

# Návrh a ověření metody pro hodnocení adheze ve svařovaných spojích kov-plast

Zuzana Weberová\*<sup>1</sup>, Taťana Vacková<sup>1</sup>

<sup>1</sup> ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav materiálového inženýrství, Karlovo nám. 13, 121 35 Praha 2, Česká republika

## Abstrakt

Cílem práce bylo navrhnout a experimentálně ověřit metodu pro hodnocení adheze ve svařovaných spojích kov-plast. Hlavními požadavky bylo: odstranění nedostatků běžně používaných metod; zohlednit možný technologický postup při reálné aplikaci takových spojů; umožnit porovnání svařovaných spojů s lepenými spoji. Pro tento účel byla modifikována norma ČSN EN 15 337. Pro praktické ověření byly jako modelové materiály zvoleny polyetylen (PE) a pochromovaná ocel C35. Z částí vzorků byly vyhotoveny výbrusy pro pozorování rozhraní kov-plast na běžném světelném a konfokálním mikroskopu. Dále byla provedena zkouška na pevnost ve smyku a plastová část vzorku podélně rozříznuta pro vizuální zhodnocení porušení rozhraní kov-plast. Pevnostní zkouška a následně vizuální hodnocení porušení spoje se ukázaly jako vhodné pro hodnocení adheze ve svařovaných spojích kov-plast.

*Klíčová slova:* spojování kov-plast; hodnocení adheze; práškové plasty

## 1. Svařování kovů s termoplasty

Pro vytváření přímých spojení kovů s termoplasty se v anglosaské literatuře používají termíny „welding“ [1] nebo „fusion bonding“ [2], volně přeložené jako svařování. Při samotném procesu je spojován natavený termoplast s kovovým dílem. Metod, jak toho docílit, je celá řada. Patří mezi ně LAMP (laser assisted metal and plastic joining) [3]; IMDJ (injection moulding direct joining) [4]; hot stamping [5] a roll forming [6]. Postupy se liší podle rozměrů a formy spojovaných dílů, způsobu ohřevu termoplastu, povrchových úpravách obou materiálů atd. Ve studiích byly mezi zkoumanými činiteli například povrchová energie plastu, drsnost povrchu, předúpravy povrchu, přítlak při spojování a chlazení [1]. Každá metoda má své charakteristické pracovní podmínky, které ovlivňují výslednou pevnost a kvalitu spoje. Pevnost a kvalita spoje se dají shrnout do pojmu adheze, což je velmi komplexní jev, ovlivňuje jej mnoho činitelů a je popsána pomocí několika teorií, které se vzájemně doplňují [7]. Povrchová energie plastu, a především její polární složka, má na adhezi plastu ke kovu velmi významný vliv [1]. Jedním ze způsobů, jak její hodnotu zvýšit, je plasmová úprava povrchu, jejíž účinky se liší podle pracovních podmínek, použitého plynu a doby stárnutí jejího efektu [8]. Výhodou této úpravy je, že ji lze použít na plasty ve formě těles i práškových hmot, obojí má své využití v průmyslových technologiích.

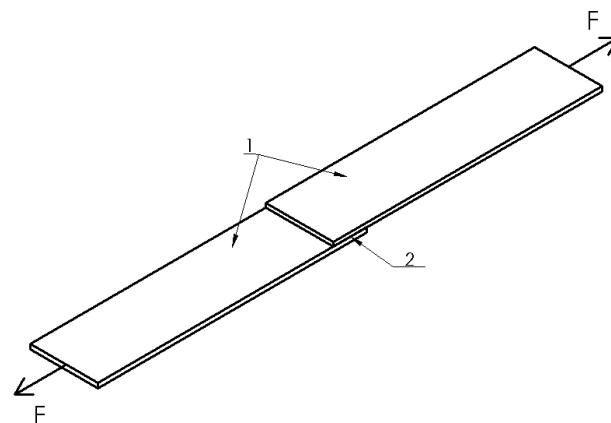
## 2. Metody testování smykové pevnosti

Ve výzkumech svařování kovů s plasty jsou obvykle kovy zpracovávány ve formě plechů a plasty ve formě desek či fólií, čím jsou zohledněny možné aplikace např. v automobilovém průmyslu. Některé průmyslové technologie (např. rotační spékání, 3D tisk) zpracovávají plasty ve formě prášků a kovy ve formě tyčí a vložek. Proto je zde potřeba provádět testy i na těchto konfiguracích. Čím blíže je geometrie a konstrukce vzorků konkrétní aplikaci, tím lepší je vypovídající hodnota testů. I když se většina používaných

metod dá adaptovat plasty v práškové formě, nejsou vždy pro tento účel zcela vhodné, jak je popsáno dále. Zcela chybí spolehlivá a opakovatelná metoda, která by byla vhodná pro výzkumy probíhající na práškových plastech a umožňovala přesnou diagnostiku adheze. V této kapitole jsou dále popsány některé metody pro měření smykové pevnosti svařovaných spojů, které byly použity i pro práškové materiály, ale nejsou zcela vyhovující.

### 2.1. Smykové pevnost překládaných sestav

Konstrukce vzorků a princip testování byly převzaty z normy EN 1465 Lepidla – stanovení pevnosti ve smyku při tahovém namáhání překládaných lepených sestav (viz obr. 1).



*Obr. 1. Konstrukce vzorku a princip zatěžování dle EN 1465. 1-spojované materiály (adherendy), 2-oblast slepení nebo svaření materiálů, F-směr působení zatěžovací síly [9]*

Výhodou této metody je jednoduchost přípravy vzorků i testování. Další významnou výhodou je, že tato metoda a konstrukce vzorků je nejčastěji používanou ve výzkumech svařování kovů s plasty i jejich

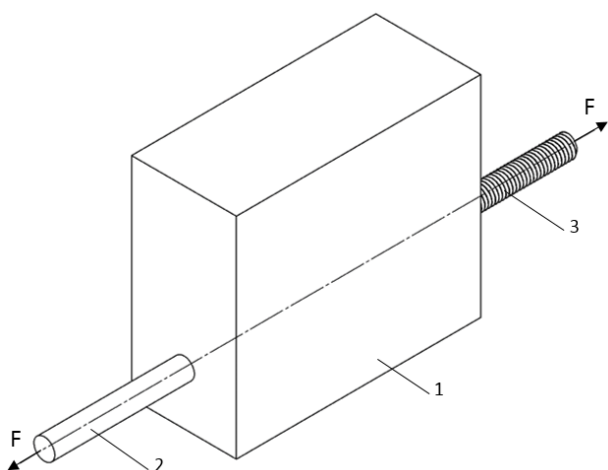
\*Kontakt na autora: Zuzana.Weberova@fs.cvut.cz

lepení. Její použití tedy umožňuje porovnání s pevnostmi dosahovanými jinými postupy, za jiných podmínek a s lepenými spoji.

Při použití pro pevné adherendy nese tato metoda riziko v případě špatné přípravy vzorků či upnutí do trhačích stroje. Pokud dojde k vyosení roviny spoje a zatěžující síly, může ve spoji docházet kromě čistého smyku také k odlupu, což značně zkresluje výsledky měření smykové pevnosti. Relativně malá tloušťka adherendů může na straně plastu od určité pevnosti spoje způsobovat porušení sestavy v plastu, nikoliv v samotném spoji, což zabraňuje měření jeho pevnosti. Větší tloušťka adherendu může být řešením, ale je nutné vyosení kompenzovat podložkami [9]. V případě použití metody pro práškové materiály nahrazuje prášek lepidlo a v oblasti spoje jsou tři vrstvy: kov – plastový prášek – kov. Vzhledem k tenké vrstvě prášku rozprostřeného na relativně velké ploše s minimálním kontaktem s atmosférou může docházet k problémům s unikáním vzduchu z prášku a vzniku porozity. Porozita může vznikat ve plastu nebo na rozhraní kov-plast. Druhý případ může značně ovlivňovat výsledky, protože reálná plocha kontaktu obou materiálů je menší než plocha uvažovaná pro výpočet smykového napětí z naměřených sil dle normy EN 1465 [10, 11].

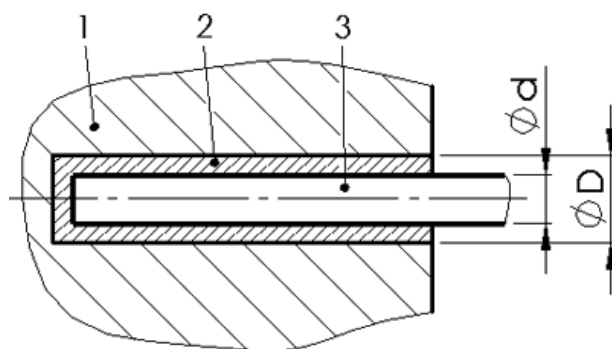
## 2.2. Vytrhování zatavené tyče

Interní metoda firmy SurfaceTreat, a.s. pro testování vlivu plazmové modifikace práškových plastů na adhezi měřením pevnosti svařovaných spojů kov-plast. Vzorek je sestaven z jedné hladké tyče, na které probíhá samotné měření, a závitové tyče sloužící pro upnutí vzorků do čelistí trhačích stroje. Tyče jsou souose zataveny do plastu. Schématický náčrt vzorku a směr působení zatěžovacích sil při měření pevnosti jsou na obr. 2.



**Obr. 2.** Konstrukce a princip zatěžování vzorku. 1 - plastová část, 2 - hladká kovová tyč, 3 - závitová kovová tyč, F - směr působení zatěžovací síly

Metoda umožňuje pracovat s jednou či více vrstvami plastu [10, 12]. Schématické znázornění pro případ dvou vrstev je na obr. 3.



**Obr. 3.** Schématický řez vzorkem na straně hladké tyče. 1-hmoty plastové části vzorku, 2-mezivrstva z plazmově upraveného plastu, 3-kovová tyč [12]

Výhodou této metody je, že zohledňuje způsob přípravy spoje tak, jak je předpokládáno, že bude použit při praktické aplikaci, stejně tak jako užití tyčovin místo plechu pro kovový díl. Při vyhodnocení výsledků je třeba vzít v úvahu, že rozdílná tepelná roztažnost plastů a kovů způsobí při chladnutí příspěvek k pevnosti spoje od tlakového působení plastu na kovovou tyč.

Předpokladem je, že závitová tyč bude v materiálu ukotvena pevněji díky závitům a měření pak bude probíhat pouze na hladké tyči. Vlivem plazmové úpravy je však síla potřebná pro vytažení hladké tyče spojené s plazmově upraveným plastem větší než pro vytažení závitové tyče zalité v neupraveném plastu [10]. Metoda tedy nese riziko, že při zatěžování dochází k vytahování obou tyčí zároveň a výsledky měření jsou tím zkresleny. Toto riziko je možné snížit zatavením i závitové tyče do plazmově upraveného plastu [12]. Při vytahování zalité tyče není měřen čistý smyk na válcové ploše, ale i přídavná tahová napětí od konce tyče, který je kolmý na směr zatěžování. U této metody zatím nebyla hodnocena porozita vzniklá na rozhraní kov-plast.

## 3. Návrh nové metody testování smykové pevnosti a hodnocení adheze

Účelem této práce bylo navrhnout nový způsob testování a hodnocení adheze ve spojkách kov-plast při zpracování plastu v práškové formě. Její absence brzdí například vývoj optimální modifikace práškových plastů plazmovou úpravou pro zlepšení jejich adheze ke kovu. Spolehlivá metoda by zajistila výsledky potřebné pro vývoj zpracování práškových plastů v aplikacích rotačního spékání a 3D tisku kompozitů..

### 3.1. Požadavky na metodu

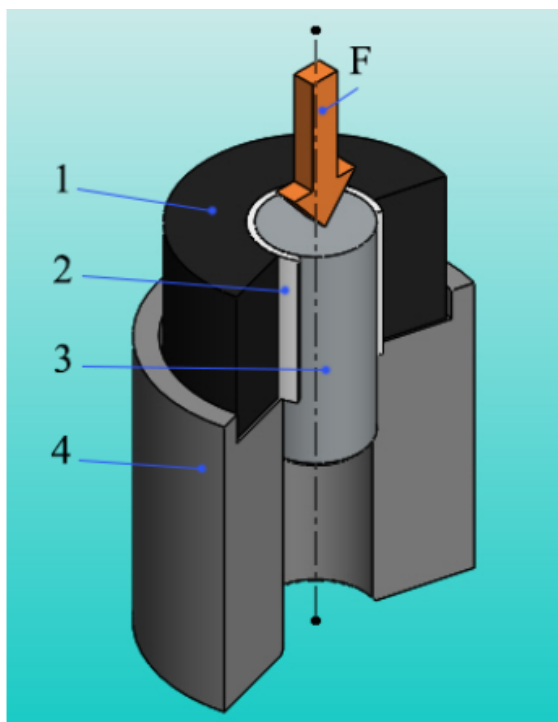
Pro návrh nové metody byly zformulovány následující požadavky:

- Zpracování plastů v práškové formě
- Měření čistého smyku bez nebezpečí deformace vzorku
- Měření adheze probíhající na jednoznačné ploše
- Možnost vizuálního hodnocení adheze
- Možnost určení příspěvku k pevnosti od různých povrchových úprav obou spojovaných materiálů

- Masivní plastová část vzorku, která nedovolí porušení plastu místo měření adheze
- Možnost práce s jednou, dvěma nebo i více vrstvami plastu
- Možnost porovnání svařovaných spojů s lepenými
- Postup přípravy vzorků a jejich geometrie zohlední možnou aplikaci v technologii rotačního spékání
- Metoda musí být proveditelná pomocí laboratorních strojů a zařízení na ČVUT v Praze, FS, ÚMI.

### 3.2. Navržené řešení

Jako řešení byla navržena modifikace normy ČSN EN 15 337 Lepidla – Stanovení smykové pevnosti anaerobních lepidel s použitím zkušebních těles čep-objímka. Modifikovaná konstrukce vzorků a princip zatěžování dle normy je na obr. 4. V tomto případě je čep kovová tyč a objímka z plastového materiálu. Lepidlo může, ale nemusí být nahrazeno další vrstvou plastu v případě, že chceme při experimentu pracovat se dvěma vrstvami plastu (stejně vrstvení jako na obr. 3). Tato konstrukce vzorků by mohla být použita i pro měření pevnosti spoje v krutu.



**Obr. 4.** Konstrukce vzorku a princip zatěžování, modifikace ČSN EN 15337. 1-objímka, 2-lepidlo nebo vrstva plastu, 3-čep, 4-přípravek pro pevnostní zkoušku, F-směr působení zatěžovací síly

Příprava vzorků podle formy plastového materiálu:

- Pro lepené spoje je použit plast ve formě tyčoviny, do kterého je vyvrtána průchozí díra pro vlepení kovové tyče. Rozdíl poloměrů tyče a díry musí odpovídat vhodné tloušťce použitého lepidla. Tyto tloušťky jsou uváděny v datových listech produktů poskytovaných výrobcem.

- Výrobky o jedné vrstvě plastu (vynechána vrstva odpovídající lepidlu) jsou připravovány ve formě. Tyč je po založení do formy zasypána práškovým plastem, který je při následném ohřevu v peci slinut. Podmínky slinování budou uvedeny dále. Při procesu slinování je práškový materiál nataven na povrch tyče a vznikne svařený spoj.
- Výrobky o dvou vrstvách plastu (vrstva lepidla nahrazena vrstvou dalšího plastu) jsou taktéž dokončovány v peci. Tomu předchází fáze, kdy je kovová tyč nahřáta v peci a následně vnorena do nádoby s práškovým plastem. Ten se díky teplu z tyče nataví na její povrch. Takto připravenou tyč umístíme do formy a dále je proces stejný jako v bodě b).

Modifikace normy pro testování lepidel zajišťuje porovnatelnost výsledků s pevnostmi lepených spojů. Díky masivnější konstrukci než v případě vzorků pro měření smykové pevnosti přepřátovaných sestav, nedochází k deformaci materiálu a je měřen čistý smyk. Je zde použita jen jedna tyč, takže na rozdíl od vzorků popsaných v kapitole 2.2. není riziko zkreslení výsledků měření pohybem více částí vzorku. Použití formy umožňuje zpracovat plasty ve formě prášků a připravit vzorek o jedné či více vrstvách plastu. Metoda zohledňuje výrobní postup spoje pro technologii rotačního tváření (tyčovina či jiný kovový prvek s prostorovou geometrií zalitý v plastu). Měření smykové pevnosti umožní měřit velikost adheze mezi materiály. Pro vizuální hodnocení adheze jsou zde dvě možné varianty (dva různé řezy vzorkem v různých stádiích testování), které budou popsány v experimentální části práce.

### 3.3. Experimentální ověření

Pro experimentální ověření navržené metody byly zvoleny tyto modelové materiály:

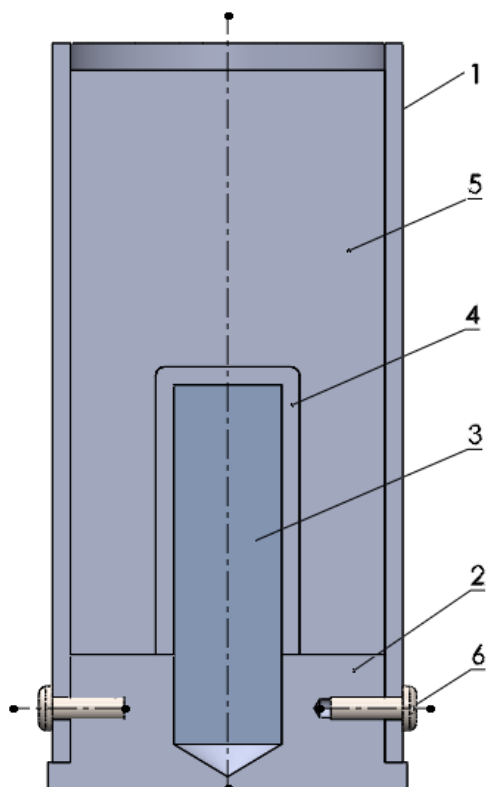
- Kovová tyč – frekvenčně kalená ocel C35 (ČSN 12 040), finálně leštěný stav, pochromovaná ( $20\mu\text{m Cr}$ ), drsnost povrchu  $Ra=0,01\mu\text{m}$ .
- Polyethylenový prášek DOWLEX 2629.10 UE, barva natur (bílá) [13]; plasmově upravený v pracovním plynu vzduch (PPE Air) firmou SurfaceTreat a.s.
- Polyethylenový prášek DOWLEX 2629.10 UE, barva natur (bílá) [13]; plasmově upravený v pracovním plynu kyslík (PPE O2) firmou SurfaceTreat a.s.
- Polyethylenový prášek ICORENE 1613 BK85, barva černá [14]; bez plazmové úpravy (ZSPE)

Volba tohoto kovového adherendu má zajistit velmi tvrdý a hladký povrch, což minimalizuje vliv mechanického ukotvení plastu na kovovém povrchu (viz teorie adheze [7]) a následně při testování umožnit snadné hodnocení vlivu samotné plazmové úpravy. Jakákoliv forma drsností povrchu v případné aplikaci pak pevnost spoje zvýší. Dvě barvy polyethyleny byly zvoleny kvůli možné výhodě při pozorování vzorků pod mikroskopem [12]. Neupravený PE vykazuje špatnou adhezi ke kovu. Jak již bylo zmíněno, plazmová úprava zvýší povrchovou energii plastu a tím i adhezi plastu ke kovu. Použití upraveného i neupraveného PE je zvoleno pro určení přírůstku

pevnosti spoje od plazmové úpravy a dále z ekonomických důvodů s ohledem na průmyslovou aplikaci. Plazmová úprava zvyšuje cenu materiálu, a proto je upravený PE použit pouze v malém množství pro vytvoření adheze mezi plastovým a kovovým dílem. Neupravený prášek pak tvoří většinu objemu plastu ve vzorku.

### 3.4. Příprava vzorků

Příprava vzorků probíhala obdobně jako u metody používané firmou SurfaceTreat a.s. Odlišnosti přípravy jsou především v konstrukci vzorků a formy (viz obr. 5). Teploty a časy ohřevů v peci byly zvoleny na základě teploty tání PE dle datových listů [13, 14] a prací, na které tento příspěvek navazuje [10, 12].



**Obr. 5.** Sestavená forma pro finální část přípravy vzorků v peci. 1-trubka, 2-podstavec, 3-kovová tyč, 4-mezivrstva z PPE, 5-hmota vzorku z ZSPE, 6-šrouby pro zafixování trubky a podstavce

1. Nadělené kovové tyče byly očištěny, odmaštěny a vloženy do vychladlé pece.
2. Teplota v peci pak rostla 30 min na 190 °C, následovala výdrž 30 min na této teplotě.
3. Ohřáté tyče byly z pece vyjmuty a vnořeny do plazmově upravených prášků (PPE Air a PPE O2) připravených v kádinkách. V prášku byla každá tyč ponechána po dobu 20 s. Teplo z tyčí způsobilo natavení prášku na povrch kovu.
4. Po vychladnutí byla polovina tyčí (vždy polovina u každé plazmové úpravy) vrácena do pece na dobu 75 min při teplotě 190 °C, aby se natavený prášek slínil a po vyjmutí z pece opět ponechána k vychladnutí

5. Spodní okraj tyče byl očištěn od PE a následně byly tyče zakládány do forem ošetřených separačním nátěrem.
6. Formy pak byly vyplněny černým práškem ZSPE a vloženy do vychladlé pece.
7. Teplota v peci rostla 120 min na 190 °C, následovala 120 min výdrž na 190 °C, poté byla pec vypnuta a vzorky v ní byly do druhého dne ponechány k vychladnutí.
8. Po vyjmutí z formy byly vzorky očištěny od přebytečného materiálu a předány na zpracování pro ověření navržené metody.

Skupiny vzorků připravených s tyčí, na které byl plazmově upravený prášek nataven, mají ve svém označení písmeno N. Skupiny vzorků při jejich přípravě byl natavený prášek i slínut před založením tyčí do forem mají ve svém označení písmeno S. Vzhled tyčí bez i s mezikrokem slinutí je na obr. 6. Vzorek po očištění je na obr. 7.



**Obr. 6.** Vlevo tyč s nataveným práškem (PPE N), vpravo tyč s práškem po slinutí (PPE S)

Jako referenční vzorky pro zjištění vlivu plazmové úpravy na velikost adheze byly připraveny i vzorky pouze umístěním tyče do formy a zasypáním ZSPE. Zpracování vzorků probíhalo ve třech fázích, které jsou popsány dále.

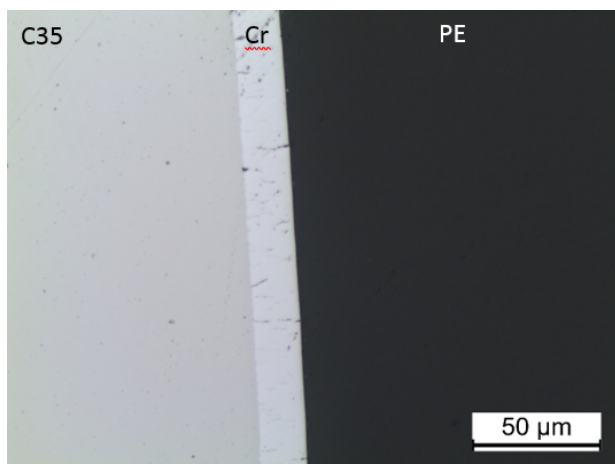
### 3.5. Mikroskopie příčného řezu

Horní část vzorků byla odříznuta příčným řezem diamantovým kotoučem na metalografické pile. Z odříznuté části byl vyhotoven výbrus pro pozorování na mikroskopu. Rovina řezu je znázorněna na obr. 7. Výbrusy byly určeny pro vizuální hodnocení adheze na rozhraní kov-plast.



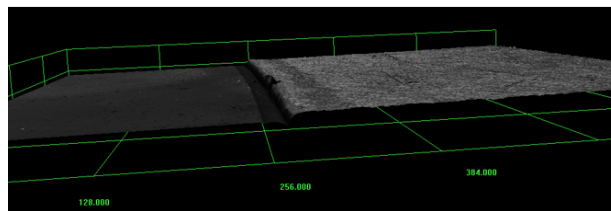
Obr. 7. Vzorek po vyjmutí z formy a očištění. Žlutě je naznačena rovina řezu.

Při pozorování na světelném mikroskopu rozdílné barvy vrstev PE bohužel nijak nepřispěly k snadnějšímu pozorování ve světlém ani v tmavém poli. Rozhraní kov-plast bylo při pozorování na světelném mikroskopu špatně čitelné i při větších zvětšeních, viz obr. 8. Nešlo jednoznačně určit, zda plast ke kovu přilnul, nebo je mezi materiály mezera.

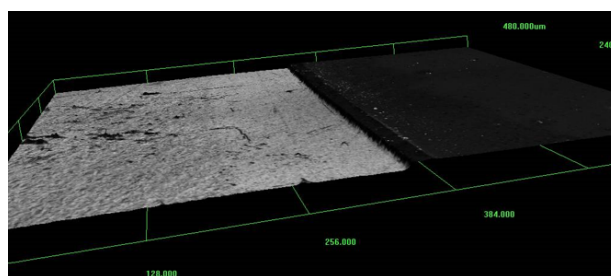


Obr. 8. Řez vzorkem, rozhraní kov-plast, snímek ze světelného mikroskopu. Vrstvy zleva: ocel C35, chrom, polyethylen.

Z tohoto důvodu byly pořízeny snímky rozhraní na konfokálním mikroskopu. Na obr. 9 je mezi materiály (kov je světlý, plast tmavý) vidět propad a zaoblené hrany obou materiálů. Propad pravděpodobně vznikl při leštění vzorku kvůli špatné adhezi mezi materiály. Přítomná mezera umožnila, že chloupky leštícího kotouče ohladily hrany obou materiálů. Na obr. 10 je na rozhraní materiálů schod. Předpokládaná příčina vzniku je nejprve dobrá adheze mezi materiály, která zajistila, že se hrana kovu při leštění vzorku nezaoblila. Při následné relaxaci materiálů pak vystoupila rovina kovu nad rovinu plastu a tím vznikl pozorovatelný schod.



Obr. 9. Snímek rozhraní kov-plast z konfokálního mikroskopu



Obr. 10. Snímek rozhraní kov-plast z konfokálního mikroskopu

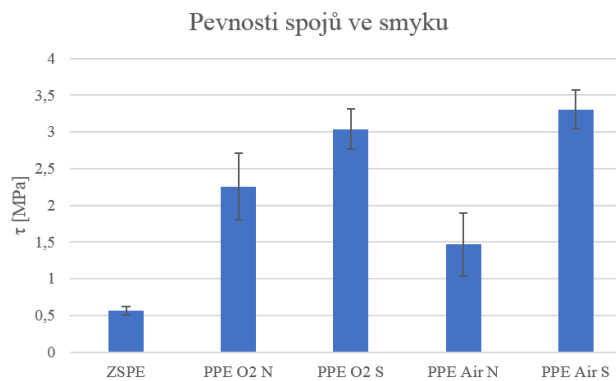
Ačkoliv je na snímcích z konfokálního mikroskopu dobře pozorovatelný charakter rozhraní, tato metoda vhodná pro vizuální hodnocení adheze z několika důvodů. Prvním je časová náročnost pozorování na konfokálním mikroskopu. Pozorování rozhraní na celém obvodu tyče by bylo časově zcela neúměrné množství získaných informací, což je nevhodné pro výzkum, při kterém je potřeba vyhodnotit velké množství vzorků. Dále může podobu rozhraní na snímku výrazně ovlivnit leštění vzorků, zvláště pak směr leštění a přítlak. Tyto pracovní podmínky mohou způsobit oddělení obou materiálů, nebo naopak jejich přiblížení do těsného kontaktu. Zdálnivě dobrý kontakt mezi materiály tudíž nemusí vypovídat o dobré adhezi, ale může být způsoben deformací materiálu při zpracování vzorků.

### 3.6. Pevnostní zkouška

Princip zatěžování a umístění vzorků do přípravku jsou znázorněny na obr. 4. Rychlost posuvu hlavy stroje v při zatěžování byla 1,5 mm/min. Naměřené síly byly dle vztahu 1 přepočteny na smykovou pevnost  $\tau$ . Smykové pevnosti jednotlivých skupin vzorků jsou na obr. 11.

$$\tau = \frac{F}{A} [MPa] \quad (1)$$





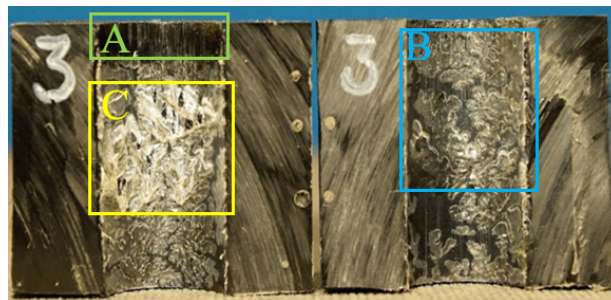
Obr. 11. Graf výsledků pevnostní zkoušky

Pevnosti naměřené na vzorcích připravených pouze ze ZSPE jsou brány jako referenční. Pevnost spojů v těchto vzorcích je pravděpodobně dána pouze tlakem polyethylenu na kovovou tyč způsobeného odlišnou tepelnou roztažností materiálů. Příspěvek k pevnosti od mechanického zachycení PE na povrchu kovu byl eliminován volbou povrchu kovu, jak bylo popsáno výše. Rozdíl mezi hodnotami pevnosti vzorků z ZSPE a vzorků s vrstvou PPE lze považovat za příspěvek plazmové úpravy k celkové pevnosti spojů. Vzorky, které byly připraveny z tyčí, na které byl prášek pouze nataven (PPE N), vykazují v porovnání s ostatními větší rozptyl výsledků pevnostní zkoušky. Slinutí prášku jako mezikrok při přípravě vzorků snížilo rozptyl hodnot. Tento mezikrok je proto při použití této metody vhodné zařadit do přípravy vzorků. Rozptyly hodnot jednotlivých skupin ukazují, že zvolený způsob přípravy vzorků nevnáší do experimentu významné chyby a tato metoda měření pevnosti spojů je pro hodnocení adheze vhodná.

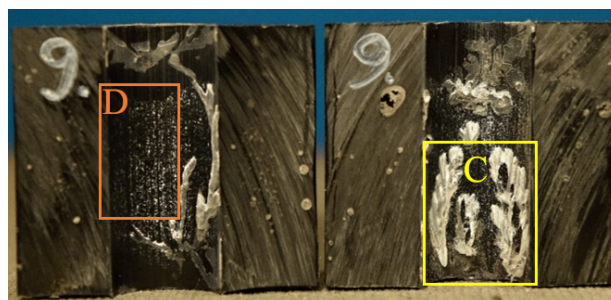
### 3.7. Vizualní hodnocení adheze

Po úplném vytlačení kovové tyče z hmoty plastu byly tyto plastové části podélně rozříznuty pro pozorování plochy, která byla rozhraním mezi kovem a plastem. Na vnitřním průměru PPE jsou rozlišitelné dva typy oblastí. Tmavší oblasti, kde na sebe obě vrstvy polyethylenu přilnuly bez problému, a světlejší, kde je mezi vrstvami vzduchová bublina.

Na obr. 12 a obr. 13 jsou vyznačeny příklady oblastí, které se v různém zastoupení objevují i u ostatních vzorků s mezivrstvou. Pro srovnání je na obr. 14 řez referenčním vzorkem připraveným z ZSPE bez mezivrstvy. A-dobré přilnutí mezi oběma vrstvami polyethylenu, K porušení spoje došlo na rozhraní kov-plast. B-bublinky, vrstvy polyethylenu k sobě nepřilnuly a vzduch z prášku utvořil bublinky. K porušení spoje došlo na rozhraní kov-plast. C-potrhané bublinky, bublinky poskytly tenké vrstvy polyethylenu nataveného na kov. V tomto případě byla adheze mezi materiály natolik velká, že kov při svém pohybu při pevnostní zkoušce táhl polyethylen až do jeho porušení. D-Potrhané malé bublinky. Problémy s unikáním vzduchu byly menší než v předchozích případech. Na některých tyčích zůstal po jejich vytlačení ze vzorků ulpělý plast, což také vypovídá o výborné adhezi v daných místech. Příklad je na obr. 15.



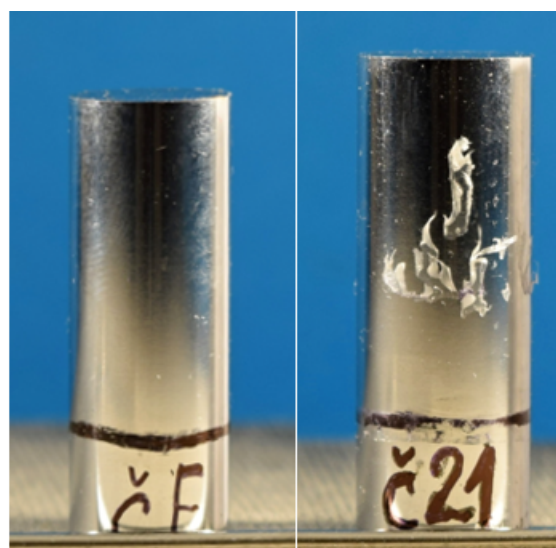
Obr. 12. Podélný řez vzorkem s mezivrstvou po úplném vytlačení kovové tyče



Obr. 13. Podélný řez vzorkem s mezivrstvou po úplném vytlačení kovové tyče



Obr. 14. Podélný řez referenčním vzorkem po vytlačení kovové tyče



Obr. 15. Vlevo tyč bez ulpělého polyethylenu, vpravo s ulpělým polyethylenem (znak dobré adheze)

## 4. Diskuze a závěr

Navržená metoda vycházející z modifikace normy ČSN EN 15 337 splňuje všechny formulované požadavky.

Konstrukce vzorků a provedení pevnostní zkoušky jsou vhodné pro hodnocení kvality adheze. Při použití této metody i v reálné aplikaci je vhodné do procesu výroby vzorků zařadit mezikrok slinutí prášku nataveného na tyči. Tento mezikrok pozitivně ovlivňuje pevnost výsledného spoje.

Pozorování podélných řezů plastovými částmi vzorků po pevnostní zkoušce jsou vhodné pro vizuální hodnocení adheze, především pro zjištění velikosti plochy rozrušeného plastu, která má nejvýznamnější přínos pro celkovou pevnost spoje. V některých případech byla možnost podpořit hodnocení plastového dílu i hodnocením množství plastu ulpělého na kovové tyči. Naopak pozorování příčných řezů na mikroskopu se ukázalo jako nevhodné.

Pevnost spojů ve vzorcích vyrobených pouze ze ZSPE je pravděpodobně dána pouze tlakem plastu na kov z důvodu rozdílné teplotní roztažnosti. Vliv mechanického zachycení materiálů byl eliminován volbou povrchu kovové tyče. Rozdíl pevností vzorků z ZSPE a vzorků s vrstvou PPE můžeme považovat za příspěvek plazmové úpravy plastu k pevnosti spoje zlepšením adheze.

Bublinky vzniklé špatným unikáním vzduch z prášku při jeho slinování ve formě jsou pro reálnou aplikaci nepřijatelné a mohou být odstraněny použitím pohyblivé formy technologie rotačního spékání. Jejich odstranění znesnadní či znemožní vizuální posuzování adheze podle množství potrháných bublinek a v takovém případě bude třeba přijít s náhradním řešením.

Použitá konstrukce a konfigurace materiálů pro výrobu vzorků může být vhodná i pro měření pevnosti spoje v krutu. Díky drsnosti kovové tyče, která je stejná ve všech směrech je zde potenciální možnost, že by hodnoty smykové pevnosti a pevnosti v krutu mohly být vzájemně připočitatelné. Ověření bude součástí dalšího výzkumu.

## Poděkování

Děkuji paní doktorce Taťaně Vackové a panu profesoru Petru Špatenkovi za konzultace a rady při zpracování práce. Dále panu Bohumilu Roženskému za konzultaci a pomoc při vyhotovení výbrusů a panu doktorovi Janu Podanému za umožnění přístupu ke konfokálnímu mikroskopu. Na závěr pak děkuji firmě SurfaceTreat a.s. za poskytnutí práškových hmot, firmě Hanyko Praha s.r.o. za přístup k metalografické pile.

Práce probíhaly v rámci projektu ZETA TJ01000310 grantové agentury TAČR ve spolupráci ČVUT v Praze a SurfaceTreat a.s. a projektu MŠMT program NPU1, projekt č. LO1207.

## Seznam symbolů

$A$	plocha rozhraní kov-plast ( $mm^2$ )
$F$	síla (N)
$PE$	polyethylen
$PPE$	PE DOWLEX plazmově upravený
$ZSPE$	PE ICORENE bez plazmové úpravy

$přípona Air$	pracovní plyn vzduch
$přípona O_2$	pracovní plyn kyslík
$přípona N$	vzorky bez mezikroku slinutí PE
$přípona S$	vzorky s mezikrokem slinutí PE

$\tau$  smyková pevnost (MPa)

## Literatura

- [1] P. MITSCHANG et al. *Induction Heated Joining of Aluminum and Carbon Fiber Reinforced Nylon 66*. Journal of THERMOPLASTIC COMPOSITE MATERIALS, Vol. 22. SAGE Publications, 2009, 767-801. DOI: 10.1177/0892705709105969. ISBN 10.1177/0892705709105969. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0892705709105969> (cit. 31. 03. 2018).
- [2] T. REINCKE a K. DILGER. *Fusion bonding of CFR-PA6 and steel using inductive heating*. SAMPE Conference Proceedings. Seattle, WA, 2017.
- [3] A. BAUERNHUBER a T. MARKOVITS a J. TAKÁCS. *Investigating the Pulse Mode Laser Joining of Overlapped Plastic and Metal Sheets*. Physics Procedia vol. 83. 2016, 1094-1101. DOI: 10.1016/j.phpro.2016.08.115. ISSN 18753892.
- [4] K. FUMINOBU a K. SHOTARO a K. YUSUKE. *Effects of molding conditions on injection molded direct joining using a metal with nano-structured surface*. Precision Engineering: Volume 45. 2016, s. 203-208. ISSN 0141-6359.
- [5] M. DEMES et al. *Creating polymer metal hybrids of hot stamped steel and fiber-reinforced thermoplastics using residual process heat*. SAMPE Conference Proceedings. Seattle, WA, 2017.
- [6] T. REINCKE a S. KRELING a K. DILGER. *Roll forming for multi-material composites*. SAMPE Conference Proceedings. Long Beach, CA, 2016.
- [7] S. EBNEAJJAD a C. F. EBNEAJJAD. *Surface treatment of materials for adhesive bonding*. Second edition. Amsterdam: William Andrew, an imprint of Elsevier, 2014. ISBN 978-0-323-26435-8.
- [8] D. HEGEMANN a H. BRUNNER a C. OEHR. *Plasma treatment of polymers for surface and adhesion improvement*. DOI: 10.1016/S0168-583X(03)00644-X. ISBN 10.1016/S0168-583X(03)00644-X. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0168583X0300644X> (cit. 31. 03. 2018).
- [9] Z. WEBEROVÁ. *Methods of adhesive bonding joints testing*. Praha, 2016. Bakalářská práce. ČVUT v Praze.
- [10] J. SEZEMSKÝ. *Vliv úpravy povrchu polymerního prášku na pevnost spoje mezi kovem a plastem*. Praha, 2017. Bakalářská práce. ČVUT v Praze.
- [11] F. JENÍK. *Studium vlivu úpravy povrchu na kvalitu spoje plast-kov*. Praha, 2017. Bakalářská práce. ČVUT v Praze.
- [12] Z. WEBEROVÁ a P. ŠPATENKA. *Využití plazmové úpravy práškových plastů pro spojování polyolefinů s kovy*. Studentská tvůrčí činnost 2017. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2017. ISBN 978-80-01-06143-5. Dostupné z: [https://stc.fs.cvut.cz/history/2017/sbornik/papers/pdf/6594.pdf?\\_=14917685351](https://stc.fs.cvut.cz/history/2017/sbornik/papers/pdf/6594.pdf?_=14917685351) (cit. 31. 03. 2018).

- [13] The Dow Chemical Company. *DOWLEX 2629.10UE Datasheet*. 2013. Dostupné z: <https://catalog.ides.com/docselect.aspx?I=38903&E=89043&DOC=DOWTDS&DS=123&DK=STD&DC=en> (cit. 31. 03. 2018).
- [14] Prospector. *ICORENE® 1613 BK85 Datasheet*. 2011. Dostupné z: <http://prospector.ides.com/DataView.aspx?E=139923> (cit. 31. 03. 2018).