

VĚDECKÉ SPISY VYSOKÉHO UČENÍ TECHNICKÉHO V BRNĚ

Edice PhD Thesis, sv. 654

ISSN 1213-4198

thesis IS

Ing. Martin Hušek

**Tvařitelnost tenkých ocelových plechů
s povrchovou úpravou eloxovaného hliníku**

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

ING. MARTIN HUŠEK

**TVAŘITELNOST TENKÝCH OCELOVÝCH PLECHŮ
S POVRCHOVOU ÚPRAVOU ELOXOVANÉHO HLINÍKU**

**FORMABILITY OF THIN STEEL SHEETS COATED
WITH ANODIZED ALUMINIUM**

ZKRÁCENÁ VERZE Ph.D. THESIS

OBOR	TECHNOLOGIE TVÁŘENÍ KOVŮ A PLASTŮ
VEDOUCÍ PRÁCE	DOC. ING. MILAN DVOŘÁK, CSC.
OPONENTI	PROF. ING. JAN SUCHÁNEK, CSC., PROF. ING. EMIL SPIŠÁK, CSC.
DATUM OBHAJOBY	29.3.2012

Klíčová slova:

Plech, povlakované plechy, vypínání, přilnavost, ohýbání, morfologie.

Keywords:

Sheet, coated plates, stretching, adhesion, bending, morphology.

Místo uložení:

Areálová knihovna Fakulty strojního inženýrství, VUT v Brně.

© MARTIN HUŠEK, 2012

ISBN 978-80-214-4508-6

ISSN 1213-4198

OBSAH

Str.

1	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY	5
2	PERSPEKTIVY VYUŽITÍ HLINÍKU	5
3	POVRCHOVÁ ÚPRAVA ELOXOVÁNÍ.....	5
3.1	TECHNOLOGIE VÝROBY ELOXOVANÉ VRSTVY	6
3.1.1	<i>Vlastnosti a použití oxidových vrstev.....</i>	6
3.1.2	<i>Princip a způsoby provádění anodické oxidace hliníku</i>	6
4	TVAŘITELNOST OCELOVÝCH PLECHŮ S POVRCHOVOU ÚPRAVOU	7
4.1	PROBLEMATIKA TVAŘITELNOSTI POVRCHOVĚ UPRAVENÝCH PLECHŮ 7	
4.2	HODNOCENÍ VHODNOSTI PLECHŮ K TAŽENÍ	8
4.2.1	<i>Tahová zkouška</i>	8
4.2.2	<i>Zkouška hloubením dle Erichsena.....</i>	8
4.3	TEORIE A TECHNOLOGIE OHÝBÁNÍ PLECHŮ	9
4.3.1	<i>Deformace při ohýbání plechu</i>	9
4.3.2	<i>Ohybový moment, síla a dráha nástroje.....</i>	9
4.4	TEORIE A TECHNOLOGIE VYPÍNÁNÍ SKOŘEPINY	10
4.4.1	<i>Vypínání půlkulovým pevným nástrojem</i>	10
4.4.2	<i>Limitní diagramy</i>	10
5	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	11
6	ZKOUŠENÍ PLECHŮ	11
6.1	DŮVOD TVORBY ELOXOVANÉ VRSTVY	11
6.2	TVORBA ELOXOVANÉ VRSTVY.....	11
6.3	SEZNAM VZORKŮ URČENÝCH PRO EXPERIMENT.....	12
6.4	OŠETŘENÍ POVRCHU PLAZMOVÝMI TRYSKAMI (PLAZMOVOU TUŽKOU) 12	
7	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ	13
7.1	UKÁZKA MORFOLOGIE NA VYBRANÝCH VZORCÍCH	13
7.2	SLEDOVÁNÍ TLOUŠŤKY POVLAKU V ZÁVISLOSTI NA VELIKOSTI DEFORMACE.....	14
7.3	SLEDOVÁNÍ ZMĚNY KONCENTRACE POVLAKU (POVRCHU) PO JEHO DEFORMACI.....	15

7.4	TVAŘITELNOST KOVOVÉHO ZÁKLADU A POVLAKU S VYUŽITÍM MECHANICKÝCH A TECHNOLOGICKÝCH ZKOUŠEK KE STANOVENÍ DEFORMACE POVLAKU NA KOVOVÉM ZÁKLADU	15
7.4.1	<i>Tahová zkouška</i>	15
7.4.2	<i>Ohybová zkouška</i>	16
7.5	STATICÁ ANALÝZA OHÝBÁNÍ ZKUŠEBNÍHO PLECHU NA PŘÍPRAVKU POMOCÍ KLADEK.....	17
7.6	ERICHSENOVA ZKOUŠKA HLUBOKOTAŽNOSTI	18
7.7	GRUBBSŮV TEST.....	19
7.8	HODNOCENÍ INTENZITY DEFORMACE	19
7.9	SLEDOVÁNÍ MEZNÍCH PODMÍNEK PŘILNAVOSTI POVLAKU (VLIV PLASTICKÉ DEFORMACE NA PŘILNAVOST POVLAKU)	20
8	ZÁVĚR.....	21
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	22
10	VLASTNÍ PUBLIKACE A SPOLUAUTORSTVÍ.....	22
11	ABSTRACT	27
12	CURRICULUM VITAE.....	27

1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY

V současné době stále převládá lisování povrchově neupravených plechů. Plechy jsou povrchově upravovány až následně po operaci lisování. Snahou je realizovat operaci lisování k zpracování již povlakovaných plechů. Tím se výrazně sníží náklady na výrobní proces.

Stávající průmyslová výroba využívá hliník a jeho slitiny k zhotovení různých součástek. Je využívána korozivzdornost a nízká hmotnost při současně vysoké pevnosti vybraných slitin hliníku při výrobě dopravních prostředků a stavebních konstrukcí. Rozšířil se sortiment hliníkových slitin a také jejich speciální použití. Současně jsou kladeny vyšší požadavky na povrchové úpravy. Uvedený trend nutí výrobce ke stálému zdokonalování výrobních technologií. Se zvyšující se kvalitou výrobních technologií dochází k postupnému odstraňování vad vznikajících ve výrobním procesu.

V procesu eloxování se vyskytují závady materiálového charakteru a závady v technologickém procesu, jako jsou odmašťování, odmašťování s mořícím efektem, anodická oxidace, tenká vrstva, skvrny a nerovnoměrné probarvení, vzduchové a plynové kapsy, vypírání, oplach, barvení, různé vybarvení u různých vsázek, neobarvená místa okolo malých otvorů, součástka při oplachu a utěsnění se odbarvuje, málo intenzivní vybarvení.

Odstraněním těchto vad se docílí tvarově a esteticky zhotoveného výrobku. Efektivním procesem výroby se dále zvýší mechanické hodnoty výrobku při nižší hmotnosti tenkých plechů s povrchovou úpravou. [60]

2 PERSPEKTIVY VYUŽITÍ HLINÍKU

Hliník a jeho slitiny jsou již dnes využívány téměř ve všech oblastech lidské činnosti. Využití hliníku a jeho slitin se ve výrobě dopravních prostředků a stavebních konstrukcí bude nadále zvyšovat.

Například konstruktéři automobilů se zabývají myšlenkou automobilu o spotřebě pohonných hmot 3 l na 100 km. Vedle řady dalších faktorů ovlivňujících hodnotu spotřeby automobilu hraje značnou roli celková hmotnost vozidla, kterou lze právě využíváním lehkých a přitom pevných hliníkových slitin při zachování stávající bezpečnosti značně snížit. V současné době sériově vyráběný automobil s celohliníkovou samonosnou karosérií je luxusní limuzína Audi A8. Podobná situace je i v leteckém průmyslu, kde se očekává větší nasazení slitin typu Al-Li, jen co se podaří dokonale zvládnout technologii výroby těchto extrémně lehkých materiálů. [14]

Bude se pokračovat ve využívání hliníkových materiálů ve stavebních konstrukcích a konstrukcích vystavených nepříznivým vlivům jako např. mořské lodě. [16]

Vývoj se bude ubírat směrem k vyšším čistotám, které umožní zmenšit plochu vodičů při zachování stejné elektrické vodivosti. To povede k dalším úsporám na hmotnosti a velikosti elektrotechnických zařízení. [14]

3 POVRCHOVÁ ÚPRAVA ELOXOVÁNÍ

Obor povrchových úprav zasahuje do všech odvětví hospodářství a svým významem rozhoduje o funkční spolehlivosti, kvalitě a celkové užitné hodnotě výrobku i o efektivním a hospodárném využívání materiálů. Význam rozvoje povrchových úprav nespočívá pouze v získávání dalších funkčních vlastností povrchu materiálu, ale především v rozšíření možností projekčních, konstrukčních a technologických záměrů ve strojírenství i dalších oborech. Jednou z technologií povrchových úprav podrobující se inovačnímu cyklu je eloxování.

Eloxování zvyšuje korozní odolnost a otěruvzdornost eloxovaného dílu a poskytuje lepší přilnavost pro nátěry. Při eloxování je možné díly zabarvit pomocí organických barviv do široké škály barev a dodat jim tak potřebný dekorativní vzhled.

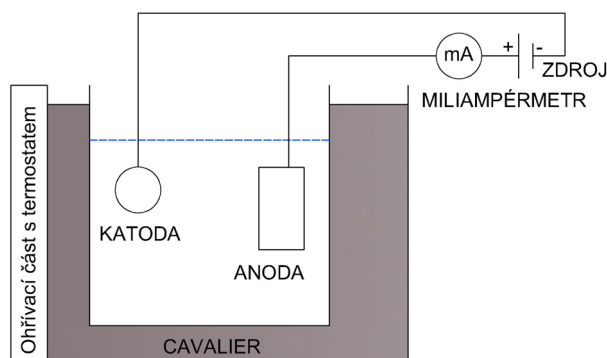
3.1 TECHNOLOGIE VÝROBY ELOXOVANÉ VRSTVY

3.1.1 Vlastnosti a použití oxidových vrstev

Anodická oxidace (eloxování - elektrolytická oxidace hliníku) hliníku a jeho slitin patří mezi nejvýznamnější povrchové úpravy. Neupravené hliníkové povrchy vytváří vlivem atmosféry přírodní vrstvu oxidů (oxidickou vrstvu), která chrání materiál před další korozi. Přírozená vrstva oxidů je velmi slabá. Za přítomnosti vlhkosti dojde ve vnější části oxidické vrstvy k hydrataci a oxid se mění na hydroxid hlinitý. Výsledné vrstvy se snadno poškodí vlivem atmosférických podmínek nebo mechanicky. Hliník nebo jeho slitiny proto potřebují ochranu proti korozi. Takové ochrany můžeme dosáhnout pomocí anodické oxidace hliníku a jeho slitin. Během anodické oxidace vzniká na povrchu vrstva oxidů hliníku. Eloxované vrstvy mají dobrou korozní odolnost a jsou chráněny proti poškození, dále jsou tvrdé a dobře vybarvitelné. Různými metodami anodické oxidace můžeme vytvářet dekorativní, barevné a funkční vrstvy oxidů. [17]

Technologický postup anodické oxidace hliníku a hliníkových slitin spočívá jednak v předběžné mechanické úpravě, odmaštění, moření a v konečném vyloučení oxidového povlaku. Podle způsobu leštění lze docílit matného i vysoce lesklého povrchu. Na vznik a vlastnosti vytvářených povlaků má vliv složení kovu a použité lázně, použité proudové podmínky, teplota lázně a doba působení. Vhodnými lázněmi jsou roztoky kyseliny sírové, chromové, šťavelové, méně časté je použití kyseliny citronové a borité. Změnou těchto činitelů je možné ovlivnit barvu a tloušťku povrchového povlaku, jeho tvrdost i pórovitost. Eloxováním se vytváří na povrchu hliníku ve vhodných lázních povlak oxidu hlinitého. Děje se tak pomocí elektrického proudu, většinou stejnosměrného, přičemž upravované součásti jsou upevněny na závěsech jako anody. Katody tvoří olovo, hliník, titan nebo korozivzdorná ocel. [16], [13]

3.1.2 Princip a způsoby provádění anodické oxidace hliníku

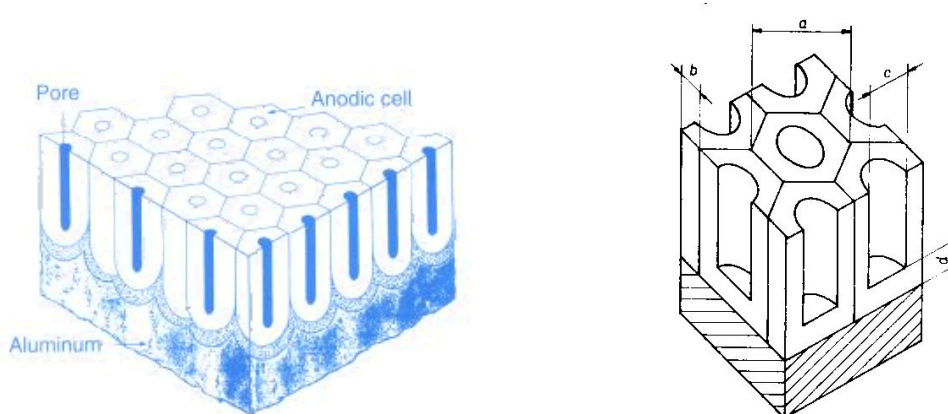


Obr.3.1 Princip anodické oxidace ve vodném roztoku kyseliny

Různé způsoby eloxování se liší podle použitých lázní i podle druhu použitého proudu. Hlavně se používá proud stejnosměrný, někdy však i střídavý, popřípadě střídavý superponovaný stejnosměrným a v poslední době i pulzující proud. Vznikající oxidový povlak má takzvaný hradlový efekt, to znamená, že propouští proud jen jedním směrem. To umožňuje použít při eloxování i střídavý proud. Při průchodu elektrického proudu lázní vzniká velké množství tepla, proto je nutné chlazení nejen roztoku, ale hlavně vrstvy. Na anodickou oxidaci působí několik činitelů, které je nutné vyváženě propojit, aby bylo dosaženo nejvýhodnějších podmínek. Příznivý vliv na proces má optimální složení lázně. Zvýšení koncentrace

kyseliny sírové zvyšuje vodivost, ale i rozpouštění vrstvy. Zvýšená teplota zvyšuje vodivost lázně, tím tvorbu oxidů, ale i rozpouštění vrstvy. Proces urychluje vyšší proudová hustota, ale současně zvyšuje teplotu, která urychluje rozpouštění a spálení vrstvy. Pokud se eloxují legované materiály, dochází během procesu k rozpouštění legury, nebo jsou uzavřeny do povlaku. [62]

Pomocí elektronové mikroskopie byla prokázána pravidelná hexagonální struktura oxidové vrstvy Al_2O_3 (obr.3.2). Průměr pórů závisí na druhu použitého elektrolytu. Tloušťka stěny a závěrné vrstvy jsou závislé na použitém napětí při oxidaci. Vrstva Al_2O_3 má větší objem než množství kovu, na kterém oxid vzniká, takže eloxované výrobky zpočátku nabývají na rozměru. Schematické porovnání galvanického povlaku a anodické vrstvy je na obr.3.3. [17]



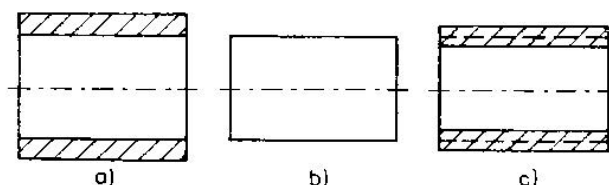
Obr.3.2 Buňka oxidové vrstvy [13] , [17]

a – velikost buňky (průměr)

b – tloušťka stěny buňky

c – průměr póru

d – tloušťka závěrné vrstvy



Obr.3.3. Porovnání galvanického povlaku a oxidové vrstvy [17]

a) pokovený povrch b) neupravený původní povrch c) anodicky oxidovaný povrch

4 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, napěťového stavu, historie napětí a deformace, geometrického faktoru a vnějšího prostředí. Při tváření povrchově upravených plechů nesmí dojít z důvodu zachování požadovaných vlastností k poškození povlaku naneseném na základovém plechu. [21]

4.1 PROBLEMATIKA TVAŘITELNOSTI POVRCHOVĚ UPRAVENÝCH PLECHŮ

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 následnému 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 povrchové vrstvy, tedy všech vazeb mezi povrchem a základním materiálem pro tváření. Tohoto se dosahuje optimalizací všech technologických parametrů.

Obecným kritériem hodnocení lisovatelnosti daného dílu je dodržení požadavků kladených na výlisek ve vztahu k jeho dalšímu technologickému zpracování (např. realizovatelnost následných operací tváření, povrchové úpravy) a funkční uplatnění (tvarová a rozměrová přesnost, tuhost, stabilita). Lisovatelnost plechu umožňuje požadovanou změnu tvaru, při zachování užitných vlastností zpracovaného povrchově upraveného plechu. V případě eloxovaných plechů jde především o zachování korozní odolnosti. Hodnocení lisovatelnosti těchto materiálů znamená stanovit mezní stavy základního materiálu a mezní stavy povrchové vrstvy, respektive povlaku. [25]

4.2 HODNOCENÍ VHODNOSTI PLECHŮ K TAŽENÍ

Plošné tváření je charakterizováno neustálým rovinným stavem napjatosti. Zahrnuje celou řadu technologií, při kterých se skutečný stav napjatosti v 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.

4.2.1 Tahová zkouška

Odběr tabulek z plechu se provádí v souladu s ČSN 42 0305, která stanovuje zásady odběru a zpracování zkušebních vzorků z oceli pro mechanické zkoušení.

Hodnocení mechanických vlastností zkouškou jednoosým tahem podle evropské normy:

K vyhodnocovaným parametrům patří smluvní mez kluzu – $R_{p0,2}$, výrazná mez kluzu v tahu - R_e , mez pevnosti v tahu - R_m , tažnost – A_{80} , kontrakce – Z , maximální rovnoměrná deformace – ϵ_r , konstanty pevnosti – C .

Hodnoty zjišťované zkouškou jednoosým tahem, tj. smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ (MPa), mez pevnosti v tahu R_m (MPa), tažnost A_{80} (%), kontrakce Z (%), eventuelně rovnoměrná deformace ϵ_r , nelze posuzovat izolovaně. Pro hluboké tažení je důležité vzít v úvahu i schopnost deformačního zpevnění materiálu, charakterizovanou rozdílem meze kluzu a meze pevnosti. Obvykle se vyjadřuje poměrem $R_{p0,2}/R_m$, přičemž za vhodné se považuje, je-li $0,6 < R_{p0,2}/R_m < 0,8$, nebo se vyjadřuje v podobě informativní charakteristiky, tzv. zásoby plasticity.

Zásoba plasticity:

$$ZP = k \cdot (R_m - R_{p0,2}) \cdot \epsilon_r \quad (4.1)$$

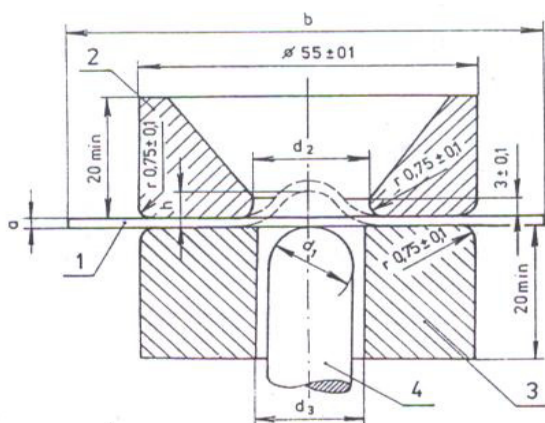
kde:

k – konstanta, $k=3/4$ – materiály s nevýraznou mezí kluzu, $k=2/3$ – materiály s výraznou mezí kluzu

Opodstatnění tahové zkoušky pro hodnocení vlastností plechů:

- Porovnávání materiálů ve vztahu ke konkrétnímu typu výtažku (válcové výtažky a výtažky pravidelného tvaru).
- Určování materiálových charakteristik potřebných k výpočtu mezních deformací. [5]

4.2.2 Zkouška hloubením dle Erichsena

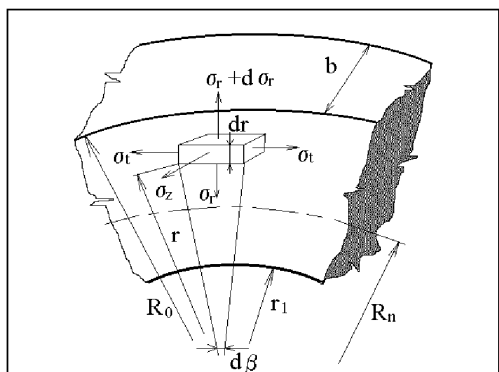


Obr.4.1. Schéma pracovního prostoru zkušebního zařízení [5]

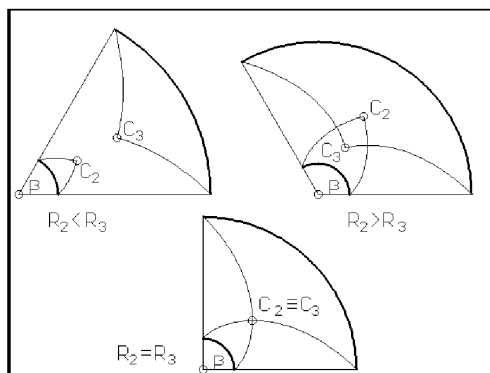
Zkouška hloubením dle Erichsena udává kritérium tvažitelnosti plechu (velikost dosaženého hloubení IE v okamžiku vzniku průchozí trhliny). Hodnoty IE leží v poměrně úzkém intervalu pro různé jakosti plechu a jsou proto zatíženy větší chybou měření (danou i subjektem obsluhy). Tato zkouška je často používána, protože je jednoduchá, rychlá a nenáročná na přípravu vzorků. Nevýhodou této zkoušky je, že nepodává informaci o anizotropii mechanických vlastností zkoušeného plechu. Erichsenovu zkoušku charakterizují tahová napětí. Výsledky této zkoušky jsou proto směrodatně především pro takové tvary výtažků, kde převládají tahová namáhání. [5]

4.3 TEORIE A TECHNOLOGIE OHÝBÁNÍ PLECHŮ

Všeobecně se technologický proces ohýbání realizuje působením vnějších ohybových momentů a současně i podélných a příčných sil. Při působení ohybových momentů na protilehlých okrajích prismatického polotovaru dochází ke zmenšování poloměru střední plochy. Od určitého poloměru ohybu vznikají v povrchových vrstvách plastické deformace, přičemž při pokračujícím ohybu se tloušťka plastické vrstvy zvětšuje. Plastická deformace se šíří do hloubky od povrchu a tloušťka pružně deformované vrstvy se zmenšuje. Základem technologických tvářecích pochodů jsou velké plastické deformace. Při těchto deformacích se trvale mění tvar a rozměry tělesa. V deformovaném objemu mohou probíhat i různé fyzikální a chemické děje. Při tvářecích pochodech se přitom nesmí překročit stav napjatosti. [12]



Obr.4.2. Schéma ohýbání [12]



Obr.4.3. Zobrazení kluzových čar vznikajících při ohýbání [12]

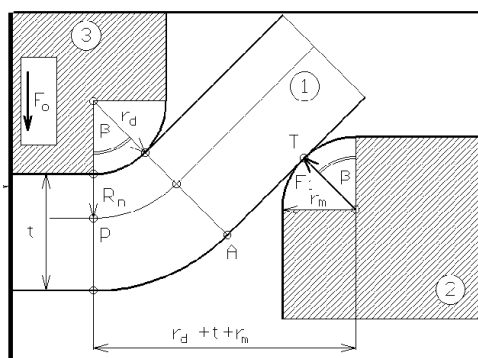
4.3.1 Deformace při ohýbání plechu

Deformace při ohýbání je obecně prostorový stav napjatosti φ_r , φ_z , φ_t , přičemž určující je *tečná deformace* tahová na vnější straně neutrální plochy a tlaková na vnitřní straně. Plastická deformace ve směru radiálním φ_r způsobuje zmenšování tloušťky t polotovaru v místě ohybu. Deformace φ_z v oblasti tahu zkracuje a v oblasti tlaku prodlužuje příčný rozměr b . Obě deformace, φ_r a φ_z , se v případě ohýbání širokého pásu zanedbávají a pro popis stavu deformace se použije pouze deformace tečná φ_t . [12]

Intenzitu přirozené deformace lze pak vyjádřit vztahem:

$$\varphi_i = \ln(R_0 / R_n) = \ln(R_n / r_1) \quad (4.1)$$

4.3.2 Ohybový moment, síla a dráha nástroje



Obr.4.4. Schéma pracovního prostoru zkušebního zařízení [5]

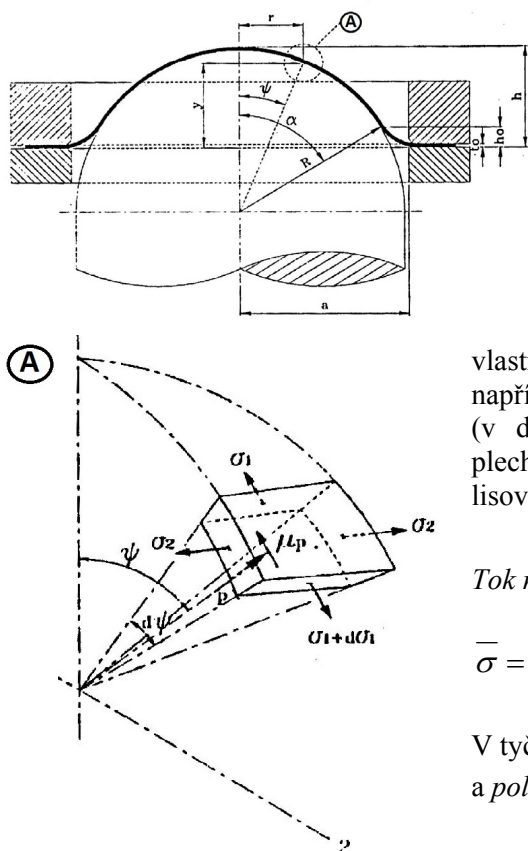
Ohyb v ohybadle probíhá při největším zatížení polotovaru (1), umístěného na ohybnici (2), ohybníkem (3), tvářecí silou F_0 . Zpravidla je používán ohyb U nebo V, resp. jejich kombinace. Schéma záputkového ohýbání znázorňuje obr.4.3 pro tvar U. Výpočet ohýbací síly v závislosti na okamžité hodnotě úhlu ohybu: [12]

$$M_0 = \sigma_p \cdot \frac{1}{12} \cdot b \cdot t^2 \cdot (3 - t_w^2 / t^2) \quad (4.2)$$

$$F_0 = \frac{2M_0 \cdot (\cos \beta + f \cdot \sin \beta)}{\left[R_n \cdot \sin \beta + (r_d + r_m + t) \cdot \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\beta}{2} \right) \right]} \quad (4.3)$$

4.4 TEORIE A TECHNOLOGIE VYPÍNÁNÍ SKOŘEPINY

4.4.1 Vypínání půlkulovým pevným nástrojem



Obr.4.5. Zobrazení geometrického uspořádání procesu tažení plechu s vypínacím půlkulovým tažníkem [1]

Nejjednodušší proces vypínání plechu je zobrazen na obr.4.5. Lisovník je v tomto procesu vtlačen do plechu a v jeho centru vznikají tahové síly. Tyto tahové síly způsobují deformaci. Kontaktní napětí mezi lisovníkem a plechem je mnohem nižší než mez kluzu plechu. Materiál na okrajích plechu odolává tažným silám a v tomto místě vzniká obloukové (obvodové) napětí v tlaku. Jelikož v oblasti vně tohoto místa budou vznikat tendence k prohýbání, bude plech držen přidržovačem. Uvedené vlastnosti jsou běžné u mnoha způsobů zpracování plechů - například u těch, u kterých není tváření způsobeno přímým tlakem (v dotyku), ale silami přenášenými plechem (prostřednictvím plechu) a je zde rovnováha (vyváženost) mezi tahovými silami nad lisovníkem a tlakovými silami v materiálu vnější příruby. [12]

Tok napětí při použití Misesovy podmínky pro anizotropní materiál

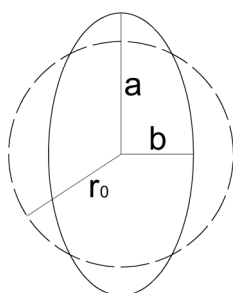
$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{2}{1+\bar{R}}} \cdot \frac{p \cdot R}{2t} \sqrt{1 + \mu^2 \left[\frac{2\psi - \sin(2\psi)}{1 - \cos(2\psi)} \right]^2} \cdot (1 - 2\bar{R}) \quad (4.4)$$

V tyči ($\psi = 0$) a z podmínek nestlačitelnosti je *efektivní napětí* a *polární výška* dána:

$$\bar{\varepsilon} = 2 \ln \left(\frac{2 \cdot R \cdot h}{a^2} \right) \quad (4.5)$$

$$h = \exp \left(\frac{\bar{\varepsilon}}{2} \right) \frac{a^2}{2R} \quad (4.6)$$

4.4.2 Limitní diagramy



Obr.4.6 Vyjádření maximální a minimální deformace kruhové sítě [21]

Reálný napětí-ově-deformační stav při tažení nebo vypínání tvarově komplikovaných výtažků nelze postihnout jednoduchými zkouškami. Pro komplikované výtažky (vyráběné ve velkých sériích) je proto účelné použít *zkoušek přímých* (tok materiálu zkoumán na modelu). Výsledek může být hodnocen *kvalitativně* (porušil - neporušil) nebo *kvantitativně*. Nejrozšířenější metoda kvantitativního popisu toku materiálu je *metoda sítě*. Hodnocení deformačních sítí je založeno na předpokladu, že se tenký plech poruší v důsledku lokalizace deformace při rovinné napjatosti, která vzniká v místech největší deformace. [21]

V případě, že se nemění tloušťka plechu po tváření: *logaritmická deformace*:

$$\varphi_1 = \ln \frac{a}{r_0}, \quad \varphi_2 = \ln \frac{b}{r_0}, \quad \varphi_3 = 0 \quad (4.7)$$

V případě, že se mění tloušťka plechu po tváření:

$$\varphi_3 = -\varphi_2 - \varphi_1 \quad (4.8)$$

5 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Rámcovým cílem byl návrh technologického postupu pro anodickou oxidaci na Al povlaku v kombinaci ocel – Al – elox , zjištění charakteristik tohoto spojení, porovnání se současnými poznatky a následný návrh využitelnosti této metody a tohoto systému pro průmyslovou praxi. Dosažení formulovaného cíle vyžaduje splnění dílčích kroků, jejichž sled byl sladěn s teoretickými analýzami a postupem prováděných experimentů.

Dílčí cíle disertační práce:

- Sledování tloušťky povlaku v závislosti na velikosti deformace.
- Sledování změny koncentrace eloxovaného povlaku po jeho deformaci.
- Tvařitelnost kovového základu a povlaku s využitím mechanických a technologických zkoušek ke stanovení deformace povlaku na kovovém základu.
- Výzkum morfologie povlaku ve vztahu k intenzitě deformace.
- Ověření vlivu plastické deformace na přilnavost povlaku.

6 ZKOUŠENÍ PLECHŮ

6.1 DŮVOD TVORBY ELOXOVANÉ VRSTVY

Eloxovaná vrstva v systému ocel – hliník – elox plní především estetickou funkci při zachování funkčních vlastností hliníkové podkladové vrstvy (zvýšení korozní odolnosti) po technologii tváření. Eloxovaná vrstva je navíc oproti hliníku v atmosférickém prostředí stálá. Splnění požadovaných mechanických vlastností systému ocel – hliník – elox zajišťuje ocelový plech. Systém ocel – hliník – elox je testován z důvodu možného nahrazení např. nerezových plechů (snížení ceny a lepší tvařitelnost bez konečné tepelné úpravy).

6.2 TVORBA ELOXOVANÉ VRSTVY

Cílem disertační práce je návrh technologického postupu pro anodickou oxidaci na Al povlaku v kombinaci ocel – Al – elox , zjištění charakteristik tohoto spojení, porovnání se současnými poznatky a následný návrh využitelnosti této metody a tohoto systému pro průmyslovou praxi. V rámci disertační práce je tento systém porovnáván s jinými podobnými povlaky nanesenými na ocelovém základním plechu.

Pro výzkum tvařitelnosti tenkých ocelových plechů s povrchovou úpravou eloxovaného hliníku byly dodány firmou ThyssenKrupp Stahl ocelové plechy s povlakem hliníku DX52D+AS120 (DIN EN 10327) o tloušťce 1,2 a 1,5 mm. Pro porovnání byly dále dodány ocelové plechy s povlakem aluzink DX51D+AZ150 (EN 10204/10327), hliníkové plechy EN AW-1050A (EN 485-2) a nerezové plechy AD 200 w2 (EN 10028-7). Všechny tyto plechy jsou dodány firmou Smart Trading Company v tloušťkách 1,2 a 1,5 mm. Všechny uvedené plechy jsou z důvodu estetického vzhledu na závěr povrchově upravovány. Ocelový plech s povlakem hliníku a hliníkový plech jsou podrobeny anodické oxidaci. Ocelový plech s povlakem aluzink a nerezový plech jsou komaxitovány.

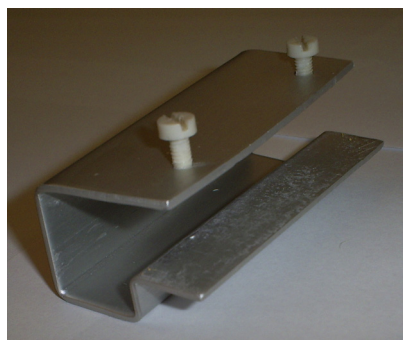
Pro tvorbu eloxované vrstvy jsou zvoleny následující vzorky:

- Ocelový plech s povlakem hliníku dodaný firmou ThyssenKrupp Stahl.
- Ocelový plech s naneseným povlakem hliníku.
 - Hliník pod tlakem nastříkán (našopován) v metalizační komoře.
- Hliníkový plech.

Pro tvorbu eloxovaného povlaku na ocelovém plechu s povlakem hliníku dodaném firmou ThyssensKrupp Stahl a ocelového plechu s metalizačně nastříkaným hliníkovým povlakem je navrhnut plastový přípravek (obr.6.1.). Jedná se o plastovou krychli, do které je ve tvaru vzorku určeného pro eloxování vyfrézovaná drážka. Do této drážky je testovaný vzorek následně vložen a utěsněn tmelem po obvodu, aby nedošlo v eloxovací lázni ke styku odkrytých ocelových hran a el.proudu. Pro přivedení proudu na hliníkový povlak je vyrobena svorka (obr.6.2.). Tato svorka má při testování průchodu el.proudu ze svorky na hliníkový povlak, kterého se dotýká, účinnost 100%. Tím jsou



Obr.6.1. Plastový přípravek pro eloxování



Obr.6.2. Hliníková svorka

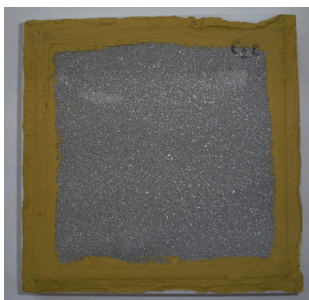
splněny všechny podmínky pro bezproblémové vytvoření eloxovaného povlaku. Svorka je vyrobena z hliníku.

K tvorbě eloxovaného povlaku jsou použity eloxovací lázně firmy LarsChemie Brno. Toto zařízení si dle velikosti plochy polotovaru určuje přírodní charakteristiky.

Dílčí závěr:

Na ocelovém plechu s povlakem hliníku dodaného firmou ThyssensKrupp Stahl se eloxovaný povlak vytvořit nepodařilo. Možných příčin je několik – vstupní parametry, nevhodné použití svorky pro přívod proudu nebo příliš tenká vrstva hliníkového povlaku.

Pro zjištění možných příčin je pokus 5x opakován. Jsou změněny vstupní parametry a svorka je zkušebně použita pro eloxování hliníkového plechu. Při změně parametrů ve dvou případech došlo ke spálení hliníkového povlaku a ve dvou případech se povlak nezměnil. Z negativních výsledků pokusů je nutné tento ocelový plech s povlakem hliníku z dalších pokusů vynechat.



Obr.6.3. Naeloxovaný ocelový plech s žárově naneseným povlakem hliníku vložený v přípravku

U ocelového plechu s žárově naneseným povlakem hliníku je docílen kladný výsledek již při prvním pokusu (obr.6.3.). Kladných výsledků je docíleno zřejmě díky silnější nanesené hliníkové vrstvě. Povlak je po anodické oxidaci tmavší a tloušťka vrstvy je cca 8-10 μm .

Hliníkové plechy jsou naeloxovány jak při eloxování pomocí upnutí do tzv.“ježku“ za díru, tak také za pomoci hliníkové svorky. Vytvořený povrch je esteticky velice zdařilý (obr.6.4.).



Obr.6.4. Naeloxovaný hliníkový plech s místem, kde byla přitlačena svorka

6.3 SEZNAM VZORKŮ URČENÝCH PRO EXPERIMENT

Pro experimenty bylo použito 72 vzorků.

- Označení vzorků
 - AXX- hliníkový plech (C – čtverec, P – pásek)
 - BXX- ocelový plech s žárovým nástřikem hliníku (C – čtverec, P – pásek)
 - CXX- nerezový plech (C – čtverec, P – pásek)
 - DXX- ocelový plech s povlakem aluzink (C – čtverec, P – pásek)

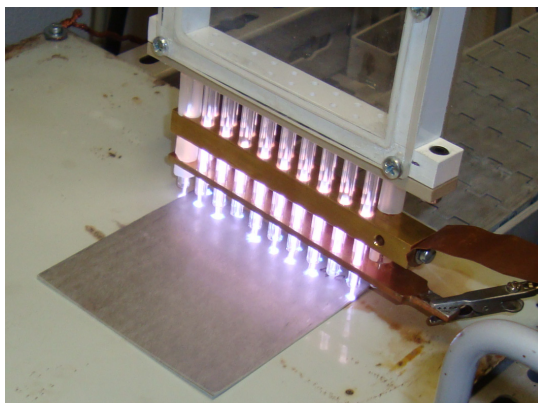
6.4 OŠETŘENÍ POVRCHU PLAZMOVÝMI TRYSKAMI (PLAZMOVOU TUŽKOU)

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

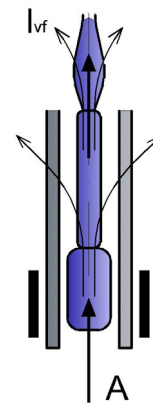
zachovat celistvost povlaku, tedy všech vazeb mezi povlakem a základním materiálem. Tohoto se snažíme dosáhnout optimalizací tvářecích operací, tzn. optimalizací všech technologických parametrů a dále zlepšením technologií nanášení povlaku.

V rámci možnosti zlepšení přilnavosti eloxované vrstvy v systému ocel-Al-elox a hliníkové vrstvy v systému ocel-Al-elox je navržena a aplikována nová technologie úpravy Al povlaku a ocelového základu – tzv. metoda opracování povrchu kovových povlaků plazmovými tryskami (plazmová tužka).

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 Al. 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 lineárních útvarů umožňuje v našem případě působit na celý povrch ocelového plechu s povlakem Al (viz obr. 6.5.).



Obr.6.5. Schéma aplikace plazmové tužky na hliníkový povrch



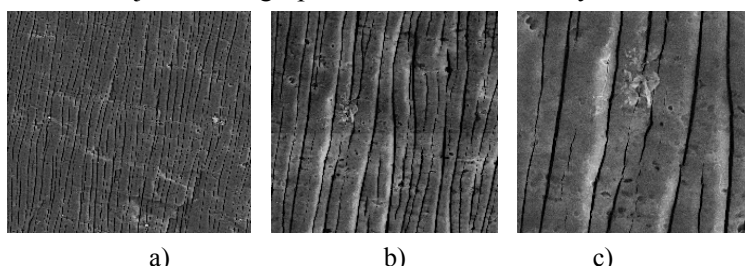
Obr.6.6. Schéma plazmové tužky

Hliníkový povlak je ošetřen před technologií tvorby eloxované vrstvy a ocelový základ je ošetřen před žárovým nástříkáním hliníku. Pro ošetření povrchu je zvoleno pět druhů plynových příměsí – Ar, O₂, N₂, CO₂, Ar+H₂O. Ke zjištění přilnavosti eloxované vrstvy vytvořené z Al povlaku a přilnavosti vrstvy hliníku na ocelovém základu je aplikována zkouška mřížkovým řezem (kap.7.9) a ohybová zkouška na odstupňovaném ohýbacím přípravku (kap.7.4.2.).

7 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ A VYHODNOCENÍ

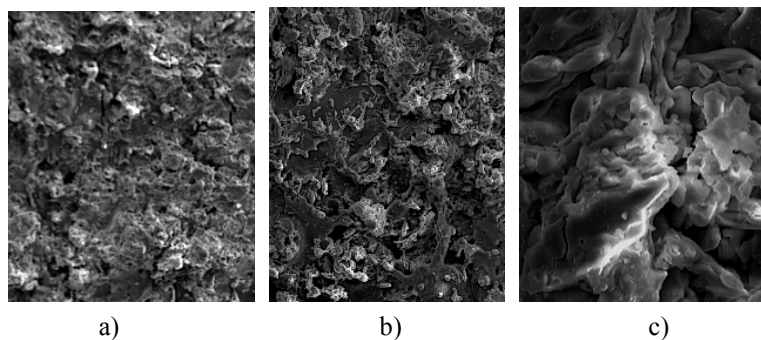
7.1 UKÁZKA MORFOLOGIE NA VYBRANÝCH VZORCÍCH

K ukázce morfologie povrchu jsou pro porovnání vybrány vzorky s eloxovaným povlakem, vytvořeným na hliníkovém plechu, na žárově nástříkaném povrchu hliníku a v poslední řadě na aluzinkovém povlaku. Morfologie je vyhodnocena pomocí elektronového mikroskopu TESCAN VEGA Plus TS 5135 MM v režimu odražených elektronů BSE, módu resolution a urychlujícím napětí elektronového svazku 30kV a zvětšení 50x, 250x, 500x a 1000x – ošetření povrchu plazmovými tryskami dle zjištěných výsledků modifikuje morfologii povrchu hliníkové vrstvy.



Obr.7.1. Morfologie eloxovaného povrchu vytvořeném na hliníkovém vzorku ošetřeného před eloxováním plazmou

a) zvětšení 250x, b) zvětšení 500x, c) zvětšení 1000x

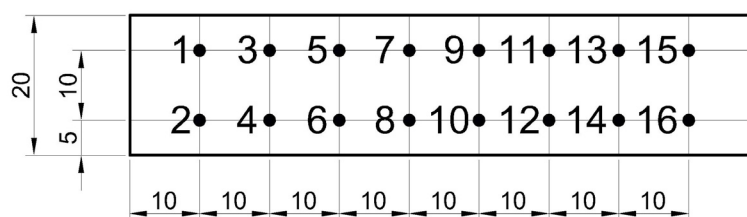


Obr.7.2. . Morfologie eloxovaného povrchu vytvořeném na ocelovém plechu s žárově nastříkaným povlakem hliníku ošetřeného před eloxováním plazmou
a) zvětšení 50x, b) zvětšení 250x, c) zvětšení 1000x

7.2 SLEDOVÁNÍ TLOUŠŤKY POVLAKU V ZÁVISLOSTI NA VELIKOSTI DEFORMACE

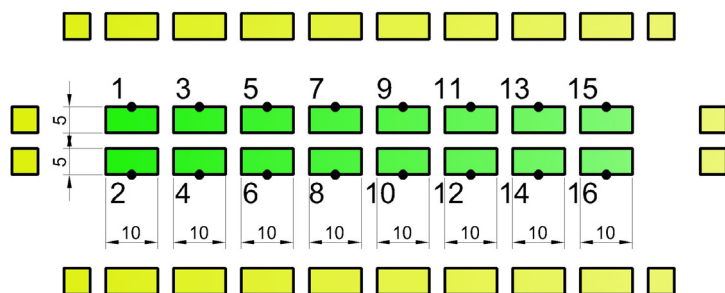
Tloušťka eloxovaného povlaku vytvořeného na hliníkovém plechu, na žárově nastříkaném povlaku hliníku a povlaku aluzink na ocelovém plechu byla v rámci experimentu zjišťována před ohnutím vzorků na odstupňovaném ohýbacím přípravku pomocí digitálního tloušťkoměru Elcometr 456 na 16 ti místech u vybraných vzorků s magnetickým povrchem a pomocí tloušťkoměru Fischer Isoscope na 16 ti místech u vybraných vzorků s nemagnetickým povlakem. Měřená místa jsou zobrazena na obr.7.3.

Vzorky po ohybu na odstupňovaném ohýbacím přípravku jsou naděleny dle obr.7.4. a následně je zjišťována v označených místech tloušťka povlaku po ohybu – je zjišťováno, zda po ohybu dojde ke ztenčení povlaku. Tloušťku povlaku v daných místech po ohybu nelze měřit pomocí digitálních tloušťkoměrů – měřicí dotyk těchto



Obr.7.3. Místa měření tloušťky povlaku zobrazená na vzorku před ohybem

přístrojů je příliš velký a na ohnutém plechu nedosedne celým svým rozměrem na měřené místo – výsledky jsou tedy chybné. Z tohoto důvodu je zvolena metoda metalografického výbrusu. Výsledky tlouštěk povlaku v měřených místech před ohybem i po ohybu jsou zaneseny do tabulky.

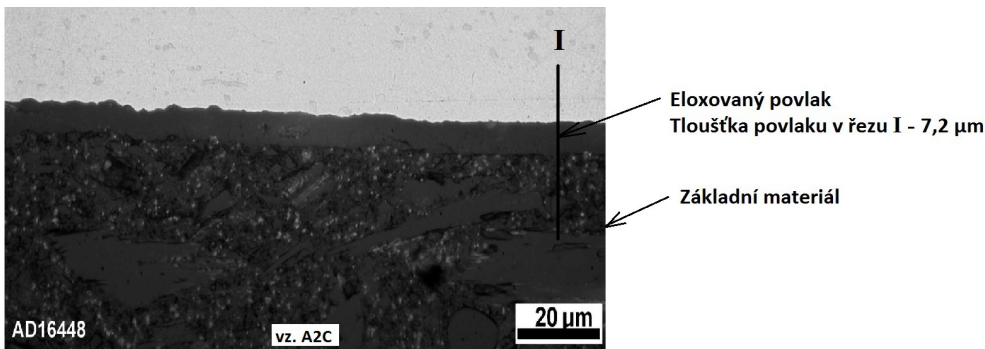


Obr.7.4. Místa pro metalografické měření tloušťky povlaku zobrazená na naděleném obdélníkovém vzorku po ohybu – dělen po ohybu

Dílčí závěr:

Hodnoty měření tlouštěk materiálu pomocí digitálních přístrojů a pomocí metalografického výbrusu jsou u vzorků nepodrobených operaci ohýbání prakticky shodné. Drobné odchylky jsou způsobeny vlivem nerovnoměrného nanesení a uchycení povrchové vrstvy na základním materiálu při operaci nanášení (metalizační nástřik, žárové nanášení), anebo vlivem nestability válcovacího procesu a nedodržení technologických válcovacích podmínek při dokončovací

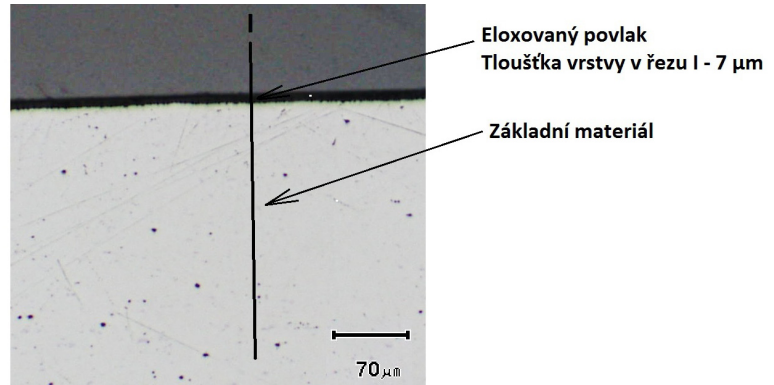
operaci povrchové vrstvy tenkých plechů s povrchovou vrstvou. Z hodnot vyplynula nerovnoměrnost nanesení Al povlaku na vzorcích před ohnutím a dále úbytek povrchové vrstvy po ohybu. Je nutné brát v potaz možné drobné odchylky v měření výsledků pomocí digitálních tloušťkoměrů a pomocí měření na metalografickém výbrusu.



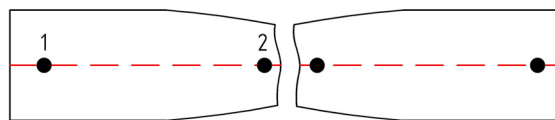
Obr.7.5. Metalografický výbrus – vrstvy před ohnutím – hliníkový vzorek – místo měření 5

7.3 SLEDOVÁNÍ ZMĚNY KONCENTRACE POVLAKU (POVRCHU) PO JEHO DEFORMACI

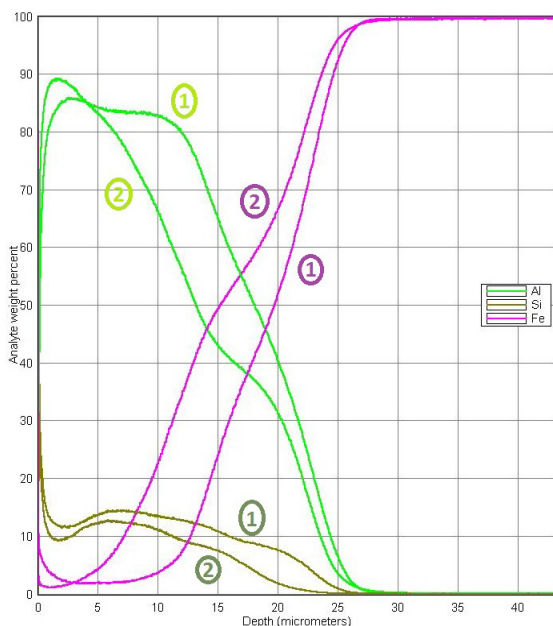
Chemická analýza je zjištěna metodou EDX na zařízení NORAN SIX/300 na elektronovém mikroskopu VEGA 5135 od firmy TESCAN. Pro testování chemické analýzy jsou na vzorku vybrána vždy 2 místa – místo neovlivněné plastickou deformací (1) a místo ovlivněné plastickou deformací (2) (viz obr.7.7.). Příklad je schopen vyhodnocovat pouze vodivé povrchy (materiály) - chemická analýza je tedy provedena pouze na vzorku B1P-originál (ocelový plech s povlakem hliníku – Al povlak otryskán) a na vzorku D1P.



Obr.7.6. Metalografický výbrus – vrstva po ohnutí – hliníkový vzorek – místo měření 8



Obr.7.7. Místa vyhodnocení chemické analýzy na testovaném vzorku po tahové zkoušce



parametry zkoušky jsou v souladu s ČSN EN 10002-1.

Dílčí závěr:

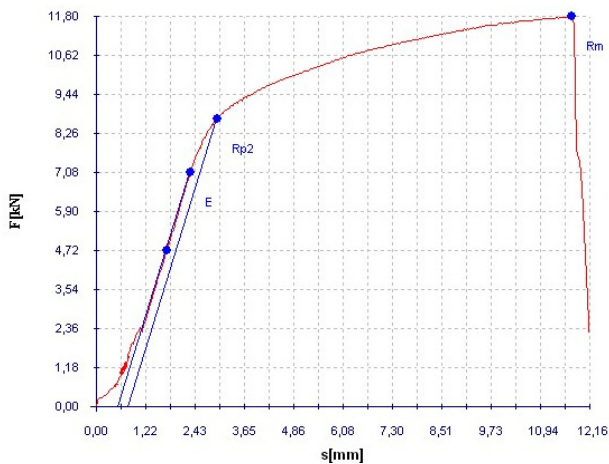
Ze srovnání křivek vyplývá úbytek množství prvků obsažených před deformací v povlaku v závislosti na intenzitě deformace. Úbytek těchto prvků může mít nepříznivý vliv na funkci povlaku po zpracování tohoto plechu.

Obr.7.8. Chemická analýza vzorku B1P-originál – srovnání křivek chemického složení v místě 1 a v místě 2

7.4 TVAŘITELNOST KOVOVÉHO ZÁKLADU A POVLAKU S VYUŽITÍM MECHANICKÝCH A TECHNOLOGICKÝCH ZKOUŠEK KE STANOVENÍ DEFORMACE POVLAKU NA KOVOVÉM ZÁKLADU

7.4.1 Tahová zkouška podle ČSN EN 10002-1

Rychlost pohybu příčnicku je 5 mm/min, napěťová rychlost pro ocel 5 MPa/s a pro hliník 2MPa/s, šířka ploché zkušební tyče byla $20 \pm 0,1$ mm a zbylé

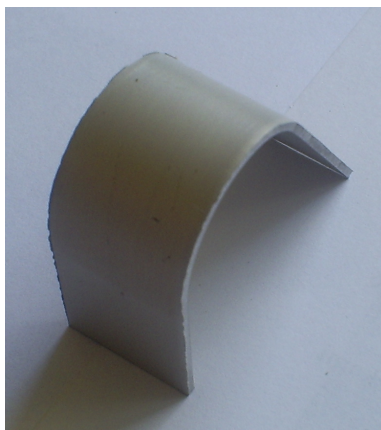


Obr.7.9. Záznam z vybraných tahových zkoušek – hliníkový vzorek

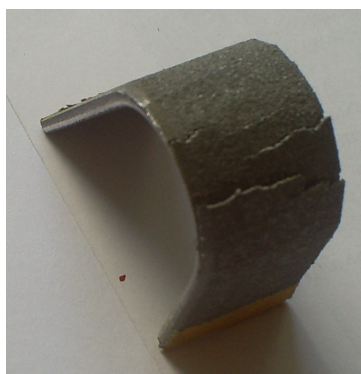
segmenty o navržených průměrech:

- 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 vorky za pomoci otáčivých kladek (obr.7.10.) až do minimálního poloměru válcového segmentu, na kterém dojde k porušení povlaku. Kladka simuluje ohyb, kdy nesmí dojít k poškození povlaku nebo napěchování povlaku z důvodu následného zkoumání míry porušení povlaku.



Obr.7.11. Hliníkový plech s eloxovaným povlakem po ohnutí – před eloxováním ošetřený plazmou



Obr.7.12. Ocelový plech s eloxovaným povlakem vytvořeným na žárově nastříkaném hliníku – ocelový základ ošetřený před nastříkaním plazmou

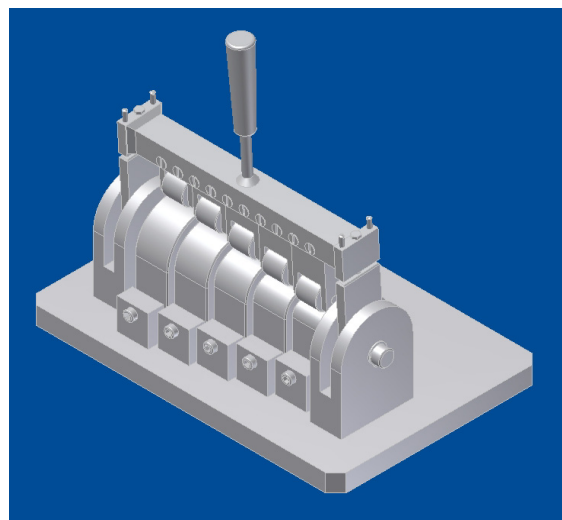
Dílčí závěr:

Výsledky tahové zkoušky jednotlivých vzorků zhruba odpovídají hodnotám z atestačního listu pro dané materiály.

7.4.2 Ohybová zkouška

Je vyvinut nový zkušební přípravek (viz obr.7.10.), na kterém je pomocí ohybu testována přilnavost a porušení eloxované vrstvy v systému ocel – Al – elox bez ošetření plazmovými tryskami (plazmová tužka) a taktéž po ošetření plazmovými tryskami. Přípravek je koncipován jako montážní jednotka

Stávající vyměnitelné odstupňované válcové trny jsou nahrazeny pevně ukotvenými válcovými



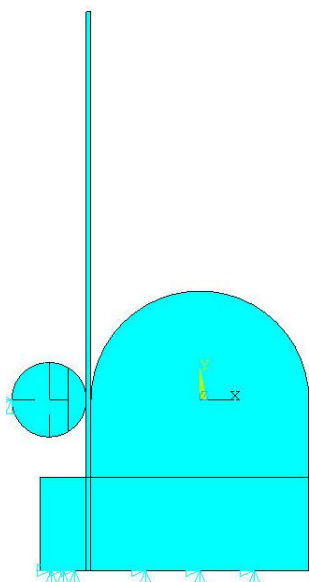
Obr.7.10. Model odstupňovaného ohýbacího přípravku s kladkami

Dílčí závěr:

Vzorky ošetřené před žárovým nástřikem hliníku plazmovou tryskou mají oproti neošetřeným vzorkům před žárovým nástřikem hliníku plazmovou tryskou dle provedených pokusů patrnou vyšší přilnavost povlaku. Jelikož byla při ošetření povrchu základního materiálu dodržena všechna fyzikální pravidla (časový interval mezi ošetřením plazmovou tryskou a žárovým nástřikem hliníku), je tedy možné usuzovat na příznivý vliv ošetření plazmovou tryskou na přilnavost následně nanášeného (vytvářeného) povlaku.

7.5 STATICKÁ ANALÝZA OHÝBÁNÍ ZKUŠEBNÍHO PLECHU NA PŘÍPRAVKU POMOCÍ KLADEK

Analýza byla provedena v MKP programu ANSYS. Cílem bylo stanovit rozložení přetvoření a napětí v ohýbaném plechu – zjistit, v kterých místech se vyskytují špičkové hodnoty. Celý proces ohýbání na přípravku slouží ke zkoušení odolnosti povlaku naneseného na zkušební vzorku.



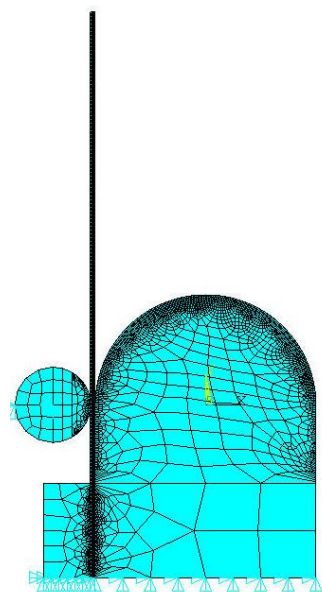
Obr.7.13. 2D model geometrie

Nejprve byl vytvořen model geometrie. Pro jednoduchost pouze dvourozměrný. Byly vytvořeny plochy kladky, plechu a ohýbacího trnu. Poté byla vytvořena síť elementů – celý povrch ploch byl rozdělen na jednotlivé prvky o konečné velikosti. Typ použitého elementu je PLANE 82, zvolená vlastnost prvku byla plain strain (status rovinné deformace-plech, který má větší šířku než tloušťku, $\epsilon_3=0$) pro 2D model tlustších těles. Obecná velikost elementů byla nastavena na 5 mm, ale v místech, kde dochází ke kontaktu všech těles, je síť jemnější – 0.3 mm. Na plochu představující plech byla předepsána velikost elementů 0.25 mm tak, aby vyšlo 6 elementů po tloušťce. Takto tomu je u finální verze, při provedení výpočtu byla vytvořena hrubší síť, s ohledem na kratší výpočetní čas.

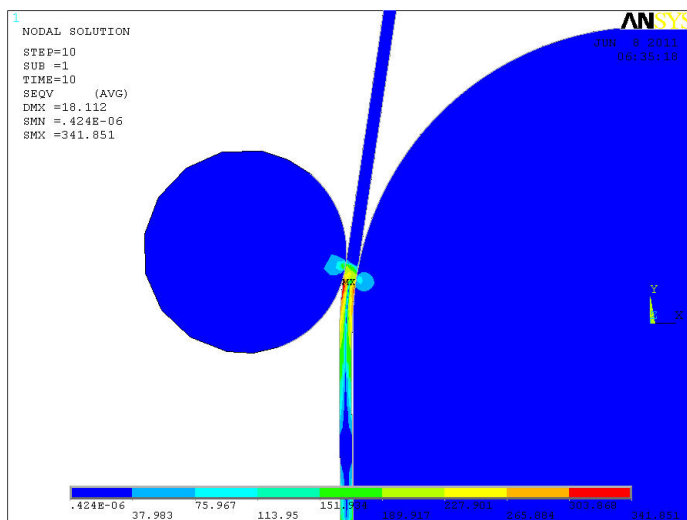
Výchozí úhel pootočení byl nastaven na 1° . Vlastní výpočet probíhal tak, že byl tento úhel přepočten na posuv v x – ovém a y – ovém směru a byla provedena statická analýza. Pak byl úhel zvětšen znovu o 1° , model zatížen opět spočtenými posuvy a zase provedena statická analýza. Takto se postup opakoval až do celkového úhlu 180° , pouze s tím rozdílem, že bylo potřeba během výpočtu několikrát zjemnit krok. Kolem úhlu 90° musel být nastaven přírůstek úhlu pootočení na poloviční – na půl stupně a pak ještě několikrát zjemněn až na nejmenší velikost $0,2^\circ$. Důvodem byla špatná konvergence nelineárního (bodového) výpočtu kontaktů.

Parametry úlohy:

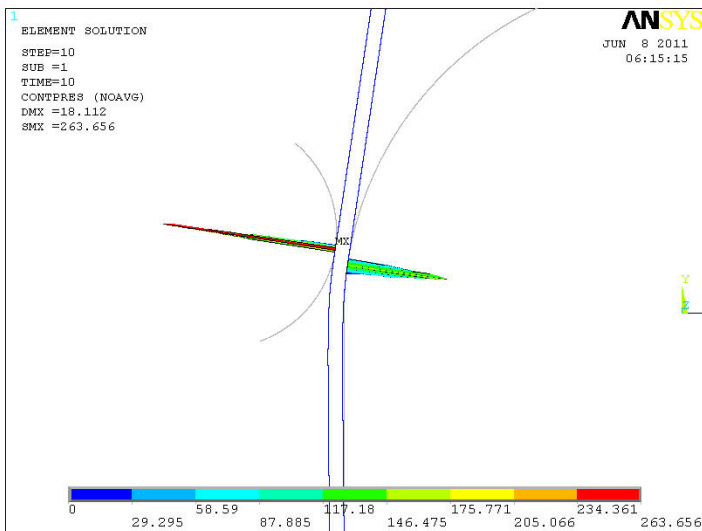
- Typy použitých elementů: PLANE 82, TARGET 169, CONTACT 172
 - Celkový počet elementů: 14 691
 - Počet uzlů: 40 491
 - Při výpočtu použita metoda velkých deformací.
- Doba celkového výpočtu cca 20 hodin.



Obr.7.14. Síť elementů



Obr.7.15. Detail rozložení redukovaného napětí podle Misesse – pootočení kladky o 10°



Obr.7.16. Vykreslení kontaktních tlaků na plechu – pootočení kladky o 10°

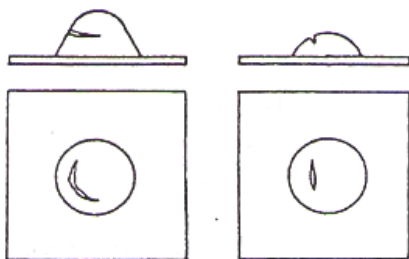
Dílčí závěr:

Cílem bylo zjistit rozložení deformací a napětí ve zkušebním vzorku – zjistit, ve kterých místech se vyskytují špičkové hodnoty.

Na základě zjištěných hodnot přetvoření v daných místech lze analyzovat celkové přetvoření (prodloužení povlaku) ve zvoleném úseku. Z této hodnoty lze následně konstatovat, zda dojde k poškození vrstvy povlaku v místě ohybu, nebo nikoliv.

7.6 ERICHSENOVA ZKOUŠKA HLUBOKOTAŽNOSTI

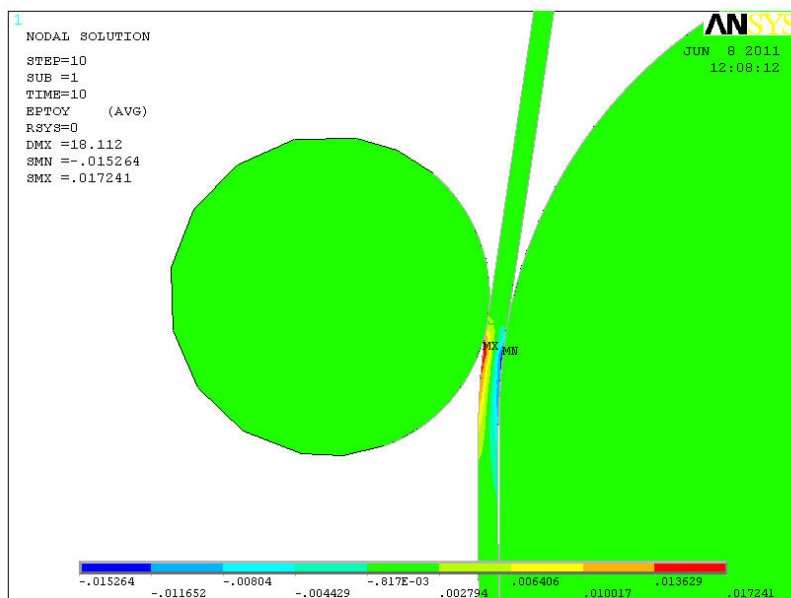
Vhodnost plechu k tažení se posuzuje podle hloubky prohloubení IE, vzhledu povrch a tvaru trhliny. Tvary trhlin jsou znázorněny na obr.7.18.



Obr.7.18. Tvar trhlin při Erichsenově zkoušce [30]

- typický tvar pro hlubokotažný plech
- nevhodný plech k hlubokému tažení

vykazují velmi dobrou schopnost k tažení. U vzorků neošetřených plazmovou tryskou dochází při hodnotě prohloubení IE=4 mm k poškození vrstvy (popraskání), zatímco u vzorků ošetřených před žárovým nástřikem plazmovou tryskou je patrná delší výdrž až do hodnoty prohloubení IE=5 mm. Je tedy patrné lehké zlepšení přilnavosti žárově nastříkané (nadopované) vrstvy, která byla aplikována po ošetření základního materiálu. Zrno v oblasti trhliny nebylo po zkoušce patrné na žádném vzorku - kvalitnější a stejnorodější materiál má jemnější zrno v trhlíně.



Obr.7.17. Celkové přetvoření v obvodovém směru - pootočení kladky o 10°

Dílčí závěr:

Největší hodnota prohloubení IE byla zjištěna u vzorků s označením C, kde byla zkouška provedena do hloubky prohloubení až 12,65 mm, aniž by došlo k porušení vrchlíku, a nejmenší u vzorků s označením A, kde byla naměřena hloubka prohloubení 6,35 mm. Ocelové plechy a nerezové plechy

7.7 GRUBBSŮV TEST

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.

Příklad výpočtu testované veličiny pro vybrané testované vzorky:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i = \frac{1}{5} \cdot (6,5 + 6,4 + 6,65 + 6,6 + 6,45) = 6,53 \text{ mm}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{5} (6,5 - 6,53)^2 + (6,4 - 6,53)^2 + (6,65 - 6,53)^2 + (6,6 - 6,53)^2 + (6,45 - 6,53)^2} = 0,093$$

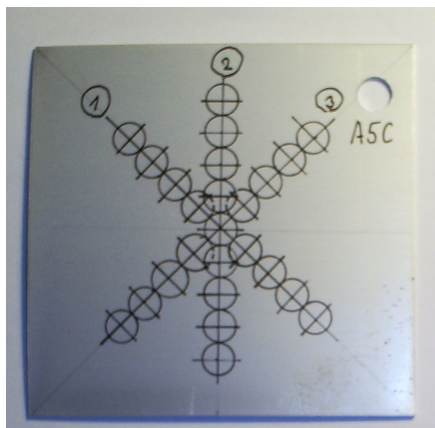
$$\tau_1 = \frac{\bar{x} - x_{(\min)}}{s} = \frac{6,53 - 6,4}{0,093} = 1,398 \leq 1,955 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

$$\tau_2 = \frac{\bar{x} - x_{(\max)}}{s} = \frac{6,53 - 6,65}{0,093} = 1,290 \leq 1,955 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Dílčí závěr:

Odchyly krajních naměřených hodnot (minima a maxima) v sérii měření nejsou důsledkem hrubé chyby při měření a jsou tedy všechny výsledky měření použitelné.

7.8 HODNOCENÍ INTENZITY DEFORMACE

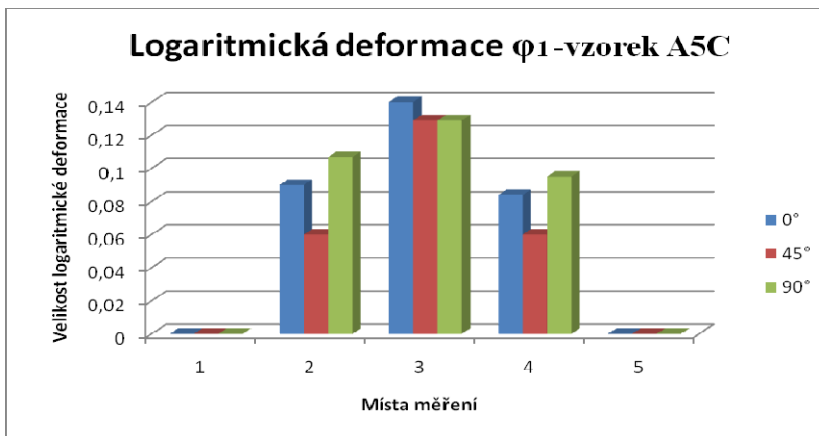


Obr.7.19. Kruhové síť nanesené na vzorcích – před vyboulením – směr 1 (0°), směr 2(45°) a směr 3(90°)

K hodnocení intenzity deformace byly zvoleny vzorky čtvercového průřezu. Na tyto vzorky byla nanesena měrná kruhová síť (kružnice byly narýsovány pomocí šablony lihovým fixem – viz obr.7.19.) a následně byly tyto vzorky podrobeny Erichsenově zkoušce hlubokotažnosti. Zkouška hlubokotažnosti nebyla z důvodu zachování celistvosti nanesené kruhové sítě vedena až k porušení (vytvoření trhliny) vyboulené části. Při zhotovení vyboulení dochází u testovaných vzorků k deformaci nanesené sítě kružnic, které se následně mění na elipsy. Z velikostí jejich os lze spočítat velikost logaritmické deformace φ_1 , φ_2 a φ_3 .

Je vypočtena logaritmická deformace φ_1 a výsledky jsou zaznamenány do tabulky. Obdobným způsobem je vyjádřena logaritmická deformace φ_2 a výsledky jsou zaznamenány do tabulky. Z důvodu zjištěné změny tloušťky povlaku bylo do výpočtu nutno zahrnout vzorec pro logaritmickou deformaci φ_3 .

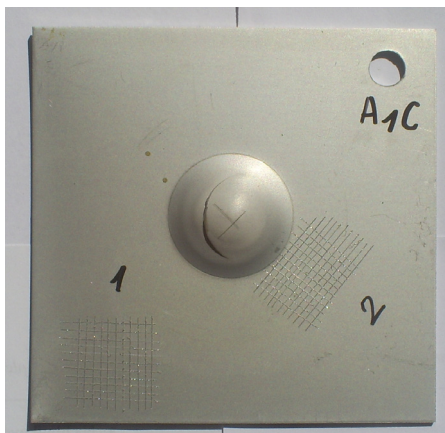
Výsledky φ_3 jsou zaznamenány také do tabulky. Všechny výsledky logaritmických deformací φ_1 , φ_2 , φ_3 pro jednotlivé testované vzorky jsou zobrazeny pomocí grafů.



Obr.7.20. Graf logaritmické deformace ϕ_1 – hliníkový plech s eloxovaným povlakem – vzorek ošetřen před eloxováním plazmovou tryskou

7.9 SLEDOVÁNÍ MEZNÍCH PODMÍNEK PŘILNAVOSTI POVLAKU (VLIV PLASTICKÉ DEFORMACE NA PŘILNAVOST POVLAKU)

Ke zjištění přilnavosti eloxované vrstvy na Al povlaku a přilnavosti vrstvy aluzink je použita zkouška mřížkovým řezem. Zkouška mřížkovým řezem je aplikována na sadě 20ti vzorků. Přilnavost je na vzorcích testována v místě neovlivněném plasticou deformací (místo 1) a v místě ovlivněném plasticou deformací od aplikace Erichsenovy zkoušky hlubokotažnosti (místo 2) – viz obr.7.21. U všech vzorků podrobených Erichsenově zkoušce hlubokotažnosti je zjištěna hodnota hloubení IE. Je aplikován mřížkový test s šířkou mřížky 20 mm.



Obr.7.21 . Ukázka umístění mřížkového řezu na hliníkovém vzorku s eloxovaným povlakem

Dílčí závěr:

U hliníkových vzorků s povlakem eloxu ošetřených plazmou před výrobou eloxovaného povlaku jsou dle stržené pásky čtverečky pevně ulpěny na podkladu a okraje řezů jsou ostré a hladké - výsledek je tedy ohodnocen stupněm 1. Hliníkové vzorky s povlakem eloxu neošetřené před výrobou eloxovaného povlaku plazmou jsou hodnoceny již hůře - dle stržené pásky čtverečky pevně lpí na podkladu, okraje řezů jsou v některých místech neostré a roztřepené (porušení max. 5% plochy). Tyto vzorky jsou tedy hodnoceny stupněm 2. U vzorků, kde je eloxovaný povrch vytvořen na žárově nastříkaném hliníku, je dle stržené pásky hodnocení složité - mřížka šla vzhledem k tvrdosti povrchu udělat velmi obtížně a následná stržená páska je velice nepřehledná – došlo k částečnému stržení povrchových částic. Povrch tedy není hodnocen. Vzorky s aluzinkovým povlakem určené pro porovnání vykazují dle stržené pásky zhruba stejné výsledky jako hliníkové vrstvy s povlakem eloxu (vzorky A1C atd.), které byly ošetřeny

plazmou - jsou tedy hodnoceny stupněm 1. Z dosažených výsledků vyplývá zlepšení přilnavosti eloxovaného povlaku na hliníkovém základu ošetřeném plazmou, jak na místech ovlivněných plasticou deformací, tak na místech neovlivněných (z výsledků stržených pásek není patrný rozdíl mezi místy neovlivněných plasticou deformací a místy ovlivněných plasticou deformací). V rámci experimentu byla snaha o optimalizaci vstupních parametrů, což se dle výsledků přilnavosti potvrdilo s kladným výsledkem.

8 ZÁVĚR

Dnešní doba klade především v automobilovém průmyslu velký důraz na tváření plechů s ochranou proti korozi a okujení a v neposlední řadě na estetičnost dané konstrukce při zachování funkčních vlastností dané vrstvy po technologii tváření. Disertační práce se zaměřila na řešení problematiky tvařitelnosti tenkých ocelových plechů s povrchovou úpravou eloxovaného hliníku. Na základě rešerše dostupné literatury bylo zjištěno, že úspěšná aplikace tvorby eloxované vrstvy, vytvořené na ocelovém plechu s žárově nebo jiným způsobem nanesenou vrstvou hliníku nebyla dosud v průmyslové výrobě zavedena a publikována. Disertační práce reaguje na tuto neuspokojivou situaci vytvořením tohoto mechanicky odolného a estetickou funkci plnícího systému ocel – hliník – elox využívané jako materiálové kombinace např. v automobilovém průmyslu (viz kap.10.1 DDP).

Systém ocel – hliník – elox je zvolen a testován z důvodu možného nahrazení nerezových plechů (snížení ceny a lepší tvařitelnost bez konečné tepelné úpravy). Jedná se o inovační proces. Splnění požadovaných mechanických vlastností systému ocel – hliník – elox zajišťuje ocelový plech. Eloxovaná vrstva je navíc oproti hliníku v atmosférickém prostředí stálá a plní důležitou estetickou funkci.

Stěžejní částí disertační práce je experimentální část, která je zaměřena na získání nových výsledků, na ověření již publikovaných výsledků a jejich souhrnné zhodnocení z hlediska konkrétního využití v praxi. Byl navržen a aplikován nový postup tvorby eloxované vrstvy na ocelovém plechu s povlakem hliníku a dále technologie na možnost zvýšení přilnavosti a soudržnosti eloxovaného povlaku. Model vlastností a využití systému ocel – hliník – elox je sestaven na základě experimentálních zkoušek, měření a výpočtů. Výsledkem experimentů je první model svého druhu zahrnující mnoho důležitých charakteristik systému ocel – hliník – elox. Provedené simulace statické analýzy ohýbání plechu potvrdily blízkost modelu a reálné technologie ohýbání plechu v systému ocel – hliník – elox na odstupňovaném ohýbacím přípravku, který byl vyvinut speciálně pro testování přilnavosti povlakovaných plechů. Vytvoření vrstvy eloxu a následné testování tohoto systému bylo úspěšné pouze u metalizačně nanášené vrstvy hliníku. Z tohoto hlediska by bylo vhodné v rámci navazujících výzkumných aktivit ověřit možnosti vytvoření modelu s eloxovanou vrstvou vytvořenou na žárově nanesené vrstvě hliníku – tato vrstva má lepší přilnavost k základnímu materiálu (vrstvě), dále má lepší povrchové vlastnosti a lepší soudržnost. Vzhledem k úspěšně vytvořené vrstvě eloxu na metalizačně vytvořeném hliníkovém základu se lze domnívat, že by zavedení zmíněného systému ocel – hliník – elox mělo své opodstatnění.

Předložená disertační práce je v první řadě příspěvkem pro efektivní tvorbu eloxovaného povlaku v systému ocel – hliník – elox na metalizačně vytvořené vrstvě hliníku a pro tvorbu metodických rámců dalších technologií a průmyslových procesů. Díky tomu mají výsledky práce odborný přesah a jsou využitelné v širokém spektru technických oborů. Disertační práce přináší kvalitní prostředek pro návrh a simulaci systémů nejrůznějších struktur s možností okamžitého vyhodnocení významných parametrů.

Hlavním přínosem práce pro praxi je možnost dalšího zvýšení efektivity tvorby eloxovaného povlaku a získané výsledky z experimentů lze využít jako podklad pro analýzu procesu tváření výlisků s povlakovanými plechy v systému ocel – hliník – elox.

Předložená disertační práce vyšla z teoretických i praktických poznatků získaných během řešení grantového projektu VUT FSI v Brně – BD 1393016 z r. 2009 a navázáním na tento projekt.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] AL-QURESHI, H.A. a A.M. ILKIU. Investigation of the Forming Limits in the Processes of Sheet Metal Stretching. In: *Proceedings of the 8th International Conference Sheet Metal 2000 1st ed. Briningham*. volume 1. Briningham: University of Central England, 2000, s. 405-412. ISBN 0 95276-643-4.
- [2] BAČA, Jozef, Jozef BÍLIK a Viktor TITTEL. *Technológia tvárnenia*. 1. vydání. Bratislava: Edícia vysokoškolských učebníc, 2010. ISBN 978-80-227-3242-0.
- [3] BÍLIK, Jozef, Marie BALÁŽOVÁ a Ludmila KRŠIAKOVÁ. Vlastnosti a tvárnitelnost plechov z ocele DP 450: Properties and formability of DP 450 steel sheets. In: *Kovárenství*. 28. vyd. Brno: Svaz kováren ČR, 2010, s. 45-48. ISSN 1213-9289.
- [4] ČADA, Radek. *Plošná tvařitelnost kovových materiálů*. Ostrava – Poruba: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 1998. ISBN 80-7078-557-8.
- [5] ČADA, Radek. *Tvařitelnost ocelových plechů*. Ostrava: REPRONIS, 2001. ISBN 80-86122-77-8.
- [6] ČECH, Jaroslav, Jiří PERNÍKÁŘ a Ladislav JANÍČEK. *Strojírenská metrologie 2*. Brno: VUT, 2002. ISBN 80-214-2252-1.
- [7] DAĐOUREK, Karel. *Vybrané technologie povrchových úprav*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-168-8.
- [8] DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: Plošné a objemové tváření 2*. Brno: CERM, 2007. ISBN 978-80-214-3425-7.
- [9] MILAN, Dvořák, Petr KÁBRT a Jan ŠANOVEC. Maziva a jejich experimentální ověření při tažení plechu. *Strojírenská výroba*. 1996, roč. 44, 5-6, s. 32. ISSN 0039-2456..
- [10] FABIÁN, Michal a Emil SPIŠÁK. *Navrhování a výroba s pomocí CA technologií: V CATIA V5*. Bratislava: ELFA, 2010. ISBN 978-80-85825-65-7.
- [11] FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. 1.vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1992. ISBN 80-214-0415-9.
- [12] HRUBÝ, Jaroslav. *Strojírenské tváření: Základy teorie tváření*. 2005. Dostupné z: <http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Stv/Prednesy.htm>
- [13] KADLECOVÁ, Marie. *Posouzení technologie vytváření povlaků Al₂O₃ na površích Al slitin*. Brno, 2009.
- [14] KOUTNÝ, Jiří. *Hliníkové materiály a možnosti jejich svařování: Hliníkové materiály a možnosti jejich svařování*. 2005. Dostupné z: www.svarbazar.cz
- [15] KÖRBER, Vladimír a Jan ŠANOVEC. Možnosti použití simulačního software pro úsporu materiálu v lisovnách: The possibilities of simulation software use for material saving in stamping shops. *Kovárenství*. 2010, roč. 38, s. 73-76. ISSN 1213-9289.
- [16] KRAUS, Vladimír. *Povrchy a jejich úpravy*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2000. ISBN 80-7082-568-1.
- [17] KREJČÍ, Vladimír. *Povrchová úprava kovů II*. Praha: Nakladatelství technické literatury.
- [18] KREIBICH, Viktor. *Teorie a technologie povrchových úprav*. Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 80-01-01472-X.
- [19] MARCINIAK, Z., J.L. DUNCAN a S.J. HU. *Mechanics of sheet metal forming*. Detroit: The Detroit Institute of Arts, 2001. ISBN ISBN 0-7506-5300-0.
- [20] NĚMEC, Milan, Suchánek JAN a Jan ŠANOVEC. *Základy technologie I*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN ISBN 8001035301.
- [21] PETRUŽELKA, Jiří. *Tvařitelnost kovových materiálů*. Ostrava: VŠB-Technická univerzita. ISBN 80-7078-635-3.
- [22] PETRUŽELKA, Jiří. *Analýza procesu tváření za tepla: Dynamický materiálový model*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. ISBN 80-248-0035-7.

- [23] PERNIKÁŘ, Jiří, Miroslav TYKAL a Josef VAČKÁŘ. *Jakost a metrologie*. 1. vydání. Brno. ISBN 80-214-1997-0.
- [24] PERNIKÁŘ, Jiří, Josef VAČKÁŘ a Anton HUMÁR. *Kvalitativní a kvantitativní hodnocení jakosti měřicích prostředků*. Brno. Grant fondu vědy FS č. FP 359568. Brno.
- [25] PETR, Lenfeld. *Metody tváření kovů a plastů. Hodnocení plechů s povlaky*. Liberec: TU Liberec, 2005. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/mtk/Plechyspovlaky.pdf
- [26] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. 1. vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2001. ISBN 80-7204-193-2.
- [27] ROZMÁNEK, Milan. *Eloxování* [online]. vyd.: Hradec Králové : IMPEA s.r.o., Hradec Králové, 2009, 2010 [cit. 2010-06-21]. Povrchová úprava. Dostupné z WWW: <www.povrchovauprava.cz>. ISSN 1801-707X.
- [28] SAMEK, Radko. *Analýza mezního stavu plastičnosti a technologické tvařitelnosti*. 1. vydání. Brno: Vojenská akademie v Brně, 1988. ISBN 2-128-63057-0.
- [29] SAMEK, Radko, Kamil PODANÝ a Eva ŠMEHLÍKOVÁ. Deformation behaviour of thin-walled tubes in tensile test. In: Bratislava: STU Bratislava, 2007. ISBN 978-80-227-2712-9.
- [30] SOBOTOVÁ, Lída a Emil SPIŠÁK. Vplyv valcovania na kvalitu hlbokotažných plechov: The Influence of Rolling on the Quality of Deep Drawn Sheets. In: *Kovárenství*. Brno: Svaz kováren Č.R., 2010. ISSN 1213-9289.
- [31] ŠANOVEC, Jan. Jak dále s použitím servolisů. *MM Průmyslové spektrum*. 2011, s. 80-82. ISSN 1212-2572.
- [32] SUCHÁNEK, Jan. Výroba pohledových dílů z polymerů vyztužených uhlíkovými. *MM Průmyslové spektrum*. 2010, s. 37-40. DOI: Kód článku: 101109. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/vyroba-pohledovych-dilu-z-polymeru-vyztuzenych-uhlikovymi-vlakny.html>
- [33] VDOLEČEK, František a KOLEKTIV. *Chyby a nejistoty v měření*. Brno: akademické nakladatelství CERM, 1994. ISBN 80-214-1427-8.
- [34] SPIŠÁK, Emil a Michal FABIÁN. *Strojárske technológie s CAx podporou Strojárske technológie*. Elfa, 2010. ISBN 978-80-80861-36-0.
- [35] TAYLOR, B. Metals Handbook – Mechanical testing. In: *American Society for Metals*. ISBN 0-87170-007-1.
- [36] VNOUČEK, Milan. Povrchové efekty při GDOES. In: *METAL*. 2002, s. 1-7. ISBN 978-80-254-1987-8. DOI: Hradec nad Moravicí.
- [37] VNOUČEK, Milan. *Hodnocení tenkých vrstev: nitridická vrstva substrátových systému*. Plzeň, 2008. Dizertační práce. ZČU v Plzni.
- [38] ČOS 999904. *ČESKÝ OBRANNÝ STANDARD: Nekovové anorganické povlaky pro součásti vojenské techniky*. Praha: Úřad pro obrannou standardizaci, katalogizaci a státní ověřování jakosti, 2005.
- [39] ČOS 999904. *ČESKÝ OBRANNÝ STANDARD: Kovové povlaky vylučované elektrolyticky a chemicky*. Praha: Úřad pro obrannou standardizaci, katalogizaci a státní ověřování jakosti, 2008.
- [40] ČOS 999914. *ČESKÝ OBRANNÝ STANDARD: Nekovové anorganické povlaky pro součásti vojenské techniky : 1.vydání*. Praha : Úřad pro obrannou standardizaci, katalogizaci a státní ověřování jakosti Praha, 2005. Dostupné z WWW: <www.army.cz/mo/oos>.
- [41] ČOS 999914. *ČESKÝ OBRANNÝ STANDARD: Nekovové anorganické povlaky pro součásti vojenské techniky*. Praha : Ministerstvo obrany, 2005.
- [42] ČSN EN ISO 1519. *Nátěrové hmoty – Zkouška ohybem(na válcovém trnu)*. Český normalizační institut, 2002.
- [43] ČSN EN 12373-1. *Hliník a slitiny hliníku - Anodická oxidace - Část 1: Metody pro specifikování dekorativních a ochranných anodických oxidových povlaků na hliníku*. 2002. Český normalizační institut.

- [44] ČSN EN 12373-3. *Hliník a slitiny hliníku - Anodická oxidace - Část 3: Stanovení tloušťky anodických oxidových povlaků - Nedestruktivní měření mikroskopem s děleným svazkem paprsků*. Český normalizační institut, 2003.
- [45] ČSN EN 12373-18. *Hliník a slitiny hliníku - Anodická oxidace - Část 18: Systém hodnocení bodové koroze - Grafická metoda*. Český normalizační institut, 2002.
- [46] ČSN EN 12373-19. *Hliník a slitiny hliníku - Anodická oxidace - Část 19: Systém hodnocení bodové koroze - Mřížková sčítací metoda*. Český normalizační institut, 2002.
- [47] ČSN EN ISO 10062. *Korozní zkoušky v umělé atmosféře při velmi nízkých koncentracích znečišťujících plynů*. Český normalizační institut, 2008.
- [48] ČSN EN ISO 9227. *Korozní zkoušky v umělých atmosférách - Zkoušky solnou mlhou*. Český normalizační institut, 2007.
- [49] ČSN ISO 7384. *Korozní zkoušky v umělé atmosféře. Všeobecné požadavky*. Český normalizační institut, 1994.
- [50] ČSN EN ISO 20482. *Kovové materiály – Plechy a pásy – Zkouška hloubením podle Erichsena*. Český normalizační institut, 2004.
- [51] ČSN P ISO/TS 15530-3. *Metody určování nejistoty měření : Část 3: Použití kalibrovaných součástí nebo etalonů*. Český normalizační institut, 2005.
- [52] (014109) ČSN P ENV 13005. *Pokyn pro vyjádření nejistoty měření*. Český normalizační institut, 2005.
- [53] ČSN ISO 10012-1 *Požadavky na zabezpečování jakosti měřicího zařízení – Část 1: Metrologický certifikační systém pro měřicí zařízení*. Český normalizační institut. 1993
- [54] ČSN EN ISO 1463. *Kovové a oxidové povlaky - Měření tloušťky povlaku -Mikroskopická metoda*. Český normalizační institut, 2005.
- [55] ČSN 01 0115. *Mezinárodní slovník základních a všeobecných termínů metrologii*. Praha: Český normalizační institut. 1996. ICS 01.040.17; 17.020. WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/mtk/Plechyspovlaky.pdf>.
- [56] MIL-STD-1504A. *MILITARY STANDARD : Abrasive blasting*. washington 25, D. C. : Department of defense- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS STANDARDS, 8 June 1989.
- [57] MII-HDBK-694A(MR. *MILITARY STANDARDIZATIONHANDBOOK : Aluminum and aluminum alloys*. WASHINGTON D.C. : Department of defense- american society for testing and materials standards, 1966.
- [58] MIL-DTL-83488D. *DETAIL SPECIFICATION : Coating, aluminum, high purity*. WASHINGTON D.C. : Department of defense - american society for testing and materials standards, 1999.
- [59] MIL-DTL-5541F. *DETAIL SPECIFICATION : Chemical conversion coatings on aluminum and aluminum alloys*. WASHINGTON D.C. : Department of defense - american society for testing and materials standards, 2006.
- [60] *Ekochem-ppu : ANODICKÁ OXIDACE HLINÍKU A JEHO SLITIN* [online]. 2004 [cit. 2008-10-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.ekochem-ppu.cz/elox.html>>.
- [61] *Elox Trutnov : Technologie eloxování hliníku a jeho slitin* [online]. 2006 [cit. 2008-10-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.elox.cz/technologie/>>.
- [62] *Knife : Eloxování hliníku* [online]. 2006 [cit. 2008-10-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.knife.cz/Knifecz/Technika/tabid/57/ctl/Details/mid/384/ItemID/53/Default.asp>>.
- [63] *Schüco : Povrchová úprava eloxováním* [online]. 2006 [cit. 2008-10-21]. Dostupný z WWW:<http://www.schueco.com/web/cz/home/produkty/povrchov~C3~A1_~C3~BAprava/eloxov~C3~A1n~C3~AD>.
- [64] *Chalmers : Anodic oxidation of aluminum studied by localized surface plasmon resonance spectroscopy and quartz crystal microbalance (QCM-D)* [online]. 2000 , 2008 [cit. 2008-10-21]. Dostupný z WWW: <<http://www.chalmers.se/ap/SV/utbildning/examensarbeten/lediga-examensarbeten/exjobb-kemisk-fysik/anodic-oxidation>>.

- [65] *Organicdivision : RECENT ADVANCEMENTS IN ANODIC OXIDATION:APPLICATIONS IN TOTAL SYNTHESIS* [online]. 2005 [cit. 2008-10-21]. Dostupný z WWW: <http://organicdivision.org/essays_2006/Lumb.pdf

10 VLASTNÍ PUBLIKACE A SPOLUAUTORSTVÍ

- [1] MAREČKOVÁ, Michaela, Martin HUŠEK a Milan DVOŘÁK. Výzkum tvařitelnosti tenkého plechu z upravených polotovarů. In: *FSI Junior konference. Prezentace vědeckovýzkumných prací doktorandů*. 1.vydání. Brno: VUT FSI v Brně, 2008, s. 111-117. ISBN 978-80-214-3565-0.
- [2] HUŠEK, Martin a Milan DVOŘÁK. Tažení ocelových plechů s povlakem Al spojených pájením. *Kovárenství*. 2008, roč. VIII, s. 87-90. ISSN 1213-9289.
- [3] HUŠEK, Martin a Milan DVOŘÁK. Test přilnavosti multifunkčního povlaku Al-Zn. In: *Technológia 2009*. Bratislava: STU v Bratislavě, 2009, s. 63-71. ISBN 978-80-227-3135-5.
- [4] HUŠEK, Martin a Milan DVOŘÁK. Experimentální ověření přilnavosti vybraného duplexního povlaku. In: *Stroje a nástroje pro plošné tváření 2009 : Sborník přednášek a prezentací*. Praha, 2009, s. 26-34. ISBN 978-80-254-4604-1.
- [5] HUŠEK, Josef, Martin HUŠEK a Milan DVOŘÁK. Soubor zařízení pro malosériovou výrobu dopravních značek. In: *Nové trendy ve zpracování plechu*. Praha: Česká společnost pro výzkum a zpracování plechu, 2009, s. 1-10. ISBN 978-80-254-5731-3.
- [6] HUŠEK, Martin a Milan DVOŘÁK. Zkouška přilnavosti multifunkčního povlaku na plechu pomocí odstupňovaného ohýbacího přípravku. *Strojírenská technologie*. 2010, XV, č. 2, s. 15-20. ISSN 1211-4162.
- [7] HUŠEK, Martin, Milan DVOŘÁK a Michaela CÍSAŘOVÁ. Výzkum přilnavosti povlaku na plechu při ohýbání. In: *FSI Junior konference*. Brno: FSI VUT v Brně, 2010, s. 261-269. ISBN 978-80-214-4116-3.
- [8] DVOŘÁK, Milan, Schwarzer EMIL a Hušek MARTIN. Nové metody zkoušení přilnavosti povlaku plechu ohýbáním. *Kovárenství*. 2010, X, č. 38, s. 81-84. ISSN 1213-9289.
- [9] HUŠEK, Martin, Milan DVOŘÁK. Analýza ohýbání ocelového plechu v ohýbacím přípravku pomocí kladek: Nové vysocepevné a hybridní materiály – Problémy při zpracování plechu. In: *Sborník přednášek a prezentací*. Praha, 2011. ISBN 978-80-87583-00-5.

11 CURRICULUM VITAE

Osobní údaje

- Jméno a příjmení: Martin Hušek
- Datum a místo narození: 30.10.1981, Brno
- Bydliště: Merhautova 196, 613 00 Brno
- Národnost: česká
- Email: martin.husek@email.cz

Vzdělání

- 2006÷2011 doktorský studijní program na ÚST FSI VUT v Brně, Odbor technologie tváření kovů a plastů
- 2002÷2006 inženýrské studium na ÚST FSI VUT v Brně, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Studium zakončeno státní zkouškou
- 2001÷2002 inženýrské studium na FS ČVUT v Praze

Pedagogická praxe

- 2007÷2011 výuka studentů VOŠ a SPŠ Žďár nad Sázavou, pracovní náplň:
 - 3D CAD systémy, 2D CAD systémy, PLM – produkt Lifecycle Management, strojírenská technologie, metrologie.
- 2006÷2011 výuka studentů FSI VUT v Brně, pracovní náplň:
 - Cvičení z předmětu výrobní technologie, technologie II

Odborná praxe

- 2007÷2011 učitel odborných předmětů, VOŠ a SPŠ Žďár nad Sázavou
- 2007 konstruktér, Žďárské strojírny a slévárny ŽĐAS a.s.
- 2006÷2007 konstruktér, Královopolská RIA

12 ABSTRACT

Thesis deals with the design of the technological process of anodic oxidation (creating elox coating) on aluminium film in the system steel-aluminium-elox, with the findings of characteristics of this system, comparing with the contemporary knowledge and practical utilization of this system in practice. My thesis in the theoretical part describes creating of anodic oxidation (elox coating) and the process of bending and stretching the sheet. Theoretical aspects of interaction among elox finish, process of bendings and process of stretching are implemented in the experimental part and they are supported by identified knowledge and results. The practical part is focused on improving adhesion, designing and constructing a multifunctional bending product for testing resistance of the finish applied on a tested product. Under the terms of determination distributing deformation and tension in bended coated plate, this plate is tested by statistic analysis with the help of the Finit Element Method (FEM) in the programme ANSYS. The experimental part compares discovered results of each experiment in the system steel – aluminium – elox with the results of aluminium plates with elox finish, stainless plates and steel plates with aluzinc.