



TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Ing. Emil Schwarzer

**STUDIUM TVAŘITELNOSTI POVLAKOVANÝCH PLECHŮ S PLAZMO-
CHEMICKOU PŘEDÚPRAVOU POVRCHU**

STUDY OF FORMABILITY OF COATED SHEETS FROM THE PLASMA
CHEMICAL PRETREATMENT OF SURFACES

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Obor: Strojírenská technologie
Školitel: doc. Ing. MILAN DVOŘÁK, CSc.
Oponenti:

Datum obhajoby:

Klíčová slova

multitryskový plazmový systém, povlakované plechy, ohýbání, plech, deformace

Key words

multi-jet plasma system, coated sheets, bending, sheet, deformation

Obsah

1 ÚVOD	6
2 TVAŘITELNOST OCELOVÝCH PLECHŮ S POVRCHOVOU ÚPRAVOU	6
2.1 Hodnocení vhodnosti plechů k tažení	7
3 TECHNOLOGIE OHÝBÁNÍ POVRCHOVĚ UPRAVENÝCH PLECHŮ	8
3.1 Problematika povrchově upravených plechů v praxi	8
3.2 Kataforézní lakování	10
4 ZKOUŠENÍ PLECHŮ	11
4.1 Ošetření povrchu plazmovými tryskami	12
5 SEZNAM VZORKŮ URČENÝCH PRO EXPERIMENTY	14
5.1 Přehled vzorků pro multitryskový plazmový systém	17
5.2 Vybrané vzorky pro tahovou zkoušku	18
5.3 Vzorky pro vyhodnocení změny tloušťky a deformací	18
5.4 Testy na odstupňovaném ohýbacím přípravku	19
6 CÍLE EXPERIMENTU	20
7 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE	21
8 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VZORKŮ	22
8.1 Erichsenova zkouška hlubokotažnosti	22
8.2 Tahová zkouška	23
8.3 Výsledky z tahové zkoušky	26
8.4 Ohybová zkouška	26
8.5 Testované vzorky pod mikroskopem	28
8.6 Výsledky z ohybové zkoušky	29
8.7 Vyhodnocení změny tloušťky a deformací na vybraných vzorcích	30
8.8 Stanovení tahové a tlakové deformace	31
8.9 Grubbsův test	33
ZÁVĚR	35
SPLNĚNÍ CÍLŮ PRÁCE	37
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	39

1 ÚVOD

Ve strojírenství, zvláště v automobilovém průmyslu jsou velké požadavky na kvalitu a přesnost. Je očekávána velká pružnost a dynamičnost výroby. Především první kontakt uživatele s výrobkem je důležitý. Požadovaná vlastnost povrchu může být korozivzdornost, tvrdost, otěruvzdornost, ale také vzhledové vlastnosti. V praxi to mohou být kabiny zemědělských strojů, konstrukce montážních linek, venkovní konstrukce, které podléhají především korozi. Ochrana povrchů je i bezpečnostní prvek, který může hrát roli v prostředí, kde se nachází agresivní činitelé, jako je sůl, kyselé prostředí, vlhkost. Tyto konstrukce je potřeba chránit vrchním povlakem, který musí odolávat nepříznivým vlivům počasí. Povlaky lze využít ve stavebnictví, leteckém průmyslu všude tam, kde je kladen velký důraz na ochranu a dlouhou životnost daného materiálu. Velká pozornost je směřována i na ekologickou likvidaci materiálu. Přinést společnosti co možná nejekologičtější způsob nanášení povrchových úprav materiálu.

Tato doktorská práce přináší další poznání a posune bádání k dalším úvahám a především posune dál studium tvařitelnosti povlakovaných plechů s plazmo-chemickou předúpravou povrchu.

2 TVAŘITELNOST OCELOVÝCH PLECHŮ S POVRCHOVOU ÚPRAVOU

Tvařitelnost (plasticita) je vlastnost materiálu měnit tvar bez makroskopického porušení. Jedná se o funkci materiálu, teplotních a rychlostních podmínek, napětového stavu, historie napětí a deformace, geometrického faktoru a vnějšího prostředí. [1], [2] Při tváření povrchově upravených plechů nesmí dojít z důvodu zachování požadovaných vlastností k poškození povlaku naneseném na základovém plechu. [3]

Technologická tvařitelnost je táž vlastnost vztažená na konkrétní tvářecí proces nebo vázaná na konkrétní zkoušku. Její míra je posuzována podle ukazatelů tvařitelnosti vycházejících ze zkoušek napodobujících jednotlivé tvářecí procesy. [4]

Použitím mechanicko-matematického směru (parametry procesu deformace, změny tvaru a rozměru, deformační síly a práce, atd.) a fyzikálně chemického směru (závislost deformačního odporu a plasticity na chemickém složení, teplotě, rychlosti atd.) je možno dosáhnout navržení takového technologického postupu, při kterém zajistíme nízkou spotřebu materiálu a energie a také nízké zatížení nástrojů a strojů. [5] Technologie tváření ocelových plechů patří do skupiny plošného tváření a jedná se o základní technologii strojírenské výroby. Při této technologii se mění tvar, rozměry a vlastnosti výchozího polotovaru vlivem plastické deformace bez porušení soudržnosti. [6] Všechna pravidla tvařitelnosti materiálu se obecně týkají i tvařitelnosti při plošném tváření. Odlišnost je v důrazu na jednotlivé faktory

ovlivňující tuto složitou funkci. Je zdůrazněn zejména vliv geometrického faktoru a kvality povrchu. [4]

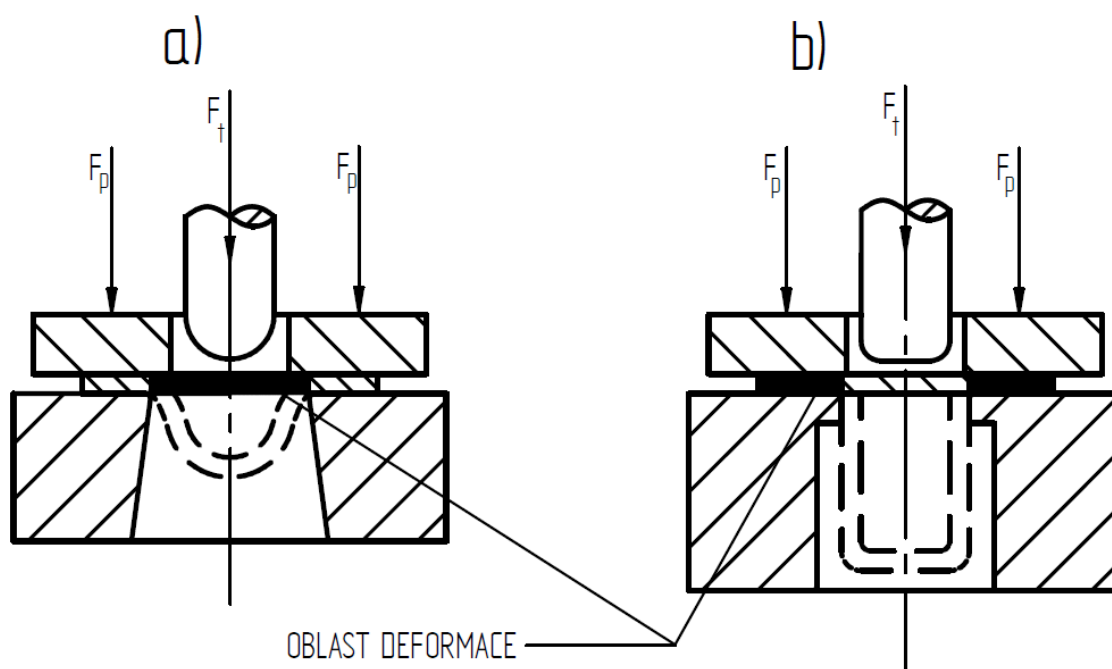
Napěťový stav je zpravidla zjednodušen na rovinnou napjatost. V případě porušení je řídicím mechanismem ztráta stability, na kterou navazuje v závěrečné fázi porušení tvárným lomem. Při tažení se rozeznávají 3 typy ztráty stability:

- na úrovni velikosti zrna,
- tvarové defekty, vlny, vybouleniny,
- lokalizace deformace v krčku – patří k nejdůležitějším. [7]

2.1 HODNOCENÍ VHODNOSTI PLECHŮ K TAŽENÍ

Plošné tváření je charakterizováno neustálým rovinným stavem napjatosti. Zahrnuje celou řadu technologií, při kterých se skutečný stav napjatosti na jednotlivých stádiích mění od jednoosého tahu, přes smyk, ke kombinovanému tahu a tlaku a dvojosému tahu.

Technologie jsou ohraničeny hlubokým tažením a vypínáním. Většina technologií v sobě kombinuje obě tyto operace. [8]



Obr. 1 Schéma a) vypínání b) hlubokého tažení. [8]

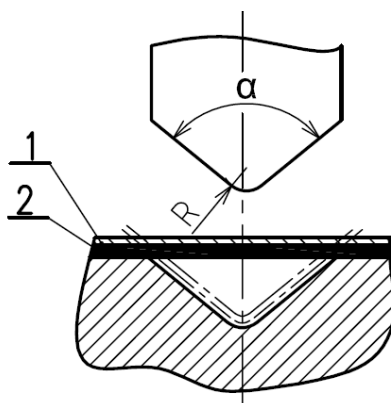
Hodnocení vhodnosti tenkých plechů k tažení je v průmyslové praxi věnována soustavná pozornost, viz. obr. 1. Snahou je najít takové metody zkoušení, které by poskytly co nejvěrnější obraz o chování materiálu při tažení výtažku, a to především u složitých a nepravidelných tvarů. Technologická tvařitelnost je při plošném tváření zjišťována pomocí základních a napodobujících (technologických) zkoušek. [3], [8]

3 TECHNOLOGIE OHÝBÁNÍ POVRCHOVĚ UPRAVENÝCH PLECHŮ

Při ohýbání povrchově upravených plechů je povrchová vrstva různě namáhána v závislosti na její poloze v ohýbadle. V případě, že je plastická vrstva na vnější straně, je namáhána tahovým napětím, vlivem kterého je přitlačena na základní materiál. [9]

Je-li plastická vrstva na vnitřní straně, je namáhána tlakovým napětím, viz. obr. 2. Zvětšení drsnosti funkčních částí nástroje způsobuje vyšší tření na kontaktních plochách, což může vést k poškození povrchové vrstvy. Ze zkušeností firem zabývajících se zpracováním plechů s plastickou vrstvou vyplývá, že minimální poloměr ohybu plechu s nanesenou vrstvou plastické hmoty tloušťky větší než 150 μm je v případě tahových napětí v povlaku stejný jako tloušťka základního materiálu. [10]

Pokud je tloušťka povlaku menší než 150 μm , doporučuje se volit větší poloměr ohybu, aby nedošlo k vytvoření trhlin v povrchové vrstvě. [11]



Obr. 2 Schéma ohýbání povrchově upraveného plechu (ohyb do V
1 – základní materiál, 2 – povlak). [4]

3.1 PROBLEMATIKA POVRCHOVĚ UPRAVENÝCH PLECHŮ V PRAXI

Ve strojírenském odvětví se v dnešní moderní době nanášejí barvy a laky převážně elektroforézním způsobem.

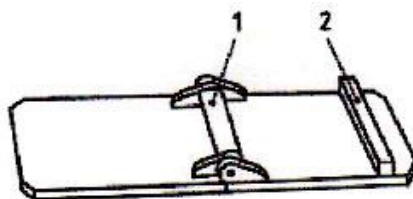
Kataforéza je jedna z nejprogresivnějších výrobních technologií nanášení základních barev s vysokým stupněm antikoroze ochrany kovů. Metoda kataforézního lakování patří mezi nejmodernější technologie povrchové úpravy kovových výrobků. V současné době nemá kataforéza v řadě výrobních oblastí srovnatelnou konkurenci. Největší podíl na rozvoji kataforézní technologie má automobilový průmysl, kde antikoroze odolnost karosérií a ostatních komponentů je stěžejní pro většinu výrobců. Vysoká kvalita povrchové úpravy, spolu s výhodami ekonomickými a ekologickými umožnila tuto technologii k využití i v dalších oborech strojírenství a

spotřebního průmyslu. Narušení vazeb mezi základním ocelovým materiálem a jeho povlakem způsobují vady, vyskytující se při plošném tváření (vlnitost povrchu plechu, tvarová deformace, lámavost, uvolňování kovu, nevhodná struktura povrchu), nebo špatná volba kombinace základní materiál a povlak. [12]

Současné požadavky na technologii povrchové úpravy jsou zachovat celistvost povrchové vrstvy a všech vazeb mezi povrchem a základním materiálem po tažení resp. ohýbání. Povrchově upravené ocelové plechy dnes již zasahují do většiny průmyslových odvětví a svým významem rozhodují o kvalitě a funkční spolehlivosti budoucích výrobků. Ochranné povlaky mají nezastupitelnou úlohu u velmi široké oblasti používaných konstrukčních materiálů. Pro oblast zkoušení a hodnocení přilnavosti povlakovaných plechů je charakteristická velká rozmanitost metod a postupů. [13], [14]

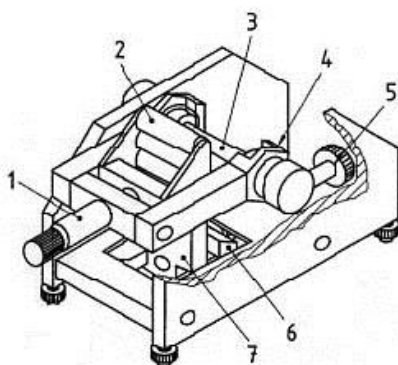
Vedle používaných zkušebních postupů ke zkoušce přilnavosti pro kovové a jiné povlaky patří například zkouška přilnavosti povlaků mřížkovým řezem, zkouška odolnosti povlaku v Erichsenově přístroji. Dále ke zjišťování odolnosti vytvořených povlaků vůči praskání nebo odtrhování povlaku z ocelového plechu po ohybu zkoušeného povrchově upraveného plechu se provádí v laboratořích zkouška ohybem o 180° na válcovém trnu. [15], [16], [17]

Zkušební válce jsou různého průměru a musí se měnit. Při postupném testování vzorků plechu s povlaky je třeba měnit válce o různých průměrech a přitom se sleduje, kdy se objeví trhлина v povlaku, resp. jeho odloupení od ocelového plechu. Rozměr vzorků je pro existující typy zkušebních zařízení omezen šířkou 50 mm a tloušťkou 1 mm. Typ 1, viz obr. 3, je vhodný ke zkoušení povlakovaných plechů do tloušťky 0,3 mm a typ 2, viz obr. 4, se doporučuje ve výše uvedené normě ke zkoušení vzorků tloušťky do 1 mm. Jednotlivé průměry válcového trnu jsou od průměru 2 do průměru 32 mm s tolerancí $\pm 0,1$ mm. Doporučují se trny i jiných průměrů dle ČSN EN ISO 1519. Vždy je třeba provést po příslušném ohybu demontáž a následně montáž zkušebního zařízení pro další experiment. [18], [8]



Obr. 3 Zkušební zařízení typu 1. [19]

1-trn, 2-zarážka.



Obr. 4 Zkušební zařízení typu 2. [19]

1-šroubovací držadlo, 2-ohýbací část, 3-trn,
4-ložisko trnu, 5-nastavovací šroub,
6-upínací čelist, 7-přítlačná čelist.

3.2 KATAFORÉZNÍ LAKOVÁNÍ

Kataforéza je ekologický způsob lakování patřící k hospodárnějším způsobům lakování ocelových, pozinkovaných a hliníkových výrobků. Při kataforéze se používají kationické nátěrové hmoty na bázi epoxidů popř. akrylátů (ve vodě rozpustné) s velmi nízkým obsahem organických rozpouštědel (okolo 2 %) obsahující částice laku ve formě polymerních kationtů. Při lakování je výrobek ponořen do lakovací lázně a zapojen jako katoda. Umístěním stejnosměrného napětí mezi výrobek a proti-elektrodu (anodu) se vytvoří elektrické pole, které usměrní pohyb polykationtů směrem ke katodě. Na povrchu výrobku se vylučují hydroxylové ionty. S narůstající tloušťkou povlaku roste odpor vrstvy a tím klesá rychlost vylučování. Vylučování pokračuje přednostně na místech s doposud malou tloušťkou vrstvy (v místech stíněných, v dutinách apod.) Tím dochází k tvorbě velmi rovnoměrného povlaku na celém povrchu včetně těžko přístupných míst. Po dosažení určité tloušťky povlaku na celém povrchu se další vylučování zastaví. Tloušťka závisí především na velikosti použitého napětí, běžně se pohybuje mezi 15 a 30 μm , při extrémních požadavcích až okolo 45 μm (tzv. silnovrstvá kataforéza). Elektricky vyloučená vrstva pevně lne k podkladu, přebytečný lak se opláchne. Vyloučený povlak je nutno vypálit při teplotách okolo 160 až 180°C, kdy dochází k polymeraci a povlak získává konečné vlastnosti. Vzhledem k náročnosti změny odstínu se používá kataforéza především k základování, kde vrchní povlak je možné vytvořit práškovým nebo mokrým lakováním. Použití této kombinace dochází ke značnému prodloužení životnosti výrobku a lakované vrstvy. [20]

Během velice krátké doby nahradila klasické a zejména anaforézní postupy. Největší zásluhu na rozvoji kataforézní technologie má automobilový průmysl, kde je vysoká antikorozivní odolnost karosérií a ostatních komponent prioritou všech světových výrobců. Požadovaná vysoká kvalita musí být jednoznačně dodržena i za výhodných ekonomických a ekologických podmínek. Symbiózu všech těchto někdy protikladných nároků kataforéza splňuje. [21]

4 ZKOUŠENÍ PLECHŮ

Teoretická část dizertační práce je zaměřena na rozbor problematiky, která je řešena v experimentální části.

Vyvinutý zkušební přípravek, na kterém byla pomocí ohybu testována přilnavost a porušení povlaků, bez ošetření plazmovými tryskami a taktéž po ošetření plazmovými tryskami. V rámci experimentu je testována přilnavost (porušení) povlakované vrstvy v systému ocel – povlak – plazma a její různá kombinace.

Test přilnavosti a porušení povlaku:

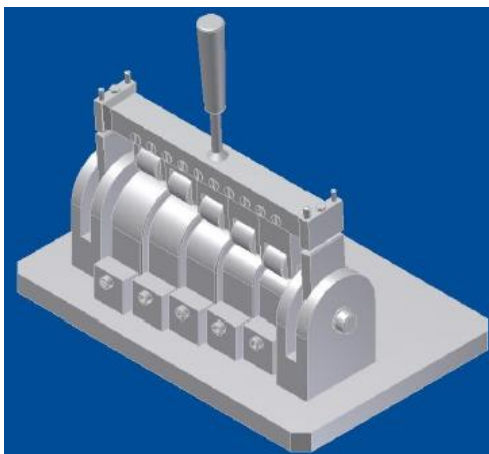
Na základě požadavku testování přilnavosti a porušení povlaku na povlaku (příp. základním materiálu) je v rámci řešení uvedené problematiky použitý a následně i testován odstupňovaný ohýbací přípravek na povlakované plechy.

Odstupňovaný ohýbací přípravek na povlakované plechy:

Stávající vyměnitelné odstupňované válcové trny jsou nahrazeny pevně ukotvenými válcovými segmenty o navržených průměrech:

- válcový segment – 1 : $R=35$ mm
- válcový segment – 2 : $R=29$ mm
- válcový segment – 3 : $R=23$ mm
- válcový segment – 4 : $R=17$ mm
- válcový segment – 5 : $R=11$ mm

Přes tyto segmenty jsou ohýbány o 180° jednotlivě všechny zkušební vzorky za pomoci otáčivých kladek viz. obr. 5 až do minimálního poloměru válcového segmentu, na kterém dojde k porušení povlaku.



Obr. 5 Model odstupňovaného ohýbacího přípravku s kladkami. [8]

Kladka simuluje ohyb, kdy nesmí dojít k poškození povlaku nebo napěchování povlaku z důvodu následného zkoumání míry porušení povlaku.

Ohnutý vzorek je při zřetelném poškození povlaku posuzován vizuálně. Přípravek je koncipován jako montážní jednotka. Kladky i segmenty jsou k ohybníku připevněny pomocí šroubů, jejich přestavení je tedy velmi snadné a v krátkém časovém intervalu.

Test přilnavosti (porušení) povlaku:

Zkouška odolnosti povlaku je aplikována na odstupňovaném ohýbacím přípravku. Vzdálenost kladky od segmentu je nastavena pomocí listových měrek přesně podle tloušťky konkrétního ohýbaného plechu.

K ohybu jsou zvoleny vybrané vzorky č. 3, 18, 14, 28, 34 a 38. Z čtvercových vzorků jsou vždy nastříhány pásy o rozměru 90 x 10 mm. V kap. 11.5 jsou ohnuté testované pásy uříznuty na přesné pile a vybroušeny do jemné struktury a zalité do pryskyřice. Poté byly testované vzorky zkoumány pod mikroskopem.

4.1 OŠETŘENÍ POVRCHU PLAZMOVÝMI TRYSKAMI

Na základní ocelový plech a jeho povlak je nutno pohlížet jako na systém. Při technologických operacích tváření dochází však u těchto dvojic k narušení společných vazeb. Narušení těchto vazeb může v některých případech vést až k narušení celistvosti povlaku a jeho následné odlupování. Narušení vazeb mezi základním ocelovým materiálem a jeho povlakem mohou způsobovat vady, vyskytující se při plošném tváření (vlnitost povrchu plechu, tvarová deformace, lámavost, uvolňování kovu, nevhodná struktura povrchu) nebo špatná volba kombinace základní materiál vs. povlak. Snahou je tedy zachovat celistvost povlaku, tedy všech vazeb mezi povlakem a základním materiálem. Tohoto lze dosáhnout optimalizací tvářecích operací, tzn. optimalizací všech technologických parametrů a dále zlepšením technologií nanášení povlaku. [22], [8]



Obr. 6 Plazmo-chemické zařízení s dopravníkem. [23]

Ve zjednodušení lze hovořit o novém způsobu vybuzení vysokotlakého elektrického výboje uvnitř duté elektrody a na jejím ústí – tzv. vysokotlaká dutá katoda, kterou protéká pracovní médium – nejčastěji argon, jež se v tomto výboji aktivuje. Plazma tryská z dutiny a z ústí plazmové trysky do vnějšího prostředí, kde působí na zkoumaný ocelový plech s povlakem. Specifické vlastnosti výboje jsou dány válcovou symetrií duté katody a rovněž specifickým chováním inertních plynů ve výboji. Vhodná konstrukce plazmové trysky do tvaru a velikosti tužky umožňuje snadnou manipulaci zařízením a tím přesně směřovat působení proudícího plazmatu o vysoké fyzikální a chemické reaktivitě. Seskupení trysek do lineálních útvarů umožňuje v našem případě působit na povrch ocelového plechu s povlakem viz. obr. 6. Výboj vysokotlaké duté katody s proudícím plazmatem ve variantě s dielektrickou kapilárou (plazmová tužka) je pro průmyslové aplikace generován na frekvenci 13,56 MHz z důvodu nejvyšší variability vlastností plazmatu pro technické aplikace. Na této frekvenci je možné použít fyzické oddělení plazmatu od elektrody, tedy bariérový typ výboje a současně je zde možné využít vazby plazmatu na elektrickou kapacitu okolí, tj. výboj buzený pouze jednou elektrodou – jednopólový výboj. Za základ trysky se používá dielektrická kapilára (nejčastěji křemenné sklo nebo korundová keramika), kterou protéká pracovní plyn – nejčastěji argon včetně přidávaných příměsí. Intenzita elektrického pole elektrody obvykle nestačí na jeho samostatné zapálení, proto se výboj zapaluje předionizací prostředí plynu v dielektrické kapiláře trysky pomocí Teslova transformátoru.

Po jeho zapálení je výboj vysokotlaké duté katody primárně aktivně generován uvnitř dutiny elektrody, odkud je „vytažen“ proudem plynu a veden dielektrickou kapilárou směrem k ústí trysky. Odtud tryská do vnějšího prostředí, přičemž se kapacitně váže na elektrickou kapacitu kapiláry a vnějšího okolí. Výboj je po celou délku svého plazmového kanálku aktivně generován, viz jednopólový výboj na obr. 15. Vzhledem k relativně malému objemu plazmatu a dalším jeho vlastnostem se může pohybovat absorbovaný výkon v plazmovém kanálu v rozmezí 10^2 - 10^5 W·cm³ dle zvolených pracovních podmínek. [8]

Použití multitryskového plazmového systému

Ovšem při použití multitryskového plazmového systému viz. obr. 7 o šířce 100 mm s devatenácti tryskami poskytující nízkoteplotní a neizometrický výboj za atmosférického tlaku byl následně nanesený povlak STEEL, který nevykazoval známky poškození po ohybu vzorku na odstupňovaném ohýbacím přípravku viz. obr. 8.



Obr. 7 Ukázka použitého multitryskového systému při experimentu.

U vzorků o tloušťce 1,5 mm, šířce 18 mm a délek v intervalu od 98 do 181 mm z nízkouhlíkové oceli dle DIN EN 327 s nanesenými povlaky Al tloušťky $25 \pm 5 \mu\text{m}$ a STEEL $47 \pm 7 \mu\text{m}$ bylo zjištěno, že po aplikaci a optimalizaci parametrů plazmatu za použití plazmového zařízení, bylo dosaženo funkčních povlaků na poloměrech válců R29 a R33 ve zkušebním odstupňovaném ohýbacím přípravku. U menších poloměrů zkušebních válců se vyskytly nepatrné defekty v povlaku STEEL. [18], [24]



Obr. 8 Fotografie funkčního povlaku STEEL po ohybu s aplikací plazmy. [18]

5 SEZNAM VZORKŮ URČENÝCH PRO EXPERIMENTY

Pro další experimenty byl použit nový odstupňovaný ohýbací přípravek vyvinutý na Ústavu strojírenské technologie VUT v Brně.

Nový odstupňovaný ohýbací přípravek svojí konstrukcí umožňuje testování povlakovaných plechů o větší tloušťce, než současné zkušební přípravky doporučené normou ČSN EN ISO 1519. [16], [25] Přípravek umožňuje současný ohyb pěti vzorků v intervalu hodnot úhlů do 180° pomocí kladek přes válcové segmenty. Lze tak zhotovit „U“ ohyby s vnitřním poloměrem R11, R17, R23, R29 a R35 mm. Válcové segmenty lze snadno vyměnit za jiný poloměr. Ohnutý vzorek je v případě zřetelného poškození povlaku posuzován vizuálně, a pokud nedojde k zjevnému poškození povlaku za použití všech segmentů a následuje bližší

zkoumání funkčnosti povlaku na mikrotrhliny pod mikroskopem. Cílem experimentu bylo testovat kvalitu přilnavosti nátěru u vybraných ocelových vzorků.

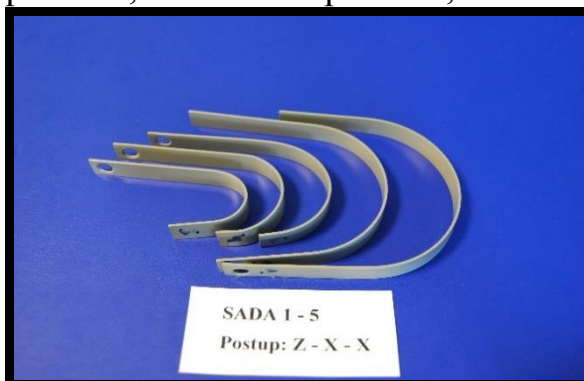
Na odstupňovaném ohýbacím přípravku byly testované vzorky ohnuty na poloměrech R11, R17, R23, R29 a R35 mm. Testované vzorky jsou uvedeny v tab. 2. Ocelové pásy mají rozměr 90 x 10 mm.

Ohnuté ocelové pásy

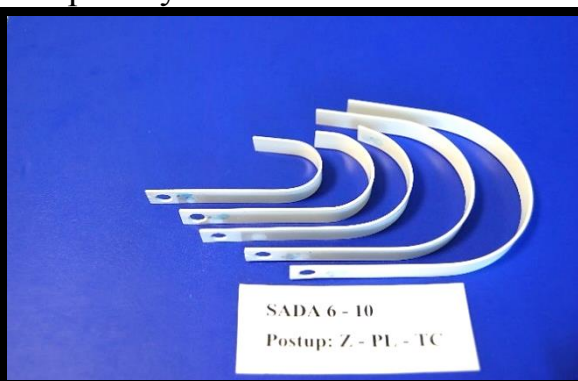
Vzorky ohnuté na odstupňovaném ohýbacím přípravku jsou na obrázcích 9 až 16 kde je vidět ukázka ohnutých pásků plechu o rozměrech 90x10 mm, tloušťky 1 mm s povlakem, který je popsán u každého obrázku.

Poznámka k obrázkům 9 až 16:

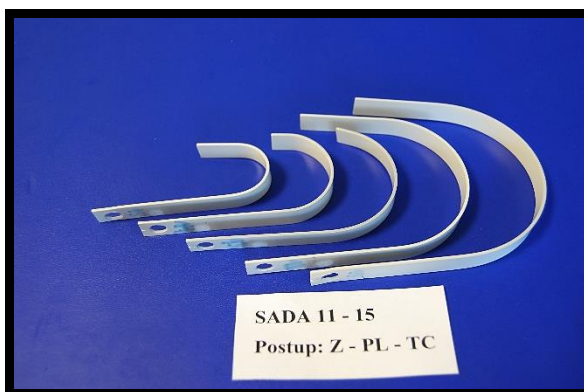
BP – bez povlaku, Z – základ, TC – topcoat, PL – plazma, X – žádná úprava povrchu, bez dalšího povlaku, bez nanesení plazmy.



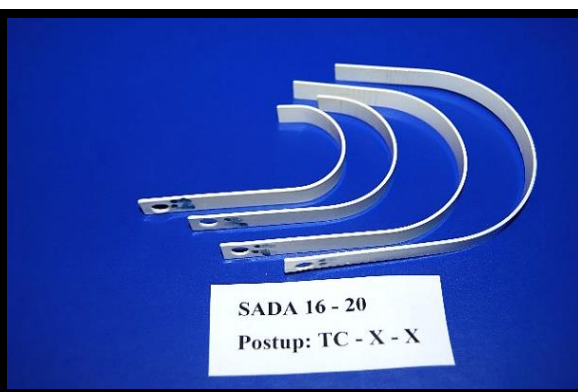
Obr. 9 SADA 1 - 5 Postup: Z - X - X



Obr. 10 SADA 6 - 10 Postup: Z - PL - TC



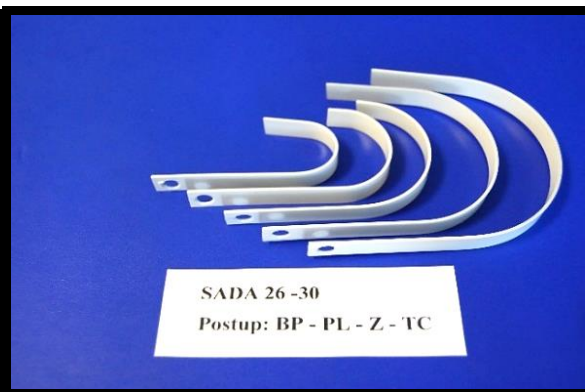
Obr. 11 SADA 11 - 15 Postup: Z - PL - TC



Obr. 12 SADA 16 - 20 Postup: TC - X - X



Obr. 13 SADA 21 - 25 Postup: TC - PL - X



Obr. 14 SADA 26 - 30 Postup: BP - PL - Z - TC



Obr. 15 SADA 31 - 35 Postup: BP - PL - Z - TC



Obr. 16 SADA 36 - 40 Postup: BP - X - X

Vybrané ocelové ohnuté pásky s odlišným postupem nanášením plazmy

Jednotlivé vzorky měly odlišný postup ošetření a lišily se použitým médiem. Čistý kovový povrch z laseru je okartáčovaný na speciálním stroji. Plech bez povlaku je surový materiál, ocel S235JRG2. Základní vrstva je nanesená pomocí kataforézního lakování (KTL). Topcoat je finální povlak, který je konečným povlakem na plechu a chrání karoserii před korozi a vnějšími vlivy. Před aplikací plazmatu, byly vzorky odmaštěny lihem. Ošetření povrchu plazmou probíhalo mezi vrstvami, podle tabulky 1.

Tab. 1 Vybrané testované vzorky s ošetřeným povrchem a použitým médiem

Vzorek	Ošetření povrchu	Použité médium
3	pouze základ	----
14	bez povlaku + základ+ plazma + topcoat	A _r +N ₂
18	základ + topcoat	----
28	bez povlaku + plazma + základ + topcoat	A _r +O ₂
34	bez povlaku + plazma + základ + topcoat	A _r +N ₂
38	bez povlaku	----
8	bez povlaku + základ + plazma + topcoat	A _r +O ₂
23	bez povlaku + základ + topcoat + plazma	A _r +O ₂

5.1 PŘEHLED VZORKŮ PRO MULTITRYSKOVÝ PLAZMOVÝ SYSTÉM

Tab. 2 Opracování povrchu ocelových vzorků s různou povrchovou úpravou plazmovými tryskami

ČÍSLO EXPER.	ČÍSLO VZORKU	VÝKON P / W	PRŮTOK					POSUV		POČET PŘEJEZ DŮ
			Ar l/min	N ₂ l/min	O ₂ l/min	Ar+H ₂ O l/min	CO ₂ l/min	m/min		
1	A- 30+35*	550	50	-	-	-	-	3	2x	
	B- 15+10*									
	C-25									
2	A- 34+29*	600	50	0,2	-	-	-			
	B-14*+6									
	C-24									
3	A- 33+28*	550	50	-	0,2	-	-			
	B-13*+8									
	C-23									
4	A- 27*+32	600	40	-	-	13	-			
	B-12+7*									
	C-22									
5	A- 31*+26	600	50	-	-	-	0,2			
	B-11*+6									
	C-21									

Poznámka:

A – čistý kovový povrch (laser, kartáč - odmaštění)

B – se základním lakem

C – se základním lakem + finálním lakem

A, B, C – před aplikací plazmatu odmaštěny lihem, ocelové pásky s rozměrem 90 x 10 mm

*- označení vzorků, které byly plazmatem ošetřeny pouze z jedné strany (se zářezem)

Rf – generátor (13,56 MHz), atmosférický tlak – volná atmosféra

5.2 VYBRANÉ VZORKY PRO TAHOVOU ZKOUŠKU

Vybrané vzorky před tahovou zkouškou byly fotograficky zdokumentovány. Vzorky byly uříznuty na přesné pile ze čtvercového rozměru 90 x 90 mm na rozměr 90 x 10 mm. Rozměr 90 x 10 mm byl zvolen z toho důvodu, aby bylo možno udělat co nejvíce pokusů na trhacím zařízení. Na vzorky byly navařeny plechy elektrickým obloukem v ochranné atmosféře CO₂ viz. obr. 17, aby mohly být upnuty do čelistí na trhacím zařízení. Popis jednotlivých vzorků a postup nanášení povlaku a plazmy je v tab. 4.



Obr. 17 Přehled vzorků, které byly podrobeny tahovým testem.

5.3 VZORKY PRO VYHODNOCENÍ ZMĚNY TLOUŠŤKY A DEFORMACÍ

Postup nanášení povlaku u těchto vzorků byl v pořadí viz. tab. 3. Byla zvolena velká různorodost a kombinace jak použitých plynů tak i postup nanášení povlaků. Vyhodnocení změny tloušťky a deformací na vybraných vzorcích jsou v dizertační práci.

Tab. 3 Vybrané vzorky pro změny tloušťky a deformací

Vzorek	Ošetření povrchu	Použité médium
TC12	bez povlaku + základ + topcoat + plazma	Ar+N ₂
Z7	bez povlaku + základ+ plazma + topcoat	Ar+O ₂
BP15	bez povlaku + plazma + základ	A _r +CO ₂
BP16	bez povlaku + plazma + základ	A _r +H ₂ O
Z5 ₁	bez povlaku + základ+ plazma + topcoat	A _r
Z12	bez povlaku + základ+ plazma + topcoat	A _r +N ₂

5.4 TESTY NA ODSUPŇOVANÉM OHÝBACÍM PŘÍPRAVKU

Při experimentech s novým testovacím zařízením se ukázalo, že při poloměrech ohybu intervalu od R11 do R35 dochází k oddělení naneseného povlaku STEEL od původního povlaku Al, který byl součástí zkušební ocelového plechu tloušťky 1,5 mm. V další etapě řešení byl vyvinut technologický postup, který umožnil zvýšení přilnavosti povlaku STEEL při jeho ohýbání až o 180° (tvar „U“). Experimenty se uskutečnily ve spolupráci s MU Brno.

Ke zkoušení ocelového plechu s povlakem Al a STEEL podle DIN EN 327/EN 101143 s mezí pevnosti v tahu $R_m = 307$ MPa, smluvní mezi kluzu $R_{p0,2} = 154$ MPa, tažnosti $A_{80} = 43$ % a tloušťky 1,5 mm byl použit nový odstupňovaný ohýbací přípravek viz. obr. 18.

Nový odstupňovaný ohýbací přípravek svojí konstrukcí umožňuje testování povlakovaných plechů o větší tloušťce, než současné zkušební přípravky doporučené normou ČSN EN ISO 1519. Přípravek umožňuje současný ohyb pěti vzorků v intervalu hodnot úhlů do 180° pomocí kladek přes válcové segmenty. Lze tak zhotovit „U“ ohyby s vnitřním poloměrem R11, R17, R23, R29 a R35 mm. Válcové segmenty lze snadno vyměnit za jiný poloměr. Ohnutý vzorek je při zřetelném poškození povlaku posuzován vizuálně, pokud nedojde k zjevnému poškození povlaku ani na nejmenším průměru, pak dochází ke zkoumání povlaku na mikrotrhliny pod optickým mikroskopem.



Obr. 18 Fotografie odstupňovaného ohýbacího přípravku s kladkami. [18]

Kladka simuluje ohyb, kdy nesmí dojít k poškození povlaku nebo napěchování povlaku z důvodu následného zkoumání míry porušení povlaku.

V průmyslové výrobě dochází k tažení povrchově upravených plechů. Z tohoto důvodu byly k ohýbacímu přípravku vyrobeny i segmenty. Tyto segmenty jsou použity v případě simulace tažení povlaku (povlak namáhán tahem v přímém úseku) na zkušebních vzorcích. Zkouška tažení se realizuje na tenkých páscích plechu s povrchovou úpravou. Po tažení pásku pomocí segmentu je posuzována míra poškození povlaku. Přípravek je koncipován jako montážní jednotka. Kladky i segmenty jsou k ohybníku připevněny pomocí šroubů, jejich přestavba je tedy velmi snadná a rychlá. [18]

6 CÍLE EXPERIMENTU

Cílem experimentu bylo optimalizování složení plazmatu pro konkrétní nátěry na plech, aby po ovlivnění povrchu vzorků před nátěrem resp. více nátěrů, byla maximální přilnavost nátěru k ocelovému základu. Experimenty byly provedeny na zařízení jednak na VUT v Brně a také v kooperaci.

Na Ústavu strojírenské technologie, VUT-FSI v Brně byla provedena ohybová zkouška na odstupňovaném ohýbacím přípravku, který svojí konstrukcí umožňuje testování povrchově upravených plechů o větší tloušťce, než současné zkušební přípravky doporučené normou. [16], [25] Byl využíván pro experimenty ohýbání vzorků s nátěrem. Ohnutý vzorek ve zkušebním přípravku byl v případě poškození povlaku posuzován vizuálně, a pokud nedošlo k zjevnému poškození povlaku, následovalo bližší zkoumání funkčnosti povlaku na mikrotrhliny pod mikroskopem.

V rámci experimentů byl použitý multitryskový plazmový systém. [26], [18], [27], [24], [23], [28], [29], [30]

Výsledkem aplikace použitého multitryskového systému na zkušební vzorky s nátěrem při optimálních nastavených parametrech plazmatu proudícího z devatenácti trysek, jsou funkční vzorky po ohybu. Vybrané vzorky byly opatřeny vrchním povlakem (TOP COAT) se základem, nebo pouze základ (KTL) a další vzorky byly bez povlaku. Na vybraných vzorcích byla provedena zkouška hloubením podle Erichsena.

7 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Problematika tvařitelnosti povlakovaných plechů je poměrně komplexní. V rámci práce se nepředpokládá, že by byla vyřešena do všech důsledků. Práce si klade za cíl ověření, zda problematika tvařitelnosti povlakovaných plechů má vliv na mechanické vlastnosti materiálu, provést hodnocení tvařitelnosti plechů pomocí technologických zkoušek, vytipování složení plazmatu pro konkrétní navržené povlaky.

Hlavní cíle dizertační práce je možné charakterizovat následujícími body:

- a) Návrh metody použití multitryskového plazmového systému na zkušební vzorky s povlakem.
- b) Testování povrchově upravených plechů (vzorků) s nátěrem na novém odstupňovaném ohýbacím přípravku na Ústavu strojírenské technologie, odbor technologie tváření pro vybrané poloměry ohybu za účelem porovnání přilnavosti povlaku.
- c) Porovnání výsledků vzorků s použitím metody multitryskového plazmového systému na vybraných vzorcích TOP COAT+KTL, KTL, bez povlaku, společně s Erichsenovou zkouškou a pomocí Tarnogrodského přístroje pro úhly v intervalu (0° , 180°)
- d) Optimalizování složení plazmatu pro konkrétní navržené povlaky na ocelový plech S235JRG2, tloušťka 1 mm, aby po ovlivnění povrchu vzorku před nanesením povlaku, resp. více povlaků, byla maximální přilnavost povlaku k ocelovému základu.
- e) Výsledkem aplikace použitého multitryskového plazmového systému na zkušební vzorky při optimálních nastavených parametrech plazmatu budou funkční vzorky po ohybu s přesně definovaným poloměrem ohybu a úhlem ohybu.

8 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ VZORKŮ

Práce je zaměřena na kvalitu povrchově upravených ocelových plechů s nátěrem na testování ohybem a tažením. V rámci experimentů je použitý multitryskový plazmový systém, u něhož fyzikální podstata jevu spočívá v generování plazmatu za atmosférického tlaku. Výsledkem aplikace použitého multitryskového systému na zkušební vzorky s nátěrem při optimálních nastavených parametrech plazmatu proudícího z devatenácti trysek, jsou funkční vzorky s nepoškozeným povlakem po ohybu.

Zkoumané vzorky byly opatřeny vrchním polakem (topcoat) a základním povlakem. Další skupina byla pouze se základním povlakem. Ostatní zkoušené vzorky jsou bez povlaku.

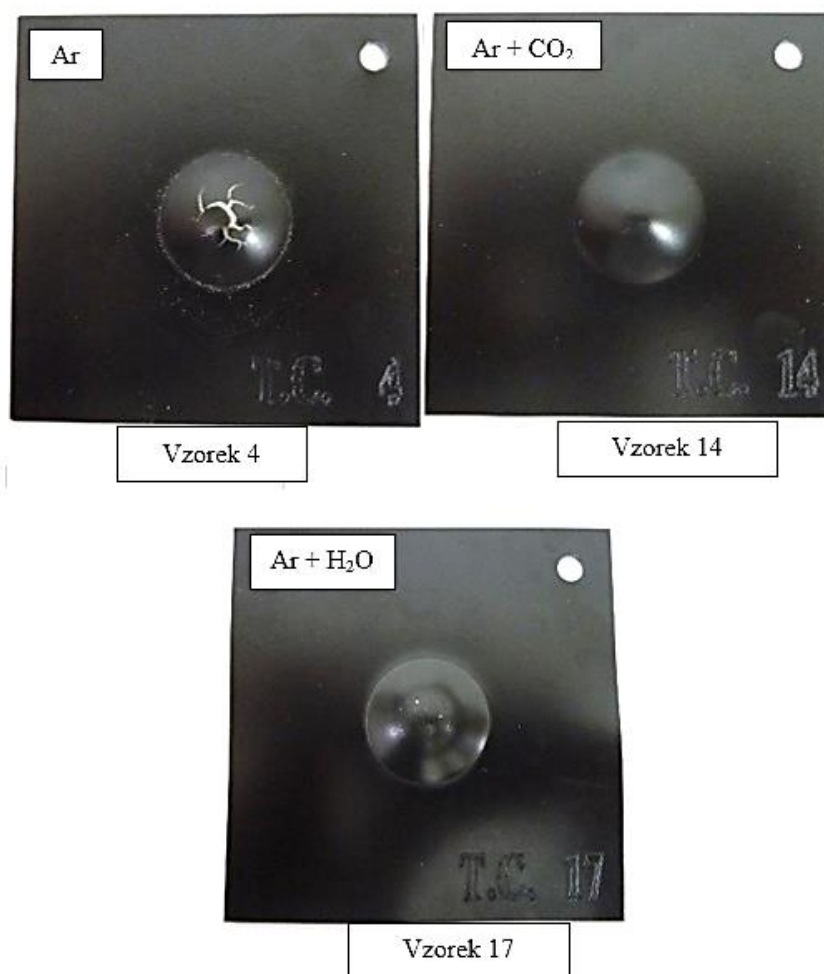
Vzorky s povlakem byly podrobeny zkoušce hloubením podle Erichsena. Pro konkrétní nátěry na plech bylo optimalizováno složení plazmatu tak, aby výsledkem byla maximální přilnavost nátěru k ocelovému základu vzorků. Experimenty byly provedeny v Ústavu strojírenské technologie VUT v Brně a taktéž v kooperaci s MU Brno na odstupňovaném ohýbacím přípravku na obr. 18, který svojí konstrukcí umožňuje testování povrchově upravených plechů.

Pokusy byly prováděny na multitryskovém plazmovém systému o šířce 100 mm s devatenácti tryskami poskytující nízkoteplotní a neizometrický výboj za atmosférického tlaku.

Dodané plechy s potvrzeným atestem a chemickým složením byly předem odmaštěny a následně okartáčované speciálním odjehlovacím strojem. Základní vrstva (KTL), u níž se teplota pohybuje v rozmezí 160 až 180 °C se nanášela elektroforézním způsobem. Tloušťka základního povlaku se u vzorku pohybovala v intervalu od 15 a 30 μm . Jedná se nelegovanou jakostní ocel s označením materiálu 1.0035, podle ČSN 41 0004 označení 10 004. Mechanické vlastnosti jsou: mez pevnosti v tahu $R_m = 310$ až 540 MPa, mez kluzu $R_{eH} = 185$ MPa, tažnost $A = 11\%$. [31]

8.1 ERICHSENOVA ZKOUŠKA HLUBOKOTAŽNOSTI

Byla vyhodnocena hlubokotažnost podle Erichsena u plechů č. 4, 14 a 17. viz. obr. 19. U vzorků na obr. 19 byl multitryskový plazmový systém použit v následujícím pořadí. Na výchozí stav plechu byl nanesen základní nátěr, následně chemicky ošetřen multitryskovým plazmovým systémem a finálně nanesen topcoat (vrchní povlak).



Obr. 19 Vzorky ocelového plechu (90x90x1 mm).

Na vzorku 4, kde byl použitý argon, bylo poškození povlaku pod hranicí IE 4 mm. Vzorek 14 s médiem $\text{Ar} + \text{CO}_2$ se choval o něco lépe. Náznak poškození se projevoval u hodnoty IE 3,7 mm, kde byly pouhým okem viditelné trhliny na vnějším povlaku. Vzorek 17 s médiem $\text{Ar} + \text{H}_2\text{O}$ byl vyhodnocen jako nejlepší vzorek z této série zkoušek podle Erichsena. Hodnota poškození byla až při IE 7,5 mm.

8.2 TAHOVÁ ZKOUŠKA

Výsledků této zkoušky lze použít při konstrukčních návrzích apod. Jedná se o statickou zkoušku (pomalu vzrůstající zátěžná síla, nebo konstantní síla). Zkoušený materiál je upraven do vzorku, jehož parametry stanoví ČSN EN 10002. Vzorek se zkouší na trhacím zařízení, dle potřeby, často až do roztržení (trvalá plastická deformace). Stroj během zkoušení zaznamenává a vyhodnocuje celou řadu veličin. Výsledkem je tahový diagram, závislost zatěžovacího napětí na prodloužení vzorku.

Popis experimentu a jeho průběh

Tento test je zaměřen na studium vlivu definovaných hodnot deformace v tahu ε_t a účinku nízkoteplotního plazmatu na přilnavost zvoleného povlaku na ocelových vzorcích s využitím tahové zkoušky plochých zkušebních tyčí. Vzorky byly vyrobeny technologií obráběním a svařováním. [32], [33] Ploché zkušební tyče byly testovány tahem na zkušebním zařízení typu UPC 1200. Část vzorků na povrchu byla ošetřena před tahovou zkouškou nanesením povlaku jednak základním povlakem, tak i s finálním povlakem průběžně multitryskovým plazmovým systémem. Na vybraných zkušebních vzorcích byly zjištěny z tahové zkoušky materiálové charakteristiky, jako jsou např. mez kluzu $R_{p0,2}$, mez pevnosti v tahu R_m , tažnosti A_{50} , zřejmé z tahových diagramů. Předložené grafy znázorňují závislost síly na prodloužení vzorku dle DIN EN ISO 6892-2. Vzorky byly dále zkoumány pod stereo mikroskopem značky SCHUT, typ SSM-E v laboratoři na Ústavu strojírenské technologie VUT v Brně k chování povlaku na ocelovém plechu v okamžiku přetržení průřezu vzorků. Dodané plechy s potvrzeným atestem a chemickým složením, byly předem odmaštěny a následně okartáčované speciálním odjehlovacím strojem. Označení materiálu je 1.0322 (DX56D). Jedná se nelegovanou jakostní hlubokotažnou ocel, tloušťky 1 mm.

Základní vrstva, u níž se teplota pohybuje v rozmezí 160 - 180 °C se nanášela elektroforézním způsobem. Tloušťka základního povlaku se u vzorku pohybuje v intervalu od 15 do 30 μm . Před vlastním experimentem byly roztrženy do čtyř skupin s odlišným způsobem složení plazmatu, viz. tab. 4.

Tabulka 4 Vybrané vzorky s ošetřením plazmy a odlišným nanášením plazmy

Vzorky s ošetřením plazmy		
BP11	$A_r + N_2$	(BP+PL+Z)
BP16	$A_r + H_2O$	(BP+PL+Z)
BP7	$A_r + O_2$	(BP+PL+Z)
TC6	A_r	(TC+PL)
TC9	$A_r + O_2$	(TC+PL)
Z12	$A_r + N_2$	(Z+PL+TC)

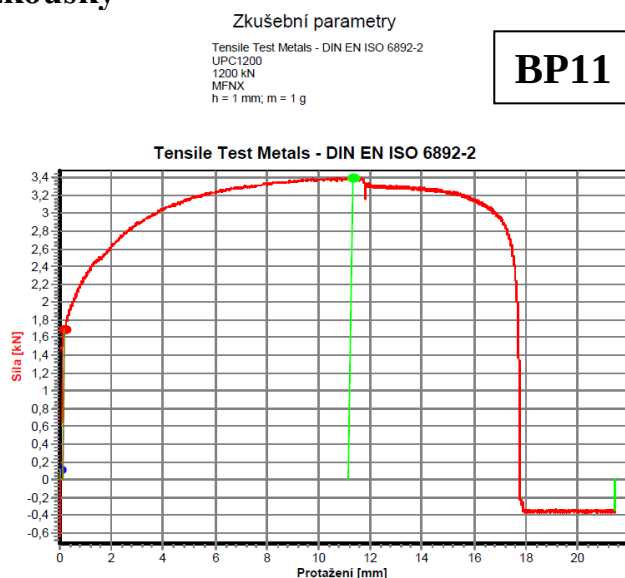
Cílem experimentu bylo podrobení vybraných zkušebních vzorků s navrženými rozměry 90 x 10 x 1 mm, tahovou zkouškou. Detailní pohled na upnutý vzorek v upínacích čelistech zařízení je na obr. 20. Tahová zkouška vzorků byla provedena na zařízení UPC 1200.



Obr. 20 Detailní pohled na upnutý vzorek v upínacích čelistech zařízení.

Vzorky byly technologicky připraveny s využitím technologie svařováním s podporou CO₂ aby mohli být vzorky upnuty do speciálních upínacích čelistech, které byly součástí trhacího stroje. Vybrané vzorky před tahovou zkouškou byly fotograficky zdokumentovány, viz. obr. 17.

Záznamy z tahové zkoušky



Obr. 21 Průběh síly v závislosti na protažení a hodnoty z tahové zkoušky, vzorek BP11

8.3 VÝSLEDKY Z TAHOVÉ ZKOUŠKY

Z tahové zkoušky byly následně zpracovány výsledky experimentálních prací tahovou zkouškou v podobě tabelárních a grafických výstupů, viz. tab. 5 naměřených hodnot a viz. obr. 21.

Tabulka 5 Naměřené hodnoty pro vybrané vzorky po tahové zkoušce

Číslo vzorku	a [mm]	b [mm]	E [MPa]	R _p [MPa]	R _m [MPa]	A ₅₀ [%]	Z [%]	t [s]	s [mm]	F [kN]	dL [mm]	R _{m1} [MPa]
BP11	13,10	1,00	68,52	129,71	259,00	42,18	43,01	31,44	17,11	3,27	14,66	249,71
BP16	12,70	1,00	74,80	135,87	258,00	37,70	34,19	35,91	17,21	1,49	10,35	117,45
BP7	13,20	1,00	22,02	143,91	253,00	29,44	39,20	37,23	19,12	2,74	10,15	207,82
TC6	13,80	1,00	38,38	136,70	256,00	42,04	44,18	20,05	11,96	3,45	9,26	249,65
TC9	12,38	1,00	68,91	138,32	263,00	27,37	42,48	18,21	9,74	3,19	7,28	257,74
Z12	13,20	1,00	64,51	147,45	265,00	32,23	43,00	18,09	7,72	3,42	5,76	259,00

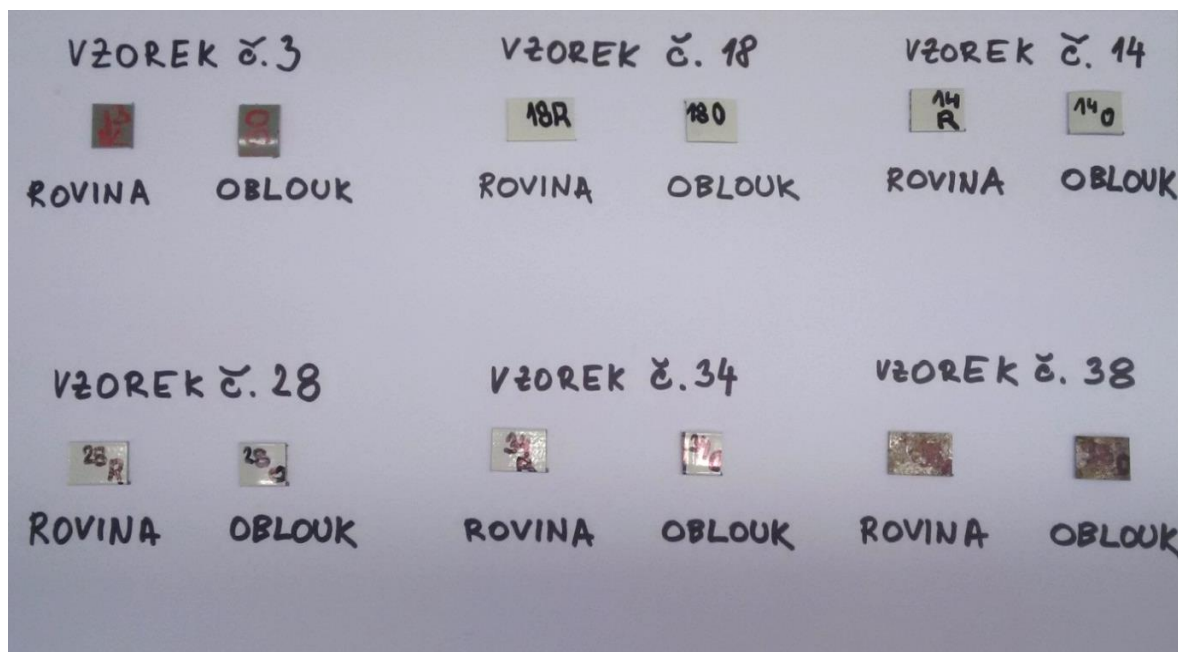
Testované vzorky, viz. obr. 17, dané šířky a [mm] a tloušťky b [mm] byly podrobeny tahovou zkouškou. Rozměry byly změřeny posuvným měřítkem. Uvedené výsledky jsou uvedeny v tabulce 5. Nejvíce proměnlivé jsou výsledky u Youngova modulu. Čím je toto velké rozpětí dáno, nebylo zjištěno a ani nebylo předmětem tohoto experimentu. Hodnoty smluvního meze kluzu a meze pevnosti odpovídaly danému materiálu 1.0322 (DX56D). Stejně jako tažnost a kontrakce Z . Zajímavé bylo pozorovat čas do přetržení vzorku t [s], který se také výrazně lišil od různého způsobu nanášení plazmy. [23], [28] Taktéž tahová síla při porušení vzorku F byla u všech vzorků velmi podobná až na výjimku u vzorku BP16, kde byla výrazně nižší a rovněž napětí pro vznik oddělených částí vzorku R_{m1} [MPa] bylo u vzorku BP16 odlišné a výrazně nižší. Dráha s [mm] a prodloužení dL [mm] byly vyhodnoceny počítačovým programem na zařízení UPC 1200.

8.4 OHYBOVÁ ZKOUŠKA

Na odstupňovaném ohýbacím přípravku byly ohnuty povlakované plechy s nanesenými kružnicemi. Kružnice byly naleptány na povlakovaný povrch. Testované vzorky byly ohnuty na poloměrech R11, R17, R23, R29 a R35 mm. Plechy se jmenovitým rozměrem 90 x 10 mm byly dále změřeny na měřicím optickém zařízení Scope-Check s přesností 0,0001 mm. Naměřená tloušťka u vybraných vzorků po ohnutí byla zaznamenána v tabulce 10. Na obr. 102 je vzorek, na kterém jsou nanесeny a označeny kružnice, které se měřily. Ohnuté vzorky z každé sady byly rozděleny do dvou kategorií:

- materiál rovné části ohnutého vzorku,
- materiál z ohnuté části.

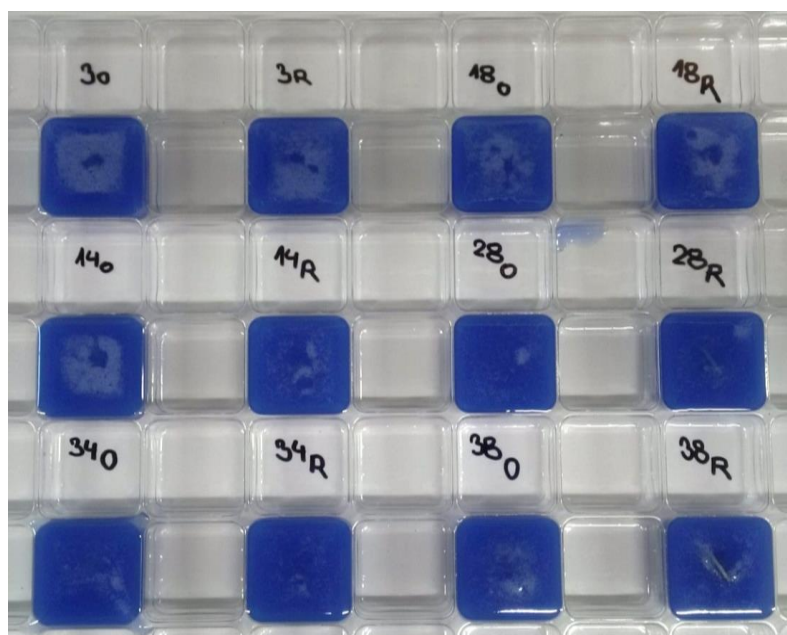
Testované vzorky viz. obr. 22 byly uříznuty na přesné pile viz. obr. 23 a vybroušeny do jemné struktury brusným papírem v pořadí hrubosti 280, 400 a 2500 viz. obr. 23 a poté byly ošetřeny brusnou pastou D3. Vzorky byly zalité do pryskyřice WEICON MS 1000 viz. obr. 24. Poté byly testované vzorky zkoumány pod mikroskopem LEICA DM ILM, typ: 090–135.003.



Obr. 22 Vzorky, které byly rozděleny do kategorie rovina a oblouk.



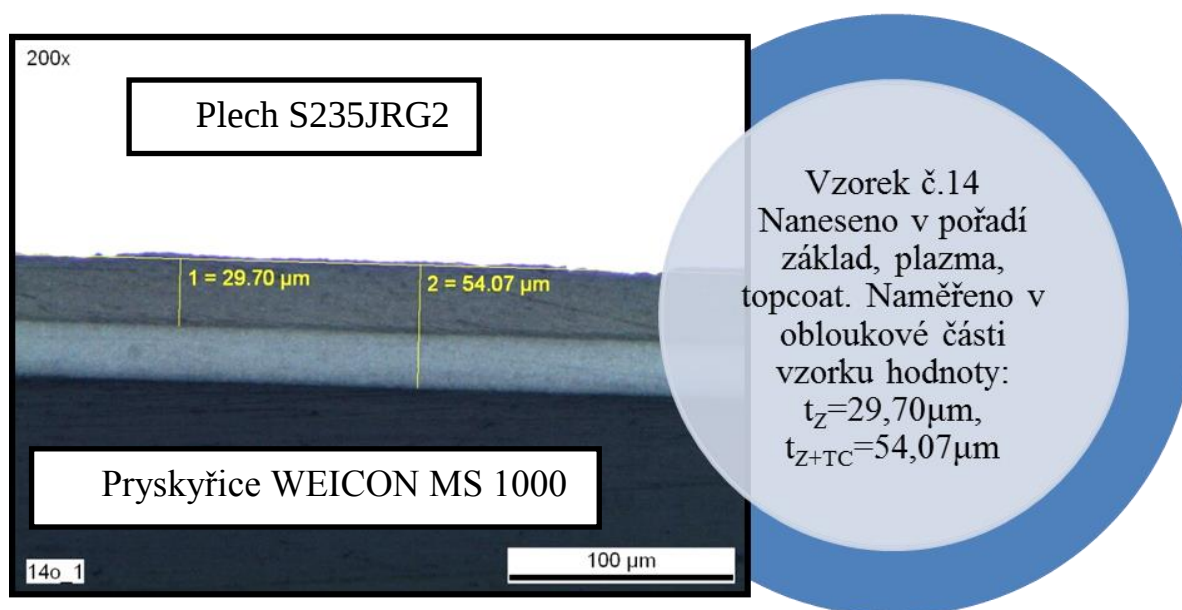
Obr. 23 Metalografická přesná pila Mikron 110 a bruska Kompakt 1031.



Obr. 24 Vybrané vzorky v zalévací hmotě.

8.5 TESTOVANÉ VZORKY POD MIKROSKOPEM

Obr. 25 zobrazuje měření v obloukové části vzorku a tloušťku základního povlaku, která má v případě vzorku č. 14 hodnotu $29,70 \mu\text{m}$ a tloušťka obou povlaků pak je $54,07 \mu\text{m}$. Měření je rozděleno do čtyř skupin. V první skupině se měřilo v obloukové části vzorku. Druhá skupina měření se uskutečnila v obloukové rohové části vzorku. Třetí skupina vzorků byla měřena v rovné části vzorku a čtvrtá skupina měření se uskutečnila v rovné rohové části vzorku. Jednotlivé testované vzorky s ošetřeným povrchem a použitým médiem je detailně vidět z tab. 1.



Obr. 25 Vzorek č. 14 - měřeno v obloukové části vzorku.

8.6 VÝSLEDKY Z OHYBOVÉ ZKOUŠKY

Tabulka 6 ukazuje, jaké hodnoty tloušťky povlaku byly u jednotlivých vzorků po ohnutí na ohýbacím přípravku.

Tab. 6 Testované vzorky a výsledné hodnoty z mikroskopu.

t_z = tloušťka základního povlaku, t_{z+tc} = tloušťka základního povlaku a vrchního povlaku

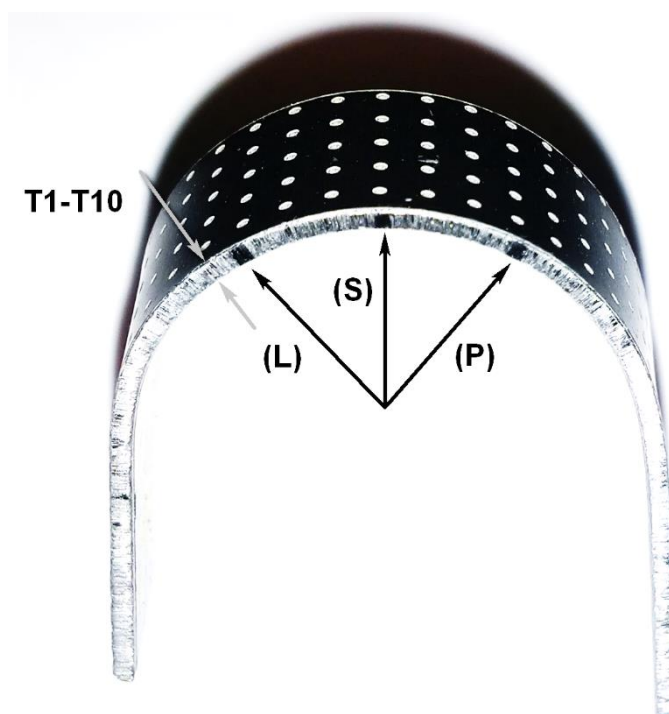
Vzorek	OHNUTÝ VZOREK			
	Měřeno v obloukové části vzorku [μm]	Měřeno v obloukové rohové části vzorku [μm]	Měřeno v rovné části vzorku [μm]	Měřeno v rovné rohové části vzorku [μm]
3	$t_z = 33,24$	$t_z = 3,01$	$t_z = 33,38$	$t_z = 1,54$
14	$t_z = 29,70$	$t_z = 1,85$	$t_z = 33,37$	$t_z = 3,51$
	$t_z+tc = 54,07$	$t_z+tc = 4,05$	$t_z+tc = 60,45$	$t_z+tc = 6,39$
18	$t_z = 32,10$	$t_z = 2,40$	$t_z = 28,18$	$t_z = 2,10$
	$t_z+tc = 57,41$	$t_z+tc = 5,65$	$t_z+tc = 67,93$	$t_z+tc = 16,49$
28	$t_z = 23,55$	$t_z = 4,85$	$t_z = 24,04$	$t_z = 3,02$
	$t_z+tc = 70,01$	$t_z+tc = 13,47$	$t_z+tc = 49,48$	$t_z+tc = 14,27$
34	$t_z = 33,08$	$t_z = \text{----}$	$t_z = 37,58$	$t_z = 5,88$
	$t_z+tc = 66,27$	$t_z+tc = 6,94$	$t_z+tc = 65,23$	$t_z+tc = 15,21$
38	$t_z = \text{----}$	$t_z = \text{----}$	$t_z = \text{----}$	$t_z = \text{----}$
	$t_z+tc = \text{----}$	$t_z+tc = \text{----}$	$t_z+tc = \text{----}$	$t_z+tc = \text{----}$
8	$t_z = 32,89$	$t_z = 1,20$	$t_z = 31,15$	$t_z = 1,81$
	$t_z+tc = 55,51$	$t_z+tc = 5,22$	$t_z+tc = 44,23$	$t_z+tc = 8,01$
23	$t_z = 29,37$	$t_z = 6,04$	$t_z = 24,24$	$t_z = 1,46$
	$t_z+tc = 134,29$	$t_z+tc = 73,04$	$t_z+tc = 111,37$	$t_z+tc = 60,87$

Měření je rozděleno do čtyř skupin. V první skupině se měřilo v obloukové části vzorku. Druhá skupina měření se uskutečnila v obloukové rohové části vzorku. Třetí skupina vzorků byla měřena v rovné části vzorku. A čtvrtá skupina měření se uskutečnila v rovné rohové části vzorku. Z tabulky č. 6 je také jasně vidět, že u vzorku č. 23, kde byla nanášena plazma v pořadí BP+Z+TC+PL je u všech čtyř skupin převažující naměřená hodnota v tloušťce povlaků. Vzorek byl ošetřen médiem A_r+O_2 . Tato kombinace nanášení povlaků a plazmy po ohnutí na ohýbacím přípravku se jeví jako nejpříjemnější. Druhý vzorek č. 28, kde byla nanášena plazma v pořadí BP+PL+Z+TC a byl ošetřen také médiem A_r+O_2 a který převládá nad ostatními vzorky, měl vyšší hodnoty v obloukové části vzorku a v obloukové rohové části vzorku. V rovné části vzorku a v rovné rohové části vzorku už převládá vzorek č. 18, který nebyl ošetřen plazmou. Jako další v pořadí byl vzorek č. 34, kde byla nanášena plazma v pořadí BP+PL+Z+TC. U všech čtyřech skupin je

převažující naměřená hodnota v tloušťce povlaků. Vzorek byl ošetřen médiem A_r+N_2 .

8.7 VYHODNOCENÍ ZMĚNY TLOUŠTKY A DEFORMACÍ NA VYBRANÝCH VZORCÍCH

Vzorky byly ohnuty v ohýbacím přípravku. Byly sledovány změny tloušťky a deformace u vybraných následujících vzorků, viz. tab. 3. Ohnuté vzorky měly na svém povrchu nanesené kružnice. Měření bylo rozděleno na měření v levé části ohnutého vzorku (L), měření ve středu ohnutého vzorku (S) a měření v pravé části ohnutého vzorku (P). Jak je vidět z obr. 26, kružnice byly nanесeny po celé šířce vzorku. Výsledky naměřených hodnot jsou uvedeny v tab. 7. Na odstupňovaném ohýbacím přípravku byly testované vzorky ohnuty na poloměrech R11, R17, R23, R29 a R35 mm.

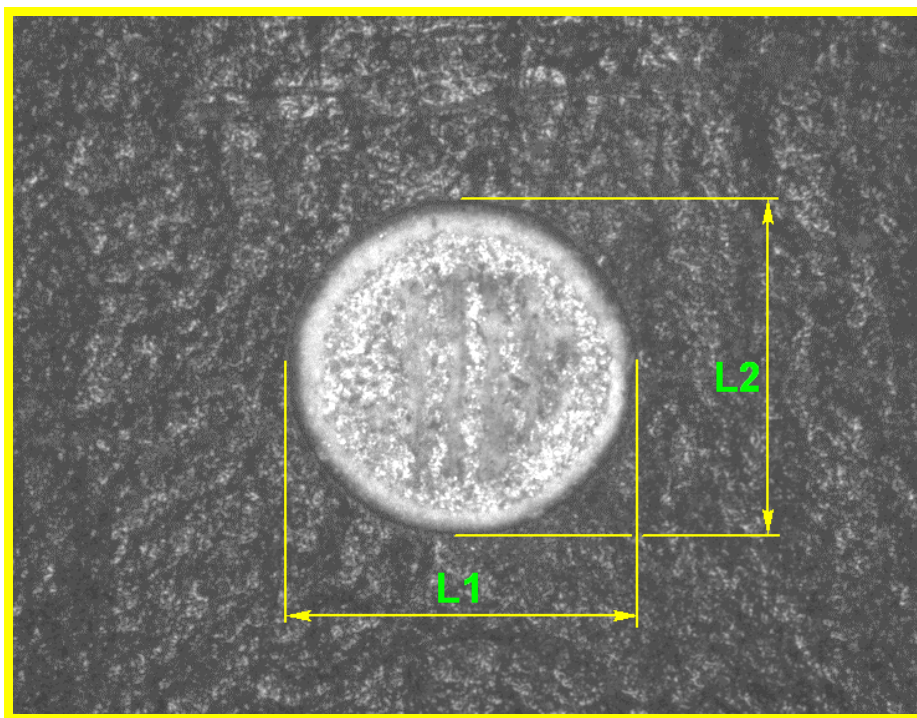


Obr. 26 Ohnutý vzorek na ohýbacím přípravku s nanesenými kružnicemi.

VYHODNOCENÍ DEFORMACÍ U SLEDOVANÝCH VZORKŮ PLECHU

Na obr. 27 je fotografie naleptané elipsy, s rozměry L_1 a L_2 na ohnutém vzorku. Při deformaci se nanesená síť kružnic mění na elipsy, kde jejich osy určují směr i velikost maximální a minimální logaritmické deformace u výlisku.

Jak je vidět z výsledků, délky L_1 jsou větší než délky L_2 , což je logické, jelikož směr ohybu byl ve směru L_1 . Stanovení velikosti logaritmické deformace φ_1 , φ_2 a φ_3 určíme podle vzorců uvedené v dizertační práci.



Obr. 27 Měřené délky po ohnutí vzorku. L_1 a L_2 .

8.8 STANOVENÍ TAHOVÉ A TLAKOVÉ DEFORMACE

U měřených ohnutých vzorků se měřila délka L_1 a L_2 . U výchozího stavu se měřil průměr naleptaných kružnic. [34] Jelikož se měnila tloušťka plechu při tažení, deformace φ_3 se počítala podle vzorce 1. Výsledné deformace jednotlivých vybraných vzorků jsou uvedeny v tab. 7.

$$\varphi_3 = -\varphi_1 - \varphi_2 \quad [-] \quad (1)$$

Pro deformace φ_1 dominují kladné hodnoty až na vzorek BP16 kde jsou na levé, střední a pravé straně měřeného ohnutého vzorku i některé hodnoty záporné. Pro deformace φ_2 dominují u vybraných vzorků převážně záporné hodnoty. Pro deformace φ_3 dominují záporné hodnoty pro vzorky TC12, Z7, Z5₁. U vzorků BP15, BP16 jsou hodnoty deformace φ_3 kladné. Ovšem u vzorku Z12 jsou pro deformace φ_3 hodnoty jak kladné tak záporné.

Tab. 7 Stanovení velikosti logaritmické deformace φ_1 , φ_2 , φ_3 u vzorku TC12.

	L₁	L₂	φ_1	φ_2	φ_3	VZOREK
L	0,614	0,565	0,056	0,000	-0,028	TC12
	0,606	0,573	0,042	-0,015	-0,028	
	0,610	0,573	0,049	-0,015	-0,034	
	0,610	0,578	0,049	-0,006	-0,043	
	0,607	0,562	0,044	-0,033	-0,011	
S	0,611	0,564	0,050	-0,030	-0,020	
	0,615	0,569	0,056	-0,021	-0,036	
	0,611	0,570	0,050	-0,020	-0,030	
	0,615	0,569	0,057	-0,021	-0,036	
	0,611	0,559	0,050	-0,038	-0,012	
P	0,611	0,562	0,050	-0,034	-0,016	
	0,617	0,569	0,059	-0,021	-0,038	
	0,614	0,576	0,055	-0,008	-0,046	
	0,623	0,578	0,069	-0,005	-0,064	
	0,616	0,578	0,058	-0,006	-0,052	

Poznámka k tabulce 7:

L – měřeno v levé části ohnutého vzorku, viz obr. 26.

S – měřeno ve středu ohnutého vzorku, viz obr. 26.

P – měřeno v pravé části ohnutého vzorku, viz obr. 26.

Na výsledky deformací může mít vliv i struktura konkrétního vzorku, ale toto nebylo sledováno v dizertační práci a bude předmětem dalších experimentů ve vztahu ke struktuře plechů.

Povrchová vrstva je rozhraní dvou rozličných prostředí, kde se u kovových materiálů je třeba zabývat jeho strukturou i vlastnostmi. Struktura zahrnuje různé rozměry od atomů až po makroskopický popis. Široká oblast studia povrchů zahrnuje také hodnocení poruch a interakcí s prostředím i vliv vnějších sil.

Volný povrch kovů představuje zpravidla povrch velkého souboru zrn, tvořících rozhraní mezi pevnou fází a okolím. Povrch takového tělesa i z chemicky čistého kovu je fyzikálně velmi složitý systém. [5]

K posuzování vlastností povrchu je nutné znát modely zákonitosti "dokonalého" povrchu fyzikálně čistého kovu bez interakcí s jiným prostředím a rozdíly, jimiž se uspořádání liší od objemu uvnitř kovu. Teprve potom si lze udělat představu, jak charakterizovat "skutečný" povrch kovu, s nímž se běžně setkáváme. Mnohé vlastnosti těles souvisí víceméně s povrchem, např. drsnost povrchu ovlivňuje další fyzikální vlastnosti (odraz světla, opotřebení ap.). V mnohých případech skutečný povrch je prostředníkem působení vnějších podmínek a je tedy nutno zabývat se i vlastnostmi nebo změnami materiálu pod

povrchem. Tento objem se nazývá povrchovou vrstvou, na rozdíl od povlaku, který vzniká nebo se vytváří na povrchu kovu nebo slitiny. Nevýhodou povlakovaných plechů je zvýšená možnost povrchových trhlinek v místě, kde dochází k maximálnímu zatížení při tváření. Tím dochází k následnému porušení celistvosti povrchu v místech plastické deformace, kde dochází k tomu, že korozní ochrana je narušena. Na vhodnou volbu materiálu mají vliv nejenom vlastnosti povlaku, ale také vlastnosti základního materiálu. U povlakovaných plechů se posuzuje zejména maximální dosažený stupeň deformace (stupeň tažení) a dovolená deformace povlaku, při zachování jeho ochranné funkce proti korozi. [5]

8.9 GRUBBSŮV TEST

U měřených ohnutých vzorků se měřila délka L_1 a L_2 . Protože byla opakovaně měřena veličina L_1 a L_2 za stejných podmínek, je třeba vyloučit případné hodnoty měření, které by mohly být způsobeny hrubou chybou při měření, a které by tedy zkreslily celkový výsledek měření. Všechny hodnoty získané měřením byly proto podrobeny statistické kontrole (Grubbsovu testu), který je schopen odhalit, zda odchylky krajních naměřených hodnot (minima a maxima) v sérii měření jsou důsledkem hrubé chyby při měření a je tedy nutné je ze souboru naměřených hodnot vyloučit, nebo zda jsou všechny výsledky měření použitelné.

Byla zvolena úroveň pravděpodobnosti $p = 0,01$, tedy 99 %. Pro tuto úroveň pravděpodobnosti a počet měření $n = 5$ je $T_p = 1,955$.

Tab. 8 Výsledky vyhodnocení Grubbsova testu na ohnutém vzorku u měřených délek elipsy L₁ a L₂

VZOREK	TC12				
Měřená délka kružnice ve středu ohýbaného vzorku L ₁ [mm]	0,611	0,615	0,611	0,615	0,611
Aritmetický průměr	0,204				
Směrodatná odchylka	0,236				
Grubbsova kritéria τ_1	1,724				
Grubbsova kritéria τ_2	1,743				
Kritická hodnota T_p ($n=5, \alpha=0,01$)	1,955				
Minimální naměřená hodnota	VYHOVUJE				
Maximální naměřená hodnota	VYHOVUJE				
Měřená délka kružnice ve středu ohýbaného vzorku L ₂ [mm]	0,564	0,569	0,570	0,569	0,559
Aritmetický průměr	0,189				
Směrodatná odchylka	0,218				
Grubbsova kritéria τ_1	1,701				
Grubbsova kritéria τ_2	1,747				
Kritická hodnota T_p ($n=5, \alpha=0,01$)	1,955				
Minimální naměřená hodnota	VYHOVUJE				
Maximální naměřená hodnota	VYHOVUJE				

Vyhodnocení Grubbsova testu pro délky L₁ a L₂ na ohnutém měřeném vzorku

Z důvodu opakovaného měření stejné veličiny je nutné vyloučit případné hodnoty měření, které by mohly být způsobeny hrubou chybou při měření, a které by tedy zkreslily celkový výsledek měření. Všechny hodnoty získané měřením byly proto podrobeny statistické kontrole - Grubbsovu testu. Odchylnosti krajních naměřených hodnot (minima a maxima) v sérii měření nejsou důsledkem hrubé chyby při měření a jsou tedy všechny výsledky měření použitelné, viz. tab. 8.

ZÁVĚR

V dizertační práci je popsána problematika povlaků v kombinaci s plazmochemickou předúpravou povrchu a její vzájemnou kombinací mezi jednotlivými povlaky po ohnutí na ohýbacím přípravku. Práce je zaměřena na kvalitu povrchově upravených ocelových plechů s povlakem na testování ohybem a tažením.

Automotive a celkově automobilový průmysl a především zákazník požaduje především kvalitu tvářeného plechu s perfektní ochranou proti korozi a samozřejmě je to estetičnost daného výrobku (plechu) při zachování funkčních vlastností dané vrstvy po technologii tváření.

Na základě rešerše dostupné literatury bylo zjištěno, že úspěšná aplikace plazmochemické předúpravy vytvořená na ocelovém plechu nebyla dosud v průmyslové výrobě zavedena a publikována. Cílem experimentu je optimalizování složení plazmatu pro konkrétní povlaky na plech. Experimenty probíhaly s různými variantami plynů a byly zvoleny tyto média: argon, kyslík, dusík, oxid uhličitý, argon+voda. U všech vzorků byl měněn výkon. Konstantní byl průtok a posuv.

Podle zkoušek hlubokotažnosti obstál vzorek č. 17. Hodnota poškození byla až při IE 7,5mm. U tohoto vzorku bylo použito médium Ar+H₂O při použití multitryskového plazmového systému. Postup byl takový, že na výchozí stav plechu byl nanesen základní povlak, poté vrchní povlak a poté ošetřen multitryskovým plazmovým systémem. Zajímavý experiment se ukázal také v tomto pořadí. U vzorku BP4 byl ocelový základ ošetřen multitryskovým plazmovým systémem a následně nanesena základní vrstva povlaku. Hodnotu IE jsme zastavily na hodnotě hloubení 9,75mm bez zjevného poškození. Po této hodnotě už povlak ukazoval známky poškození.

Samozřejmě bude záležet na přilnavosti povlaku k předchozím povlakům. V našem případě je povrchová vrstva různě namáhaná v závislosti na její poloze v ohýbadle.

V experimentech se nanášení základního povlaku na vybrané vzorky používal kataforézní způsob lakování. Tloušťka povlaku se pohybuje v rozmezí 15 až 30μm. Při použití multitryskového plazmového systému povlak nevykazoval známky poškození po ohybu vzorku na odstupňovaném ohýbacím přípravku. Optimalizované parametry plazmochemické předúpravy při zvolených podmínkách jako je výkon 550 W, průtok 0,2 l/min, posuv 3 m/min a dvou přejezdech, je modifikování povrchu pomocí plazmy optimální pro zachování celistvosti povlaku, tedy všech vazeb mezi povlakem a základním materiálem.

Další experimenty byly zaměřeny na zkoušky tahem. Tento test byl zaměřen na studium vlivu definovaných hodnot deformace v tahu a účinku nízkoteplotního plazmatu na přilnavost zvoleného povlaku na ocelových vzorcích s využitím tahové zkoušky plochých zkušebních tyčí. Vybrané vzorky s rozměrem 90 x 90 mm jsou po přejetí multitryskového plazmového systému upraveny na rozměry 90 x 10 mm pro tahovou zkoušku. Vzorky pro tahovou zkoušku jsou uvedeny v tabulce 8.

Na vybraných zkušebních vzorcích byly zjištěny z tahové zkoušky materiálové charakteristiky. Hodnoty smluvního meze kluzu a meze pevnosti odpovídaly danému materiálu 1.0322 (DX56D). Stejně jako tažnost A_{50} [%] a kontrakce Z [%].

Postup nanášení multitryskového plazmového systému je výhodný v pořadí: plazma+základ, jelikož u vzorků BP7 a BP16 zůstala část povlaku, jak je vidět ze snímků ze stereomikroskopu. A také čas přetržení vzorku u BP7, BP11, BP16 je výrazně delší než u vzorků TC6, TC9, Z12.

Po tahové zkoušce byly pro vybrané vzorky vypočteny hodnoty exponentu zpevnění. Pevnost ocelí i ostatních kovů se po tváření zvyšuje. Kluzové napětí, při kterém nastává plastická deformace, vzrůstá během nárůstu velikosti deformace. Popis tohoto chování je vyjádřeno exponentem zpevnění „ n “. Čím vyšší je jeho hodnota, tím je křivka napětí – deformace příkřejší. To také znamená, že deformace při maximálním zatížení je u vyšších hodnot exponentu „ n “ rovněž větší a vzrůstá i rozdíl mezi mezí pevnosti v tahu a kluzu. Vyšší hodnoty exponentu zpevnění byly u vzorků BP11 a TC6. Nižší hodnoty exponentu zpevnění byly u vzorků BP7 a TC9. I zde se prokazuje, že použití multitryskového plazmového systému ovlivňuje povlak a potvrzuje, že postup: plazma+základ je výhodnější než ostatní postupy nanášení povlaků a plazmy.

Na dalších vzorcích, které byly ohnuty na odstupňovaném ohýbacím přípravku byla nanášena elektrolytickým leptáním síť a byly vyhodnoceny změny tloušťky povlaků a deformací. Vybrané vzorky byly vybroušeny do jemné struktury a ošetřeny brusnou pastou a poté zalité do pryskyřice. Následně byly vzorky zkoumány pod mikroskopem a byly pořízeny fotografie.

Během ohýbání se měnila tloušťka plechu, a proto se stanovily tahové a tlakové deformace. Pro deformace φ_1 dominují kladné hodnoty až na vzorek BP16, kde jsou na levé, střední a pravé straně měřeného ohnutého vzorku i některé hodnoty záporné. Pro deformace φ_2 dominují u vybraných vzorků převážně záporné hodnoty. Pro deformace φ_3 dominují záporné hodnoty pro vzorky TC12, Z7, Z5₁. U vzorků BP15, BP16 jsou hodnoty deformace φ_3 kladné. Ovšem u vzorku Z12 jsou pro deformace φ_3 hodnoty, jak kladné, tak záporné.

S využitím multitryskového plazmového systému se prokázalo, že v experimentu na ohýbacím přípravku, konkrétně u vzorku č. 23, kde byl postup nanášení povlaku a plazmy v pořadí základ+topcoat+plazma s použitým plynem Ar+O₂ bylo poškození povlaku nejmenší a po modifikování plazmy byla tloušťka povlaku soudržná a povlak nepraskal.

SPLNĚNÍ CÍLŮ PRÁCE

- a) Návrh metody použití multitryskového plazmového systému na zkušební vzorky s povlakem.

Metoda spočívá v multitryskovém plazmovém systému o šířce 100 mm s 19 tryskami. Experimenty probíhaly s různými variantami plynů a byly zvoleny tyto média: argon, kyslík, dusík, oxid uhličitý, argon+voda. U všech vzorků byl měněn výkon. Konstantní byl průtok a posuv. Optimalizované parametry plazmochemické předúpravy jsou následující: Výkon 550 W, průtok $0,2 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$, posuv $3 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ a při projetí dvou přejezdech je modifikování povrchu pomocí plazmy optimální pro zachování celistvosti povlaku, tedy všech vazeb mezi povlakem a základním materiálem.

- b) Testování povrchově upravených plechů (vzorků) s nátěrem na novém odstupňovaném ohýbacím přípravku na Ústavu strojírenské technologie, odbor technologie tváření pro vybrané poloměry ohybu za účelem porovnání přilnavosti povlaku.

Vybrané vzorky byly ohnuty na odstupňovaném ohýbacím přípravku. Vzorek č. 23, který byl ohnutý na kladce s rádiusem $R = 23 \text{ mm}$ s následujícím postupem nanášení:

Základ+topcoat+plazma, nevykazoval známky poškození a změřené hodnoty povlaku převyšovaly ostatní kombinace a varianty plynů.

- c) Porovnání výsledků vzorků s použitím metody multitryskového plazmového systému na vybraných vzorcích topcoat + ktl, ktl, bez povlaku, společně s Erichsenovou zkouškou a pomocí Tarnogrodského přístroje pro úhly v intervalu (0° , 180°).

Jako nejlepší vzorek ze série zkoušek hlubokotažnosti byl vzorek 17. Hodnota poškození byla až při IE 7,5 mm. U tohoto vzorku bylo použito médium $\text{Ar} + \text{H}_2\text{O}$ při použití multitryskového plazmového systému. Postup je základ+topcoat+plazma. U vzorku BP4 byl ocelový základ ošetřen multitryskovým plazmovým systémem a následně nanесena základní vrstva povlaku. Hodnotu IE jsme zastavily na hodnotě hloubení 9,75 mm bez zjevného poškození. Optimální kombinace nanášení plazmy je zvolený plyn $\text{Ar} + \text{H}_2\text{O}$ a zvolený postup nanášení povlaků a plazmy je plazma+základ nebo základ+topcoat+plazma. Jedno z hlavních měření bylo rozděleno do čtyř skupin. A to měření v obloukové části vzorku, obloukové rohové části vzorku, rovné části vzorku, rovné rohové části vzorku. U všech čtyř skupin převládá vzorek č. 23, kde je systém multitryskového plazmového systému nanесen v pořadí základ+topcoat+plazma.

- d) Optimalizování složení plazmatu pro konkrétní navržené povlaky na ocelový plech S235JRG2, tloušťka 1mm, aby po ovlivnění povrchu vzorku před nanesením povlaku, resp. více povlaků, byla maximální přilnavost povlaku k ocelovému základu.

Optimalizace plazmatu poskytující nízkoteplotní a neizotermický výboj za atmosférického tlaku byl optimalizován s použitým médiem $\text{Ar}+\text{H}_2\text{O}$ a základní vrstvou povlaku o tloušťce 15 – 30 μm , která se nanášela elektroforézním způsobem, v rozmezí teplot 160 – 180 $^{\circ}\text{C}$. Povlak nevykazoval známky poškození. Optimální varianta nanášení multitryskového plazmového systému byla podle experimentů zvolena v kombinaci základ+topcoat+plazma. Při této optimalizaci parametrů plazmatu za použití plazmového zařízení, lze dosáhnout funkčních povlaků.

- e) Výsledkem aplikace použitého multitryskového plazmového systému na zkušební vzorky při optimálních nastavených parametrech plazmatu, budou funkční vzorky po ohybu s přesně definovaným poloměrem ohybu a úhlem ohybu.

U vzorku č. 23, kde byla nanесena plazma v pořadí BP+Z+TC+PL. Vzorek byl ošetřen médiem $\text{Ar}+\text{O}_2$. Tato kombinace nanесení povlaků a plazmy po ohnutí na ohýbacím přípravku se jeví jako nejpříjemnější. Vzorek byl ohnut na odstupňovaném ohýbacím přípravku na válcovém segmentu s poloměrem $R = 23$ mm. Druhý vzorek č. 28, kde byla nanесena plazma v pořadí BP+PL+Z+TC a byl ošetřen také médiem $\text{Ar}+\text{O}_2$ a který převládá nad ostatními vzorky a měl vyšší hodnoty v obloukové části vzorku a v obloukové rohové části vzorku. Vzorek byl ohnut na odstupňovaném ohýbacím přípravku na válcovém segmentu s poloměrem $R = 23$ mm. V rovné části vzorku a v rovné rohové části vzorku už převládá vzorek č. 18, který nebyl ošetřen plazmou. Vzorek byl ohnut na odstupňovaném ohýbacím přípravku na válcovém segmentu s poloměrem $R = 23$ mm.

Jako další v pořadí byl vzorek č. 34, kde byla nanесena plazma v pořadí BP+PL+Z+TC. Vzorek byl ošetřen médiem $\text{Ar}+\text{N}_2$. Vzorek byl ohnut na odstupňovaném ohýbacím přípravku na válcovém segmentu s poloměrem $R = 17$ mm.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. FOREJT, Milan. *Teorie tváření. 1.vyd.* vyd.: Brno. Vysoké učení technické v Brně, 1992. 167s. ISBN 80-214-0415-9.
2. LENFELD, Petr. Technická univerzita Liberec: Katedra strojírenské technologie [online]. 2015 [cit. 2014-9-11]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/uvod.htm
3. PETRUŽELKA, Luboš. *Tvařitelnost a nekonvenční metody ve tváření.* Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Strojní fakulta, 2000. ISBN 80-7078-635-3.
4. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření.* Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4747-9.
5. KRAUS, Václav. *Povrchy a jejich úpravy.* Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-668-1.
6. ČADA, Radek. Vysoká škola báňská - technická universita Ostrava: *Technologie I* [online]. 2007 [cit. 2015-05-13]. Dostupné z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/TECH1/Technologie-I.pdf>
7. BAREŠ, Karel, a kol. *Lisování. 1.vyd.* Praha: SNTL 1971 - Nakladatelství technické literatury. 542 s.
8. HUŠEK, Martin. *Tvařitelnost tenkých ocelových plechů s povrchovou úpravou eloxovaného hliníku* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012 [cit. 2015-09-17]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/8887>. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie.
9. KREIBICH, Viktor. *Teorie a technologie povrchových úprav.* Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-01-01472-X.
10. DVOŘÁK, Milan. *Technologie II.* Brno: CERM, 2001. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2032-4.
11. ČSN EN 13144 (038166). *Kovové a jiné anorganické povlaky - Metoda kvantitativního měření přilnavosti zkouškou tahem.* 2003. Český normalizační institut.
12. Lakum-KTL, a.s. *Povrchové úpravy – Kataforéza – KTL průběžná, KTL taktovací, práškové lakování* [online]. 1998 [cit. 2014-9-11]. Dostupné z: <http://lakum.cz/cz/povrchove-upravy>
13. KREJČÍK, Vladimír. *Povrchová úprava kovů II pro 3. ročník středních odborných učilišť.* Praha: SNTL, 1988.

- 14.DAŘOUREK, Karel. *Vybrané technologie povrchových úprav*. vyd.: Liberec, Technická univerzita v Liberci, 2007. 117s. ISBN 978-80-7372-168-8.
- 15.ČSN EN ISO 2409 (67 3085) *Nátěrové hmoty - Mřížková zkouška*. 2000. Český normalizační institut.
- 16.ČSN EN ISO 1519 (673079). *Nátěrové hmoty - Zkouška ohybem (na válcovém trnu)*. 2011. Český normalizační institut.
- 17.ČSN EN ISO 20482 (420406). *Kovové materiály - Plechy a pásy - Zkouška hloubením podle Erichsena*. Praha : 2014. Český normalizační institut.
- 18.HUŠEK, Martin, DVOŘÁK, Milan. Zkouška přilnavosti multifunkčního povlaku na plechu pomocí odstupňovaného ohýbacího přípravku. *Strojírenská technologie*, 2010, roč. XV, č. 2, s. 15-20. ISSN: 1211- 4162.
- 19.CÍSAŘOVÁ, Michaela. *Vliv morfologie povlaku Zn na mezní podmínky při tažení tenkých plechů* [online]. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2012 [cit. 2016-08-24]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/20322>. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie.
- 20.HOLOUBEK, Vít. *Povrchové úpravy – Kataforické lakování* [online]. 2005 [cit. 2014-9-11]. Dostupné z: <http://www.povrchoveupravy.cz/2005-04-clanek01.html>
- 21.LAKOL s.r.o. – *Kataforézní lakování* [online]. 2006 [cit. 2014-9-11]. Dostupné z: <http://www.lakol.cz/lakovani/katoforezni-lakovani/katoforezni-lakovani-ktl.html>
- 22.HERMANN, František, SCHILLER, Marek. *Zkoušení nátěrových hmot a ochranných povlaků* [online]. Pardubice - Zelené předměstí: SYNPO a.s., 2005 [cit. 2005-10-23]. Dostupné z: http://www.sczl.cz/dokumenty/k06_04.pdf.
- 23.KLÍMA, Miloš, KEDROŇOVÁ, Eva, SVOBODA, Tomáš. *Moderní plazmo-chemické postupy pro konzervování-restaurování předmětů kulturního dědictví* [online]. 2011 [cit. 2015-09-17]. Dostupné z: <http://www.sci.muni.cz/chemsekcce/frvs2011/pdf/plazma.pdf>.
- 24.MM, Průmyslové spektrum. *Testování přilnavosti povlaku k plechu ohýbání* [online]. 2010 [cit. 2014-9-11]. Dostupné z: <http://m.mmspektrum.com/clanek/testovani-prilnavosti-povlaku-k-plechu-ohybanim>
- 25.ČSN EN ISO 7438 (420401). *Kovové materiály - Zkouška ohybem*. 2016. Český normalizační institut.

26. Patent EP 1077021, US 6,525,481. *Method of Making a Physically and Chemically active Environment by Means of a Plasma jet and the Related Plasma Jet*. Brno : Masaryk University, 2005. 6 s.
- 27.SVOBODA, T. *Modifikace povrchů plazmovými tryskami*. Brno: Masarykova univerzita v Brně, Přírodovědecká fakulta, 2010. Diplomová práce. 89 str.
- 28.KLÍMA, Miloš, Zdeněk MUZIKÁŘ, Milan DVOŘÁK a Milan ALBERTI. Povrchové úpravy nízkoteplotním neizotermickým plazmatem za atmosférického tlaku. In *41st International Conference on Coatings Technology. Pardubice, Czech Rep.: Univerzita Pardubice, 2010.* s. 251-262, 12 s. ISBN 978-80-7395-258-7.
- 29.KLÍMA, Miloš. Plazmo-chemické, chemické a diagnostické metody pro povrchové úpravy. In *TRANSFER Výzkum a vývoj pro letecký průmysl č 22 / 2014. Elektronický sborník VZLÚ, Praha, 16-17 června, 2014,* str. 34-43. ISSN 1801 - 9315.
- 30.KLÍMA, Miloš, KEDROŇOVÁ, Eva, BURŠÍKOVÁ, Vilma. Plazmochemická modifikace jednovrstevných nátěrových hmot a jejich diagnostika. In *TRANSFER Výzkum a vývoj pro letecký průmysl. č 25 / 2015. Elektronický sborník VZLÚ, Praha, 4 – 5. června, 2015,* str. 8-16. ISSN 1801 - 9315.
- 31.FÜRBACHER, Ivan, zástupce ředitele a vedoucí akreditovaných laboratoří v SVÚM a.s. Praha. *Lexikon ocelí, část 3, díl 1, str. 1, nelegované jakostní oceli*. Praha. 2015. ISSN 20080204.
- 32.FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
- 33.*Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001. Svařování. ISBN 80-85771-81-0.
- 34.MRÁZEK, D. *Ověření určování velikosti deformací pomocí systému ARGUS*. Praha, 2015. 71 s. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí diplomové práce František Tatiček.

ABSTRAKT

Teoretická část dizertační práce popisuje ohýbání plechů, zejména s malým poloměrem ohybu a rozdělení deformace a popisuje parametry ohýbaného plechu. Jelikož zkoumané plechy byly ošetřeny kataforézním lakováním je tato metoda lakování popsána společně s předúpravou plechu. Praktická část je zaměřena na princip multitryskového plazmového systému a ošetření ocelového povrchu a zkoumá ohýbané povrchy ocelových plechů s různými variantami nanesení povlaku. Vybrané vzorky jsou ohnuty na multifunkčním ohýbacím přípravku a podrobeny zkoušce podle Erichsena a vyvozeny výsledky s použitím plazmového systému a bez použití plazmového systému. V experimentální části byly zkoumané vzorky ošetřeny multitryskovým plazmovým systémem a následně ohnuty na multifunkčním ohýbacím přípravku. Jsou porovnávány zjištěné výsledky jednotlivých experimentů v systému ocel - základní povlak - plazma - vrchní povlak. A dále se porovnává vzájemná kombinace různých druhů modifikování povrchu ocelových vzorků s různými povlaky. Vybrané vzorky byly testovány na tahovou zkoušku a byly z ní zpracovány výsledky. U vybraných vzorků byl vypočítán exponent zpevnění. Další experiment spočíval v nanesení kružnic na rovné vzorky a následně byly tyto vzorky ohnuty pod definovaným rádiusem a byly stanoveny tahové a tlakové deformace. Poté byly vzorky plechu zalité do pryskyřice a zkoumány pod mikroskopem, kde byly rozděleny do několika kategorií a bylo stanoveno optimální složení multitryskového plazmového systému pro vybrané vzorky a konkrétní povlaky na ocelový plech s maximální přilnavostí povlaku k ocelovému základu. Vybrané měřené hodnoty byly podrobeny statistické kontrole.

ABSTRACT

Theoretical part PhD thesis describes bending of sheets especially with a small bend radius and the distribution of deformation and describes the parameters of bent sheet. As the test sheets were treated by cathaphoretic coating is this method described together with pretreatment of sheet. The practical part is focused on the principle multi-jet plasma system and treatment of the steel surface and examines the bent surfaces of the steel sheets with different variants of applying the coating. Selected samples are bent on the multifunction graduated bending jig and subjected to the Erichsen test and deduced results using plasma system and without the use of plasma system. In the experimental part were examined samples treated by multi-jet plasma system and subsequently bent on the multifunction graduated bending jig. Compares the results of individual experiments in system steel – base coat – plasma – topcoat. And also compares mutual combinations of various kinds of modifying the surfaces of steel samples with different coatings. Selected samples were tested for tensile test and the results were processed from this test. For selected samples was calculated hardening exponent. Another experiment consists in applying a circle at equal samples and subsequently the samples were bent under a defined radius and were determined tensile and compressive deformation. Samples of sheets were then embedded in the resin and then examined under a microscope, where they were divided into several categories and was determined optimal composition multi-jet plasma system for selected samples and the specific coatings on sheet plate with a maximum adhesion of the coating to the steel base. Selected measured values were subjected statistical control.

ŽIVOTOPIS

Osobní údaje

Jméno	Emil Schwarzer
Adresa	Peškova 14 779 00 Olomouc
Telefon	+420 776 642 144
Email	emil.schwarzer@seznam.cz

Pracovní zkušenosti

7/2016 - dosud

MONTIX a.s

Projektový vedoucí

Vedení projektů pro zavedení nových montážních linek pro výrobu nepohledových dílů v automobilovém výrobním podniku. Vedení a relokace projektů pro zavedení montážních linek pro výrobu světelné techniky v automobilovém výrobním podniku. Následná implementace a optimalizace linky do sériové výroby.

1/2015 – 6/2016

WOCO STV s.r.o.

Projektový Technolog

Vedení projektů pro zavedení nových montážních linek pro výrobu nepohledových dílů v automobilovém výrobním podniku. Zpracování montážní kalkulace a technické dokumentace, výběr vhodného dodavatele ve stanoveném termínu a dle požadovaných nákladů. Následná implementace a optimalizace linky do sériové výroby. Zaškolení obsluhy linky.

6/2013 – 5/2014

Mubea, spol. s r.o.

Vedoucí plánování a řízení výroby

Odpovědnost za optimalizaci a využití strojního zařízení. Koordinace a řízení podřízených pracovníků. Eliminace prostojů strojů a nevyužití pracovní síly s cílem zavedení a udržování systému štihlé výroby. Odpovědnost za tvorbu výkonových norem,

optimalizaci procesů a jejich správu, aktualizaci dat v systému, úpravu dat, zejména kmenová data, kusovníky, pracovní postupy.

5/2012 – 5/2013

Dimer, spol. s r.o.

Vedoucí výroby

Rozšíření strojírenské výroby o hřebenové a spirálové těsnění. Odpovědnost za plánování výroby. Zavedení nového měřicího střediska.

11/2006 – 4/2012

Fritzmeier, spol. s r.o.

Technický manažer

Řízení a úzká spolupráce s výrobním manažerem na přiděleném projektu mezi mateřskou firmou v Německu a dceřinou firmou v ČR. Řešení výrobních a montážních problémů. Zajištění technické dokumentace dle požadavků zákazníka. Dohled nad prací měřicího střediska a s tím spojené mustrování dílů. Dohled nad akčním plánem s pravidelným reportingem vedení společnosti.

Technolog ohýbání

Úpravy a tvorba nových nástrojů pro ohýbací stroje, zejména pro tvarově upravené profily. Programování a nastavení parametrů pro NC ohýbací stroje. Úzká spolupráce s konstruktérem pro zajištění výroby přípravků a nástrojů. Podpora při implementaci autonomní údržby pro výrobní stroje.

1/2005 – 1/2006

TRW-DAS, a.s.

Testový inženýr

Tvorba komplexní simulace provozního namáhání. Stavba životnostních zkoušek, zkoušek řízení a zatížení automobilu v laboratoři a příprava zprávy pro simulaci.

Vzdělání

9/2009 – 12/2016

VUT Brno – Fakulta strojního inženýrství

Odbor technologie tváření kovů a plastů

Doktorské studium

Obor: Strojírenská technologie

Dizertační práce: *Studium tvařitelnosti povlakovaných plechů s plazmo-chemickou předúpravou povrchu*

9/1997 – 6/2004

**VŠB – Technická univerzita Ostrava,
Fakulta strojní**

Magisterské studium

Obor: Provoz a údržba dráhových vozidel

Diplomová práce: *Optimální varianty ekologického zpracování vyřazených pneumatik*

9/1993 – 6/1997

**Střední odborné učiliště strojírenské
s maturitou v Prostějově**

Maturitní studium

Obor: Mechanik a seřizovač obráběcích strojů

Jazykové znalosti

Anglický jazyk - pokročilý

Německý jazyk - začátečník

Řidičský průkaz

A, B

Zájmy

Četba, filmy, cyklistika, turistika, squash,
kolektivní sporty