazí na povrch materiálu, odpaří na něm skvrnu. Ve svarovém kovu se vytváří parní dutina díky unikající kovové páře, která vytváří hlubokou a úzkou zónu ovlivněnou teplem. Použití drahé laserové energie je omezeno téměř výlučně na efekt hlubokého svařování, který také umožňuje spojovat silnější plechy. Zbývající spotřebu energie splňuje levnější proces MIG, jehož tavicí elektrody současně poskytují lepší schopnosti překlenout mezeru. Jelikož oba procesy zaměřují svoji energii na stejnou zónu zpracování, hloubka a rychlost svaru se výrazně zlepšila ve srovnání s jednotlivými procesy. V závislosti na zvoleném poměru dvou vstupů energie lze charakter celkového procesu určit ve větší či menší míře buď laserem nebo obloukem. [2]

U hybridního svařování musí být obloukový hořák orientován s plošším úhlem než u běžného obloukového svařování, protože laserový paprsek může zasahovat do plynové trysky, pokud je obloukový hořák příliš blízko k laserovému paprsku. [2]

Laser - MIG hybridní svařování je vhodné pro aplikace, které používají průmyslové roboty (viz. obr. 12), protože potenciál, který nabízí tento vysoce výkonný proces, mohou využít pouze automatizované aplikace. Srdcem hybridního svařovacího systému je kompaktní svařovací hořák s integrovaným systémem MIG a laserovou optikou. Držák robota dává svařovací hlavě flexibilitu pro přístup k obtížně přístupným oblastem obrobku. Plnicí drát lze umístit do libovolné polohy vzhledem k laserovému paprsku, což umožňuje přesné přizpůsobení procesu spojování s širokou škálou příprav švů, výstupů, typů vodičů, druhů drátů a spojovacích úkolů. K ochraně laserové optiky před poškozením rozstříkem při svařování je nutné potažené ochranné sklo. Aby se zabránilo znečištění ochranného skla rozstříkem, používá se k odvrácení rozstříku příčný paprsek, aby jej bylo možné odsávat potrubím pro odvod vzduchu. Na pracovišti zůstávají nečistoty a výpary ze svařování. [2]



Obrázek 12 Svařovací robot [2]

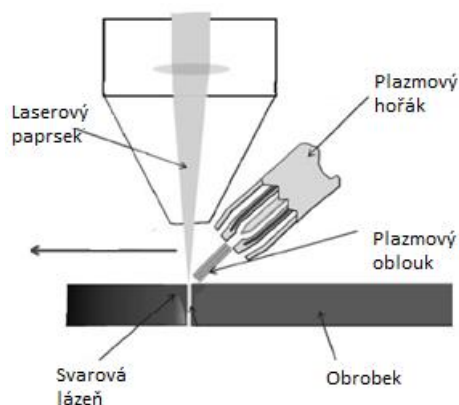
Hloubka průniku svaru i rychlost svařování jsou v kombinovaném procesu větší, než když je některý z procesů použit samostatně. Laserové - MIG hybridní svařovací proces je vhodný pro širokou škálu materiálů a tloušťek. Je zvláště vhodný pro svařování součástí tam, kde je tolerance a doba přípravy nevhodná pro laserové svařování. Dalším pozitivním aspektem je relativně nízký tepelný příkon a snížené množství ochranného plynu. Na jedné straně vysoce pevné materiály nevykazují téměř žádnou ztrátu pevnosti, zatímco na druhé straně nízké úrovně tepelného zpoždění znamenají vylepšenou přesnost. [2]

Laser - MIG hybridní svařování vyžaduje nižší požadavky na toleranci pro přípravu hran (nízká citlivost na změnu šířky mezery), laserové svařování vede ke zlepšení kvality svarového švu (méně vývrtů, pórovitost, podříznutí, praskliny tuhnutí, lepší kvalita povrchu švu) než svařování laserem nebo MIG samostatně a vytváří hladší přechody tloušťky a povrchy patek než samotným laserem. [2]

4.3.6.1.2 Laserové - plazmové obloukové svařování

U hybridního svařování laserem a plazmou se laserový paprsek a plazmový paprsek spojí dohromady v oblasti procesu poblíž obrobku. Plazmový hořák je obecně umístěn v úhlu přibližně 45° k laserovému paprsku (viz. obr. 13). [2]

Svařování plazmovým obloukem lze také použít společně s procesem laserového paprsku takovým způsobem, že laserový paprsek je obklopen soustředným plazmovým obloukem. Teplo plazmového oblouku snižuje rychlost ochlazování svarové zóny a snižuje vývoj zbytkových napětí. Je proto možné přizpůsobit mikrostrukturu svaru a tepelně ovlivněnou zónu konkrétní aplikaci. [2]

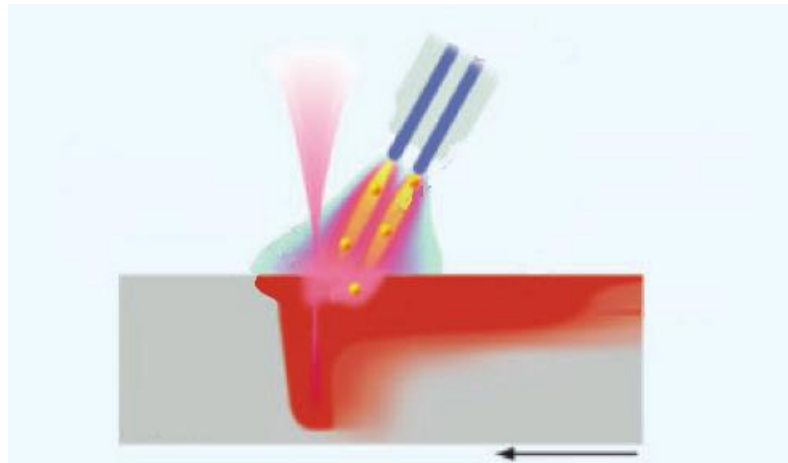


Obrázek 13 Laser-plazmové svařování [2]

4.3.6.1.3 Laser - MIG tandemové svařování

Kombinace laseru a tandemového svařování MIG (viz.obr. 14) je logickým vývojem hybridního laseru - MIG svařování. Laserový paprsek je nastaven na cca 90 ° k obrobku a používá se ke svařování kořene. Oba zadní oblouky mají úhel náklonu tlačení a používají se ke zvýšení schopnosti překlenout kořenové otvory a zvýšit tloušťku svarového hrdla. Proces využívá tři různé výkony, takže lze pomocí vhodného výkonu zvolit geometrii svarového spoje, preferované přeplnění spoje a rychlost svařování. Klíčovou výhodou kombinování procesů tímto způsobem je skutečnost, že když se výplňový kov roztaví, vytvoří tlak oblouku, který nepůsobí na obrobek, ale je distribuován napříč samostatnými kořeny oblouku. [2]

Kombinace laserového paprsku se třemi oblouky nabízí nové možnosti spojování kovových plechů s těžkým rozchodem: vysoké rychlosti svařování s dobrým přemostěním spáry a metalurgické vlastnosti. Předchozí hybridní proces laser - MIG s jedním obloukem vytváří velmi úzkou vyhřevní zónu s velkým poměrem hloubky svaru k šířce švu. Následující proces tandemového svařování má podstatně méně koncentrovanou energii a vyznačuje se velmi vysokou rychlostí depozice. [2]



Obrázek 14 Laser-MIG tandemové svařování [33]

5 Závěr

Konstrukčně jsou dnes automobily složené ze širokého spektra jednotlivých dílů vyrobených z kovových, nekovových i takzvaných hybridních materiálů. A požadavky na jejich spojování často nutí výrobce vyvíjet nové postupy pro jejich spojování. Jde o tzv. hybridní spojování, kterým jsem se zabýval ve své bakalářské práci.

Hybridní spojování, tedy takové, při němž se kombinují dva nebo více spojovacích operací hraje v automobilovém průmyslu důležitou roli. Díky těmto technologickým postům se vylepšuje například kvalita spoje. Zdokonalování hybridního spojování s sebou může přinést i zmenšení výrobních nákladů, zvýšení bezpečnosti automobilu stejně jako snížení ekologických dopadů automobilové výroby.

Nejčastěji jde o kombinaci mechanického spojování (nýtování, lemování, šroubování a svařování) s lepením. Hybridní spoje se využívají především tam, kde není možné klasické způsoby spojování plně využít.

U výrobců je patrná snaha stále více využívat technologii lepení, počátky jejího průmyslového nasazení jsou spojeny především s letectvím, v automobilovém průmyslu si cestu vydobývá až posledních dvacet let.

Lepení má v porovnání s konvenčními technologiemi spojování celou řadu výhod. Kromě vysoké pevnosti je to těsnost spojů, vyšší schopnost odolávat korozi. Lepené spoje mají dobré izolační, tepelné, vibrační, elektrické a další vlastnosti. Nevýhodou lepených spojů a její technologie je především vysoká citlivost na technologické podmínky pro lepení.

Jednou z takových metod je například montáž zahrnující procesy svařování, tak lepení – tzv. Weldbonding. Tvrdí se, že poskytuje výhody obou procesů při minimalizaci nevýhod.

Důležitou roli hraje i technologie, která zahrnuje kombinaci dvou různých metod svařování, Ta se většinou využívá při spojování silnějších plechových materiálů, výlisků či odlitků. Díky této kombinaci je možné dosáhnout optimální kvality svaru.

6 Seznam použitých zdrojů

- [1] DAVIES G., Materials for Automobile Bodies, Elsevier Science & Technology, 2012, ISBN 9780080969794
- [2] European Aluminium Association, THE ALUMINIUM MANUAL, 2011, [online], [cit. 2021-04-25], Dostupné z < https://www.european-aluminium.eu/media/1515/10-hybrid-joining-techniques_2015.pdf>
- [3] GERSTMANN T., AWISZUS B., Hybrid joining: Numerical process development of flat-clinch-bonding, Journal of Materials Processing Technology, Volume 277, 2020, [online], [cit. 2021-04-15], Dostupné z < <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116421> >
- [4] ROWE J.D., Advanced Materials in Automotive Engineering, Elsevier Science & Technology, 2012, [online], [cit. 2021-05-02], Dostupné z < <https://ebookcentral-proquest-com.infozdroje.czu.cz/lib/czup/detail.action?docID=1575031.>>
- [5] REIL M., MORIN D., LANGSETH M., KNOLL O., Connections between steel and aluminium using adhesive bonding combined with self-piercing riveting, EPJ Web of Conferences, Volume 183, 2018, [online], [cit. 2021-04-25], Dostupné z <https://doi.org/10.1051/epjconf/201818304010>
- [6] PETRIE E. M., Weldbonding-A Hybrid Method of Assembly Metal Finishing, Volume 111, 2013, [online], [cit. 2021-04-25], Dostupné z [https://doi.org/10.1016/S0026-0576\(13\)70163-6](https://doi.org/10.1016/S0026-0576(13)70163-6)
- [7] MESSLER R., Weld-Bonding: The Best or Worst of Two Processes, Industrial Robot: An International Journal, Volume 29, Pages 138-148, 2002 [online], [cit. 2021-02-15], Dostupné z <https://doi.org/10.1108/01439910210419150>
- [8] TWI-GLOBAL, [online], [Cit. 2021-], Dostupné z <https://www.twi-global.com/what-we-do/research-and-technology/research-reports/industrial-member-reports/weldbonding-of-1mm-aluminium-alloy-sheet-226-1983>
- [9] TWI-GLOBAL, [online], [Cit. 2021-], Dostupné z <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/faq-what-is-hybrid-joining>
- [10] HAGSHENAS M., GERLICH A. P., Joining of automotive sheet materials by friction-based welding methods: A review, Engineering Science and Technology, an International Journal, Volume 21, 2018, [online], [cit. 2021-05-02], Dostupné z <<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.02.008>> ISSN 2215-0986

- [11] SUN X., CHRYSANTHOU A., Self-piercing riveting, Properties, processing and applications, Elsevier Science and Technology, 2013, [online], [cit. 2021-05-01], Dostupné z <<https://ebookcentral-proquest-com.infozdroje.czu.cz/lib/czup/detail.action?docID=1666715>.> ISBN 978-0-85709-884-9
- [12] ALLISON P., AMARO, R., RAO H., JORDAN B. J., Fatigue in Friction Stir Welding, Butterworth-Heinemann, 2019, [online], [cit. 2021-05-01], Dostupné z <<https://doi.org/10.1016/C2017-0-04065-X>> ISBN 978-0-12-816131-9
- [13] UPADHYAY P., HOVANSKI Y., JANA S., FIFIELD L., Joining Dissimilar Materials Using Friction Scribe Technique, 2017, [online], [Cit. 2021-], Dostupné z <https://doi.org/10.1115/1.4034629>
- [14] WANG T., SIDHAR H., MISHRA R. S., HOVANSKI Y., UPADHYAY P., CARLSON B., Friction stir scribe welding technique for dissimilar joining of aluminium and galvanised steel, Science and Technology of Welding and Joining, Volume 23, Pages 249-255, 2018, [online], [cit. 2021-04-25], Dostupné z <https://doi.org/10.1080/13621718.2017.1381460>
- [15] SANTELLA M., HOVANSKI Y., FREDERICK A., GRANT G., DAHL M., Friction stir spot welding of DP780 carbon steel, Science and Technology Welding Joining, Volume 15, 2010, pages 271–278 [online], [cit. 2021-05-08], Dostupné z <<https://doi.org/10.1179/136217109X12518083193630>>
- [16] TIER M., ROSENDO T., DOS SANTOS J., HUBER N., MAZZAFERRO J., MAZZAFERRO C., STROHAECKER T., The influence of refill FSSW parameters on the microstructure and shear strength of 5042 aluminium welds, Journal of Materials Processing Technology, Volume 213, Pages 997-1005, 2013, [online], [cit. 2021-04-25], Dostupné z <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.12.009>
- [17] ROSENDO T., TIER M., MAZZAFERRO J., MAZZAFERRO C., STROHAECKER T., DOS SANTOS J., Mechanical performance of AA6181 refill friction spot welds under Lap shear tensile loading, Fatigue Fracture of Engineering Materials Structures, Volume 38, Pages 1443-1455, 2015, [online], [cit. 2021-04-25], Dostupné z <<https://doi.org/10.1111/ffe.12312>>
- [18] CHEN Y. C., GHOLINIA A., PRANGNELL P. B., Interface structure and bonding in abrasion circle friction stir spot welding: A novel approach for rapid welding aluminium alloy to steel automotive sheet, Materials Chemistry and Physics, Volume 134, Pages 459-463, 2012, [online], [cit. 2021-04-25], Dostupné z <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2012.03.017>

- [19] DAEYONG K., WONOH L., JUNEHYUNG K., KYUNG-HWAN C., CHONGMIN K., KAZUTAKA O., WAGONER R. H., KWANSOO C., Macro-Performance Evaluation of friction stir welded automotive tailor-welded blank sheet: Part II-Formability, *International Journal of Solids and Structures*, Volume 47, 2010, [online], [Cit. 2021-], Dostupné z <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2009.12.021>
- [20] SATO Y. S., PARK S. H. C., MICHIUCHI M., KOKAWA H., Constitutinoal liquation during dissimilar friction stir welding of Al and Mg alloys, *Scripta Materialia*, Volume 50, Issue 9, 2004, Pages1233–1236, [online], [cit. 2021-02-15], Dostupné z < <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2004.02.002>>
- [21] BUNAZIV I., AKSELSEN O., FROSTEVARG J., KAPLAN A., Laser-arc hybrid welding of thick HSLA steel, *Journal of Materials Processing Technology*, Volume 259, 2018, [online], [cit. 2021-02-15], Dostupné z <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.04.019>
- [22] NIELSEN S. E., High Power Laser Hybrid Welding – Challenges and Perspectives, *Physics Procedia*, Volume 78, 2015, [online], [cit. 2021-02-15], Dostupné z <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.11.014>
- [23] LE GUEN E., FABBRO R., CARIN M., COSTE F., LE MASSON P., Analysis of hybrid Nd:Yag laser-MAG arc welding processes, *Optics Laser Technology*, Volume 43, 2011, [online], [cit. 2021-02-15], Dostupné z <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2011.03.002>
- [24] TURICHIN G., TSIBULSKIY I., KUZNETSOV M., AKHMETOV A., MILDEBRATH M., HASSEL T., Influence of Gap Width on the Geometry of the Welded Joint in Hybrid Laser-Arc Welding, *Physics Procedia*, Volume 78, 2015, [online], [cit. 2021-02-15], Dostupné z <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.11.013>
- [25] HUANG H., ZHANG P., YAN H., LIU Z., YU Z., WU D., SHI H., TIAN Y., Research on weld formation mechanism of laser-MIG arc hybrid welding with butt gap, *Optics Laser Technology*, Volume 133, 2021, [online], [cit. 2021-02-15], Dostupné z <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2020.106530>
- [26] RESEARCHGATE, [online], [cit. 2021-02-15], Dostupné z https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-F-SPR-process-driven-from-outside-of-the-rivet-a-rivet-feed-b-rivet_fig2_284912267
- [27] RESEARCHGATE, [online], [cit. 2021-02-15], Dostupné z https://www.researchgate.net/figure/A-schematic-diagram-of-the-four-stages-of-a-SPR-process_fig1_315467318
- [28] RESEARCHGATE, [online], [cit. 2021-02-15], Dostupné z https://www.researchgate.net/figure/Scheme-of-FSW-welding-method_fig2_338946493

- [29] RESEARCHGATE, [online], [cit. 2021-02-15], Dostupné z https://www.researchgate.net/figure/a-Friction-stir-scribe-welding-and-b-material-mixing-from-friction-stir-scribe_fig6_328349606
- [30] MECHANICALINVENTIONS, [online], [cit. 2021-02-15], Dostupné z <http://mechanicalinventions.blogspot.com/2014/09/resistance-spot-welding-rsw-working-principle.html>
- [31] RESEARCHGATE, [online], [cit. 2021-02-15], Dostupné z https://www.researchgate.net/figure/Figure-1-Friction-stir-spot-welding-FSSW-process-1_fig1_311767305
- [32] ZHAN X., ZHANG D., WEI Y., WANG Y., Research on the microstructure and properties of Laser-MIG Hybrid welded joint of invar alloy, Optics and Laser Technology, Volume 97, 2017, [online], [cit. 2021-02-15], Dostupné z <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.06.014>
- [33] RESEARCHGATE, [online], [cit. 2021-02-15], Dostupné z https://www.researchgate.net/figure/A-typical-process-representation-of-laser-tandem-arc-hybrid-welding-Staufer-2007_fig9_272349235

7 Seznam obrázků

Obrázek 1 FBJ metoda

Obrázek 2 F-SPR metoda

Obrázek 3 SPR metoda

Obrázek 4 FSW metoda

Obrázek 5 Příklady použití FSS metody

Obrázek 6 FSS metoda

Obrázek 7 Odporové bodové svařování

Obrázek 8 FSSW metoda

Obrázek 9 ABC-FSSW metoda

Obrázek 10 Schéma svarů jednotlivých kombinací

Obrázek 11 MIG v kombinaci s laserem

Obrázek 12 Laser-obloukové svařování

Obrázek 13 Laser-plazmové svařování

Obrázek 14 Laser-MIG tandemové svařování