

Optimalizace procesu vakuového tvarování pro zlepšení kvality galvanického pokovení plastového dílu z ABS

Diplomová práce

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojírenská technologie a materiály

Autor práce:

Bc. Aleš Pajr

Vedoucí práce:

Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie





Zadání diplomové práce

Optimalizace procesu vakuového tvarování pro zlepšení kvality galvanického pokovení plastového dílu z ABS

Jméno a příjmení: Bc. Aleš Pajr
Osobní číslo: S17000240
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie a materiály
Zadávající katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: 2019/2020

Zásady pro vypracování:

1. Zpracování literární rešerše z oblasti technologie vakuového tvarování termoplastů a galvanického pokovování plastových dílů.
2. Výběr vhodného dílu z produkce firmy Pajr s.r.o., popis technologie výroby a kvality galvanického pokovení.
3. Návrh optimalizace procesu a parametrů výroby vakuově tvarovaného dílu ve vztahu k procesu následného galvanického pokovení.
4. Analýza kvality povlakovaných dílů a zhodnocení odolnosti galvanického povlaku vlhkostně teplotní klimatickou zkouškou dle PV1200
5. Vyhodnocení výsledků, jejich diskuse a závěr.

Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

tabulky, grafy
cca 50 stran
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] Kanani, Nasser. *Electroplating: Basic Principles, Processes and Practice*. Oxford: Elsevier Advanced Technology, 2004. ISBN 978-1856174510.
- [2] Sebayang, Darwin, Hasan, Sulaiman Bin Haji. *Electroplating*. Rijeka: InTech, 2012. ISBN 978-953-51-0471-1.
- [3] Engelmann, Sven. *Advanced Thermoforming: Methods, Machines and Materials, Applications and Automation*. Hoboken: Wiley, 2012. ISBN 978-0-470-49920-7.
- [4] Ausperger, Aleš. *Technologie zpracování plastů*. Verze knihy: 14. Online: [Code Creator], 2015. ISBN 978-80-88058-72-4.
- [5] Koncernový předpis PV1200

Vedoucí práce:

Ing. Luboš Běhálek, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce:

31. října 2019

Předpokládaný termín odevzdání:

30. dubna 2021


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

3. června 2020

Bc. Aleš Pajr

Název diplomové práce:

Optimalizace procesu vakuového tvarování pro zlepšení kvality galvanického pokovení plastového dílu z ABS

Diploma thesis title:

Optimization of the process thermoforming to improve the quality of galvanic plating of the plastic part from ABS

Anotace

Předložená diplomová práce se zabývá optimalizací technologického procesu vakuového tvarování plastového dílu vyrobeného z materiálu ABS, za účelem zvýšení přilnavosti galvanického pokovení. Diplomová práce je rozdělena na dvě části – teoretickou a experimentální. V teoretické části jsou popsány principy vakuového tvarování a galvanického pokovování plastových dílů. Experimentální část popisuje způsob tvarování plastových dílů, technologii jeho galvanického pokovení, návrh optimalizace procesu vakuového tvarování a studii, zabývající se vnitřní napjatostí dílů a hodnocení kvality galvanického povlaku. Následně je uvedeno vyhodnocení provedené optimalizace a provedených analýz povrchu pod pokovením.

Klíčová slova

Tepelné tvarování, galvanické pokovování, vnitřní napětí

Annotation

The presented diploma thesis deals with the optimization of the technological process of thermoforming of a plastic part made of ABS material, in order to increase the adhesion of galvanic plating. The diploma thesis is divided into two parts - theoretical and experimental. The theoretical part describes the principles of thermoforming and galvanic plating of plastic parts. The experimental part describes the method of shaping plastic parts, the technology of its galvanic plating, the design of the optimization of the thermoforming process and the study dealing with the residual stress of parts and the evaluation of the quality of the galvanic coating. Subsequently, the evaluation of the performed optimization and performed analyzes of the surface under plating is presented.

Key Words

Thermoforming, galvanic plating, residual stress

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Luboši Běhálkovi, Ph.D za vzornou pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady v průběhu zpracování mé diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Petru Podzimkovi z firmy FUNCHEM s.r.o. a Ing. Zuzaně Andršové, Ph.D. za odbornou pomoc a cenné rady při zpracování experimentální části.

Rovněž děkuji celé mé rodině a manželce za maximální podporu a trpělivost po celou dobu mého vysokoškolského studia.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů	9
1 Úvod.....	10
2 Teoretická část	11
2.1 Tvarování plastů	11
2.1.1 Formátování polotovaru.....	13
2.1.2 Ohřev polotovaru	14
2.1.3 Předtvarování polotovaru.....	16
2.1.4 Proces tvarování.....	17
2.1.5 Chlazení výlisku	21
2.1.6 Odformování výlisku	22
2.1.7 Ořez výlisku.....	22
2.2. Galvanické pokovení plastových dílů	23
2.2.1 Galvanické lázně.....	24
2.2.2. Problematika vnitřního napětí v plastovém díle	25
2.2.3 Příprava dílu – navěšování na závěsy	26
2.2.4 Moření – leptání dílu.....	28
2.2.5 Aktivace	30
2.2.6 Urychlení vylučování chemického niklu	30
2.2.7 Chemické niklování	31
2.2.8 Imerzní mědění	32
2.2.9 Kyselé lesklé mědění	33
2.2.10 Pololesklé niklování.....	34
2.2.11 Lesklé niklování.....	35
2.2.12 Mikroporézní niklování	36
2.2.13 Chromování	37
2.2.14 Sušení dílu a sundání ze závěsu	38
3 Experimentální část.....	39
3.1 Charakteristika plastových dílů	39
3.2 Konstrukce tvarovací formy	41
3.3 Technologie tvarování výrobků první série.....	41
3.4 Galvanické pokovení výrobků první série.....	45
3.5 Hodnocení kvality a analýza příčin špatné přilnavosti galvanického povlaku k povrchu dílu.....	48

3.5.1 Klimatická zkouška.....	48
3.5.2 Měření tlouštěk vrstev galvanického povlaku	50
3.5.3 Analýza povrchu plastového dílu pod galvanickou vrstvou	54
3.5.4 Test přilnavosti galvanického povlaku	56
3.5.5 Analýza vnitřního napětí v plastových dílech.....	59
3.6 Technologie tvarování výrobků druhé série	62
3.7 Hodnocení vnitřní napjatosti dílů druhé (optimalizované) tvarovací série	66
3.8 Galvanické pokovení vzorků druhé tvarovací série	69
3.9 Hodnocení kvality pokovených dílů na základě optimalizace procesu vakuového tvarování	70
3.9.1 Test přilnavosti galvanického povlaku	70
3.9.2 Analýza povrchu plastového dílu pod galvanickou vrstvou	72
3.9.3 Měření tlouštěk vrstev galvanického povlaku	74
3.9.4 Klimatická zkouška.....	75
4 Diskuse a vyhodnocení výsledků	77
4.1 Vyhodnocení optimalizace technologického procesu za účelem snížení vnitřního napětí dílu	77
4.2 Vyhodnocení přilnavosti galvanického pokovení	80
4.3 Vyhodnocení analýzy povrchu plastového dílu pod galvanickým pokovením.....	82
4.4 Vyhodnocení výsledků měření vrstev pokovení	83
4.5 Vyhodnocení vlivu klimatických změn.....	84
5 Závěr	86
Použitá literatura	88

Seznam použitých zkratk a symbolů

T_f	- Teplota viskózního toku [$^{\circ}\text{C}$]
T_g	- Teplota skelného přechodu [$^{\circ}\text{C}$]
T_m	- Teplota tání [$^{\circ}\text{C}$]
ABS	- Akrylonitril – butadien – Styren
PMMA	- Poly – methyl – methyl- Akrylát
TPU	- Termoplastický – polyuretan
DIC	- Technologie diferenciálního interferenčního kontrastu
LOM	- Technologie snímání odraženého světla
SEM	- Rastrovací elektronová mikroskopie
SM	- Světelná mikroskopie

1 Úvod

Plasty se staly nenahraditelnými materiály, které nachází uplatnění téměř ve všech oblastech lidské činnosti. Při návrhu plastových dílů je nutné zhodnotit nejen jejich fyzikální, ale také vzhledové vlastnosti. Zejména u pohledových dílů, které nahrazují kovové součásti, vzrůstá poptávka po úpravě jejich povrchu povlakem, který je dostatečně přílnavý, odolává korozi a vyznačuje se velmi dobrou mechanickou pevností a ořezuvzdorností. V dnešním moderním světě se design podílí na celkové kvalitě dílu a vhodně zvolená povrchová úprava dodá výrobku potřebné vlastnosti a exkluzivitu, čímž získá výrobek vyšší přidanou hodnotu. Mezi povrchové úpravy plastu se řadí např. lakování, broušení, pískování, leptání, galvanické pokovení apod. Právě galvanické pokovení plastových dílů je způsob povrchové úpravy, který se uplatňuje především v automobilovém průmyslu a sanitární technice. Kvalita finálního povrchu plastového dílu je určena nejen složením plastu, ale i fyzikálními podmínkami při jeho zpracování, které při následných chemických procesech ovlivňují schopnost vytvořit na jeho povrchu vodivou vrstvičku jako předpoklad pro další operace galvanického pokovování nazývané rovněž jako chromování.

Diplomová práce, která je řešena ve spolupráci s firmou Pajr s.r.o., se zabývá vlivem technologie vakuového tvarování plastových dílů na kvalitu procesu galvanického pokovení. Hlavním cílem diplomové práce je úprava technologického procesu vakuového tvarování vybraných plastových dílů za účelem zvýšení přílnavosti následného galvanického povlaku a úspěšného absolvování předepsaných zkoušek dle výkresové dokumentace.

Teoretická rešeršní část diplomové práce se zabývá problematikou vakuového tvarování plastových dílů a technologií galvanického pokovení. Jsou zde uvedeny základní informace o jednotlivých procesech a používaných materiálech. Experimentální část se zabývá popisem současného nevyhovujícího stavu při výrobě plastových dílů technologií tepelného vakuového tvarování z hlediska kvality jejich galvanického pokovení, návrhem úprav a optimalizací výrobního procesu. Kvalita galvanicky ošetřených dílů je sledována na optických měřicích zařízeních a povrchová úprava je hodnocena environmentální cyklickou vlhkostně-teplotní zkouškou dle standardů koncernu VW PV1200.

2 Teoretická část

Jak již bylo uvedeno v úvodu diplomové práce, teoretická část se vzhledem k řešené problematice zabývá literární rešerší z oblasti technologie tepelného tvarování plastů, viz kap. 2.1 a jejich povrchovou úpravou technologií galvanického pokovení, viz kap. 2.2.

2.1 Tvarování plastů

Plasty lze zpracovávat různými technologiemi. Nejrozšířenější technologie pro zpracování plastů je technologie vstřikování. Tento výrobní proces umožňuje vyrábět tvarově složité díly s vysokou přesností a rozměrovou stálostí. Mezi další technologie patří proces vyfukování, který se využívá k výrobě uzavřených nádob s malou tloušťkou stěny (např. palivových nádrží nebo barelů na vodu). Pro konstrukčně jednodušší díly je vhodná technologie tepelného tvarování plastů, kde je tvarovací síla vyvozena mechanicky nebo pneumaticky. [1] Technologie se nejčastěji používá k výrobě kelímků, obalů nebo přepravek a uplatnění nachází v automobilovém, zdravotnickém i potravinářském průmyslu.

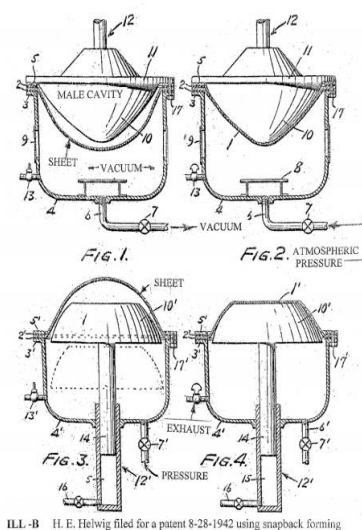
Nejrozšířenější metodou technologie tepelného tvarování je vakuové tvarování, kde je dosaženo požadovaného tvaru výlisku pomocí ohřevu polotovaru a podtlaku. Zpracovávat lze pouze termoplasty, jako např. ABS, PMMA, TPU, atd. [1] Pro tuto technologii se používá tvarovací forma, která může být vyrobena ze dřeva, pryskyřice, hliníku nebo z oceli. V sériové nebo hromadné výrobě se používají nejčastěji hliníkové formy. [2]

Velkou výhodou oproti technologii vstřikování je nízká cena formy a potřebných komponentů (např. těsnících gumiček, upínací desky atd). Díly vyrobené technologií tvarování mohou mít dezénovaný, lakovaný, matný nebo lesklý povrch, popřípadě povrch s imitací dřeva atd. To vše závisí na použitém polotovaru – desce. Vyrobené díly mají rozdílnou tloušťku stěny a v místech formy, kde je vyšší tah materiálu, dochází ke ztenčování jejich tloušťky. [2] U tenkých materiálů ($t \leq 0,5$ mm) se po vytvarování dílu odpad odstříhne. Střih je součástí tvarovacího procesu a není potřeba dalšího zařízení (stroje). Materiály, které mají $t \geq 0,5$ mm, se musejí po vytvarování oříznout. Ořez se provádí mimo tvarovací lis, na jiném pracovišti. V sériové výrobě je ořez prováděn většinou na CNC frézkách. Cena základních tvarovacích lisů se pohybuje v řádech

desetitisíců korun, stoupá dle složitosti konstrukce a variability stroje. Cena takových strojů je již v řádech milionů korun. Mezi nejznámější výrobce patří GEISS [3] a Formech. [4]

Hlavními výhodami technologie tvarování jsou nízké náklady na výrobu formy, které jsou konstrukčně jednodušší, nízké tvarovací tlaky s možností vyrábět tenkostěnné díly, např. od tloušťky 0,05 mm. K nevýhodám patří pomalý pracovní cyklus, nízká přesnost vyrobených dílů a možnost vyrábět pouze konstrukčně jednodušší díly s nutností odstranění technologického odpadu v dalších operacích. [5]

K této kapitole je vhodné doplnit, že za zakladatele procesu tvarování plastů je považován E. L. Helwig, který roku 1938 ve svém první patentu upozornil na metodu tváření plastů s použitím horké kapaliny a proměnným tlakem, kterou následně roku 1942 zdokonalil a k tváření začal používat podtlak vzduchu. Princip tohoto technologického postupu se v následujících letech nezměnil a je využíván dodnes. [6] Největší rozmach technologie nastal po druhé světové válce, kdy v roce 1952 byl představen na 5. výstavě plastů v Philadelphii první sériově vyráběný vakuový tvarovací lis. [6]



Obr. 2.1: Patent E.L:Helwig z roku 1942 [6]

Výrobní proces technologie tepelného tvarování spočívá v ohřevu polotovaru a jeho následném vytvarování za pomoci tepla a tlaku. Ohřev polotovaru může být prováděn mimo i vně tvarovací lis. [1] U složitějších konstrukčních dílů nastává po ohřevu materiálu na předepsanou teplotu fáze předtvarování polotovaru. Předtvarování může být vyvozeno buď mechanicky nebo pneumaticky. Další fází je vlastní vytvarování plastu. Ohřátá a předtvarovaná deska se např. pomocí podtlaku vytvaruje dle tvaru tvarovací

formy. Materiál je pomocí podtlaku (tzv. vakua) přisán ke stěnám formy a vznikne tak předepsaný tvar a podoba výlisku. Po vytvarování je nutné výlisk ochladit. Jedná se o poslední operaci výrobního procesu. Chlazení výlisku je prováděno buď pomocí temperované formy nebo externě pomocí ventilátorů, které jsou umístěny nad výliskem. Výlisk je ochlazován dokud jeho teplota neklesne na předepsanou teplotu. Teploty ohřevu a chlazení jsou pro každý materiál specifické. Po ochlazení výlisku je tvarování ukončeno a výlisk je nutné vyjmout z formy. Vyjmutí výlisku z formy (odformování) je prováděno buď ručně (platí pro poloautomatické stroje) nebo strojně. Během strojního odformování je mezi výlisk a formu přiveden stlačený vzduch. Tím dochází k lepšímu odsátí výlisku z formy. U plně automatických strojů následuje z výlisku vystřížení dílu. Stříh je proveden pomocí horní části formy (razníku), která je umístěna na beranu (horním pístu) lisu. Stříh je prováděn pouze u materiálů, kde je tloušťka menší než 0,5 mm. U poloautomatických a automatických lisů (s ručním nebo strojním zakládáním materiálu do pracovního prostoru) je operace ořezu a ostřížení přebytečného materiálu (odpadu) prováděna na jiných výrobních zařízeních. [2]

2.1.1 Formátování polotovaru

Formátování (přířez) desek se používá pro zvýšení produktivity výroby, snížení přebytečného odpadu nebo pro vakuové tvarování menších dílů. Polotovar, který je dodáván buď jako deska (o tloušťce 0,5 – 10 mm) nebo jako fólie (o tloušťce materiálu 0,05 – 0,5 mm), lze ihned zpracovat nebo tzv. naformátovat na menší rozměry pro tvarování menších výlisků. To platí pro desky určené pro poloautomatické tvarovací lisy s ručním zakládáním. Přířez polotovaru se provádí buď stříhem nebo řezáním. Řez desky je prováděn pilami, např. pásovou nebo ruční kotoučovou pilou. Nevýhodou řezání desek jsou vzniklé špony v místě řezu. Nutné je proto desky před vložením do lisu očistit a zbavit je veškerých nečistot. Řezání je využíváno pro desky o tloušťce větší než 6 mm. Ke stříhu materiálu se používají tabulové nebo pákové nůžky (viz obr. 2.2). Při stříhu nevznikají žádné špony, ani jiný odpadní (přebytečný) materiál. Stříh je využíván pro větší série a pro desky s tloušťkou do 6 mm.



Obr. 2.2: Nůžky pro řezání desek: tabulové (vlevo), pákové (vpravo)

2.1.2 Ohřev polotovaru

Ohřev polotovaru je zásadní částí výrobního procesu tvarování plastů, kde se vymezuje tvarovatelnost použitého polotovaru a určuje se výsledná kvalita dílu. Ohřevem je ovlivněna rovnoměrnost tloušťky stěny vylisku (výrobku), deformační schopnost materiálu, kopírování povrchu (dezénu) formy na vylisku a smrštění materiálu po vytvarování. [7]

Základním úkolem ohřevu je dosažení rychlého a rovnoměrného prohřátí materiálu na teplotu, při níž se materiál nachází v termodynamickém stavu umožňující jeho dobrou tvarovatelnost. Tvarovací teploty u amorfních plastů se nacházejí mezi teplotou skelného přechodu (T_g) a teplotou viskozního toku (T_f). Pro semikrystalické plasty je to v oblasti těsně pod teplotou tání (T_m), viz tab. 2.1 [7]

Tab. 2.1: Přehled doporučených teplot pro tvarování vybraných termoplastů [7]

Druh materiálu	Rozsah teplot [°C]
ABS	130-180
PMMA	150-195
TPU	130-170
PP	130-165

Teploty ohřevu závisí nejen na tvarovaném polotovaru, ale také na jeho tloušťce, dále na konstrukci dílu a formy, výsledné požadované kvalitě povrchu výlisku nebo na zvolené technologii tvarování. Při zvýšené teplotě polotovaru dochází k lepšímu tvarování, kopírování reliéfu formy a použít lze nižších varovacích tlaků. Nevýhodou vyšší teploty ohřevu je zvýšená lesklost výlisku (vada se vyskytuje u matných polotovarů, kde je požadován matný povrch výlisku) a také se zvyšuje nebezpečí jeho protahování ve směru působení gravitační síly. Tento jev je důležitý pro tvarování silnostěnných polotovarů. Materiál pro tvarování může být vícevrstvý a nebo kompozitní struktury. Zde je nutné zohlednit rozdílnou teplotní roztažnost i vodivost v jednotlivých vrstvách materiálu a zabránit jejich delaminaci. U polotovarů s mikroporézní strukturou dochází při tvarování k nebezpečí spojování vnitřních dutinek a negativnímu ovlivnění kvality výrobku. Mikroporézní struktura je tvořena fyzikálními nebo chemickými nadouvadly.[7]

Kromě teploty je důležité, aby ohřev polotovaru probíhal rovnoměrně v ploše i v jeho tloušťce. Rovnoměrnost ohřevu závisí především na použitém topném systému a tloušťce polotovaru. Dnešní moderní stroje s topnými systémy se rozdělují do několika zón se samostatným nastavením teplot. Tvarovací vakuové lisy mají ohřev polotovaru proveden z obou dvou stran (horní a spodní ohřev). Pro materiály s vyšší tloušťkou stěny je vhodnější použít oboustranný ohřev z důvodu rovnoměrného ohřevu v celé tloušťce desky. U materiálu s nižší tloušťkou stěny (do 3 mm) jednostranný ohřev postačí. [7]

K ohřevu polotovaru je využíváno více druhů topných panelů, trubic nebo vinutí. Topné trubice a panely označované jako „Quartz“ jsou vhodné především pro horní ohřev polotovaru, avšak jsou velmi křehké. K dosažení ohřevu polotovaru v krátkém čase se využívají indukční panely, které jsou výhodné také z hlediska ekonomie výroby.[7]

Ohřev polotovaru může být prováděn také externě na jiných výrobních zařízeních a posléze je polotovar pomocí manipulátorů vložen do tvarovacího lisu. Tento typ ohřevu bývá nejčastěji prováděn u silnostěnných desek. Doba ohřevu může trvat i několik minut. Ohřev tenkých fólií je kontinuální a velice rychlý. Doba ohřevu bývá v řádech sekund. To je dáno malou tloušťkou materiálu. [7]

2.1.3 Předtvarování polotovaru

Fáze předtvarování polotovaru je velice rychlá část výrobního procesu, avšak je jednou z nejdůležitějších jeho operací. Po předtvarování polotovaru dochází k jeho tvarování. Předtvarováním dostává ohřátý materiál přibližnou podobu vylisku, ale nesmí dojít k jeho zchladnutí na teplotu nižší, než je teplota tvarování daného materiálu. Předtvarování může být vyvoláno pneumaticky stlačeným vzduchem nebo mechanicky pomocí tvárníku, který je umístěn na horním pístu vakuového lisu. Může být pozitivní nebo negativní. Způsob předtvarování je závislý na druhu tvarování, tvaru formy a na tvarovaném materiálu. [8]

Pozitivní předtvarování se využívá pro tvarování velkých a vysokých vylisků, kde by docházelo k velkému tahu a k velkému vnitřnímu napětí v materiálu. Pozitivní předtvarování využívá přivedeného stlačeného vzduchu do uzavřeného pracovního prostoru lisu mezi formu a ohřátý materiál. Vlivem přetlaku v pracovním prostoru dochází k „vyboulení“ ohřátého materiálu a k jeho předtvarování do podoby „polokoule“. Množství přivedeného stlačeného vzduchu je řízeno programem, kde uživatel zadává čas, po který je stlačený vzduch přiveden. Čím je doba a množství stlačeného vzduchu větší, tím je „polokoule“ vyšší. Výhodou tohoto typu předtvarování je snížení vnitřního napětí v materiálu a výrazné zrovnomnění tloušťky stěn vylisku. Nevýhodou je obtížné určení množství a doby přivedeného vzduchu. Při větším předtvarování hrozí ve vylisku vznik staženin a znehodnocení dílu. [8]

Negativní předtvarování se využívá pro negativní tvarování hlubokotažených vylisků, kde by docházelo k velkému tahu materiálu a k velkému vnitřnímu napětí. Je závislé na tvaru formy a může být provedeno mechanicky nebo pneumaticky. Mechanické předtvarování je vyvoláno tvárníkem, který je umístěn na horním pístu stroje. Tvárník svým tvarem odpovídá tvaru formy. Důležitým faktorem je hloubka posuvu tvárníku a doba zpoždění posuvu tvárníku z horní do spodní úvratě. Pneumatické předtvarování je vyvoláno tlakem stlačeného vzduchu, který působí na ohřátý materiál v uzavřeném prostoru a dochází tak k jeho předtvarování. Tlak přivedeného vzduchu závisí na velikosti a hloubce formy a stlačený vzduch musí vyplnit celý objem uzavřené formy. Tlak stlačeného vzduchu se pohybuje v rozmezí 0,1 – 0,2 MPa. [9] Pneumatické předtvarování se používá u dílů, kde je forma na mnoha místech „zavřená“ a ohřátý materiál by se do těchto míst jinak nedostal. Výhoda oproti negativnímu mechanickému předtvarování je, že dochází k lepšímu předtvarování, ke snížení vnitřního napětí

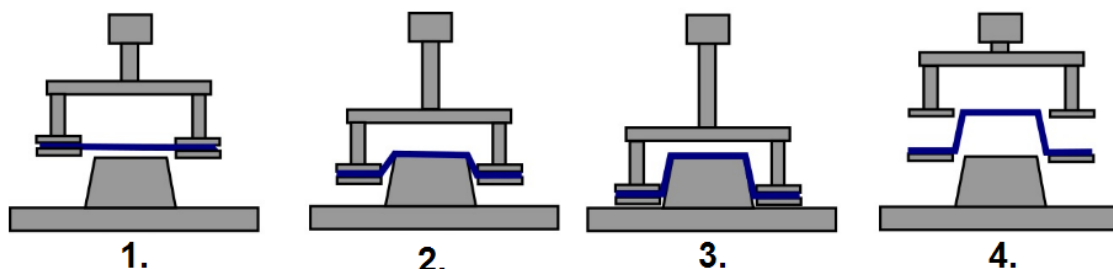
v materiálu a k zrovnoměrnění tloušťky stěn ve výlisku. Nevýhodou je obtížnost určit velikost tlaku přivedeného vzduchu, a navíc každý tvarovací lis nedisponuje tímto typem technologie předtvarování.[8]

2.1.4 Proces tvarování

Tvarování je nejdůležitější částí výrobního procesu, kde z ohřátého a předtvarovaného polotovaru vznikne finální výlisek. Dle složitosti výrobku a použité výrobní technologie jsou tvarovací síly vyvozovány mechanicky, pneumaticky pomocí podtlaku (vakua), přetlaku nebo jejich vzájemnou kombinací a na materiál/výlisek působí po celou dobu tvarování včetně fáze chlazení, aby nedocházelo k trvalým deformacím výlisku. Samotný způsob tvarování se rozděluje do několika metod, které závisí na typu předtvarování, na druhu tvarovacích sil a na způsobu tvarování. Základním rozdělením je pozitivní a negativní tvarování. Oba dva druhy se dále dělí na mechanické a pneumatické.

Pozitivní mechanické tvarování

Základním typem je tvarování mechanické, kde celý proces probíhá ve dvoudílných formách složených z tvárníku a tvárnice. Tato technologie umožňuje dosažení velmi vysokých tvarovacích tlaků, které jsou největší ze všech způsobů tvarování. Technologie je vhodná pro silnostěnné výrobky malých hloubek, kde základní materiál má tloušťku větší než 5 mm. Tvarovací síly nejsou vyvozeny pneumaticky, ale mechanickou silou pomocí tvárníku. Princip mechanického tvarování spočívá v ohřevu polotovaru, jeho vložení do dvoudílné formy (složené z tvárníku a tvárnice) a následném stlačení materiálu (viz obr. 2.3). [9]



Obr. 2.3: Ukázka principu pozitivního mechanického tvarování [9]

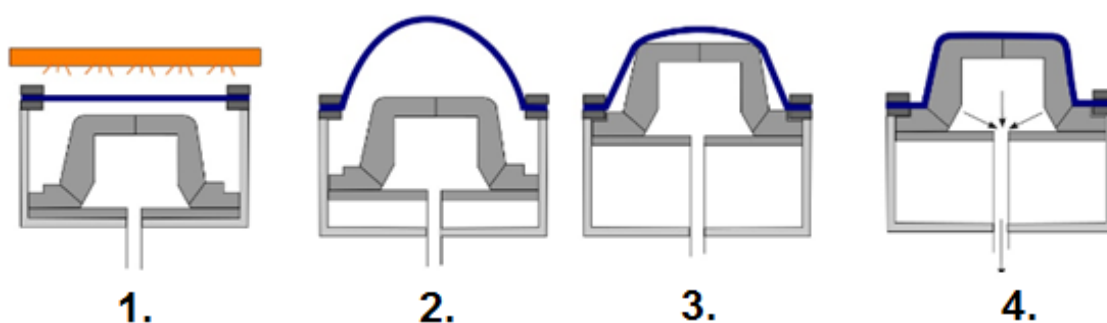
Výhodou tohoto způsobu tvarování jsou velmi dobré vzhledové vlastnosti dílů, materiál má vysokou schopnost kopírovat povrch formy, který může být leštěný, dezénovaný nebo také s písmeny a popisky. Nevýhodou mechanického tvarování je značné ztenčování stěn

ve výlisku a pomalá tvarovací rychlost. Technologie je vhodná např. k tvarování střech nákladních vozidel apod. [9]

Pneumatické pozitivní tvarování

Základním typem pozitivního pneumatického tvarování materiálu je podtlakové pneumatické tvarování. Jedná se o technicky a ekonomicky nejjednodušší a nejrozšířenější způsob pneumatického tvarování. Tvarovací síly jsou zde vyvozeny pneumaticky a to pomocí podtlaku – vakua. Pozitivní tvarování je vhodné pro celou „škálu“ materiálů o různých tloušťkách a barev. Tloušťky tvarovaných materiálů se pohybují od 1,5 do 5 mm. Výrobky vyráběné tímto druhem tvarování lze najít v automobilovém (různé kryty, lišty, střešní boxy) a potravinářském (kelímky, vaničky) průmyslu. [2]

Tvarování nastává po fázi předtvarování nebo po fázi ohřevu (pokud nedojde k předtvarování materiálu). Forma, která je upevněna na pracovním stole tvarovacího lisu, se přesune ze spodní do horní (pracovní) úvratě a dojde tím k místnímu styku ohřátého materiálu s formou. Po uplynutí předepsaného času zpoždění vakua dojde k přisátí ohřátého materiálu k povrchu formy a to pomocí odvzdušňovacích kanálek, které jsou navrtány ve formě. Pomocí odvzdušňovacích kanálek je odsán přebytečný vzduch, který byl doposud mezi formou a předtvarovaným materiálem. Materiál ihned po přisátí začne kopírovat povrch formy a vznikne požadovaný tvar výlisku (viz obr. 2.4). [10]



Obr. 2.4: Ukázka principu pozitivního pneumatického tvarování s pneumatickým předtvarováním [11]

Výhodou tohoto způsobu jsou velké rychlosti tvarování, rovnoměrnější tloušťka stěny ve výlisku a vnitřní povrch dílu, který dokonale kopíruje povrch formy. Mezi nevýhody patří povrchová nestálost tvaru výlisku a vznik velkých rádiusů v jeho hranách. [2]

Pneumatické negativní tvarování

Negativní pneumatické tvarování patří do skupiny podtlakového tvarování a je typickým způsobem pneumatického tvarování materiálu. Tvarovací síly jsou vyvozeny pneumaticky (pomocí podtlaku – vakua), mechanicky (pomocí předtvarování – tvárníkem) nebo kombinovaně. Materiál může být mechanicky předtvarován a to pomocí tvárníku (viz kapitola 2.1.3). Negativní tvarování je vhodné pro díly, kde je kladen velký důraz na kvalitu vnějšího povrchu a pro hlubokotažené díly. Tloušťky tvarovaných materiálů se pohybují od 1,5 do 5 mm. [2]

Princip negativního tvarování je totožný s pozitivním, avšak materiál není tvarován směrem vzhůru, ale do hloubky, po fázi předtvarování pomocí tvárníku, kdy je materiál vtažen do dutiny formy, respektive do 75 % její hloubky. [10] K přisátí ohřátého materiálu k povrchu formy dojde pomocí odvodušňovacích kanálků. Pomocí těchto kanálků je odsán přebytečný vzduch, který byl doposud mezi formou a předtvarovaným materiálem (viz obr. 2.5).



Obr. 2.5: Ukázka principu negativního podtlakového tvarování bez mechanického předtvarování [11]

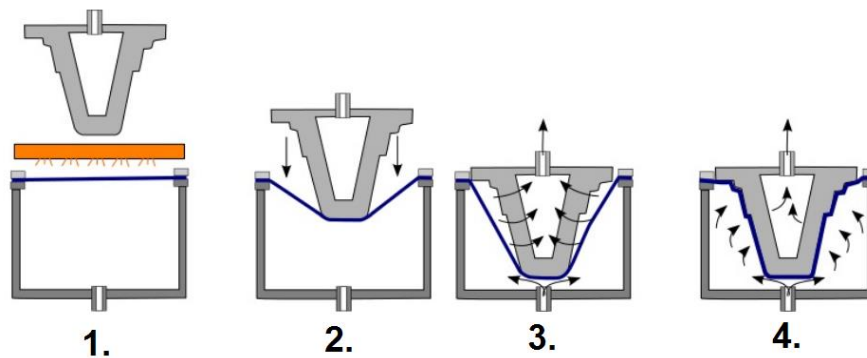
Výhody technologie negativního tvarování jsou podobné jako u pozitivního tvarování polotovaru na tvárník (formu). Tvarování je vhodné pro díly s poměrem hloubka/základní plocha $\leq 1,5$ a díl s dobrou kvalitou vnějšího. Nevýhodou je ztenčování stěn na bočních stranách výlisku při větší hloubce tahu. [10]

Přetlakové tvarování

Do skupiny přetlakového tvarování, podobně jako u podtlakového, patří pozitivní a negativní způsob tvarování. Tvarovací síla je vyvozena pouze pneumaticky. Tlak stlačeného vzduchu je mnohem větší než u podtlakového tvarování, konkrétně 1 – 2 MPa. [9] Vzhledem k vyšším pracovním tlakům je tento způsob tvarování vhodný pro materiály s velkou tloušťkou stěny (≥ 10 mm). [12] Typickými výrobky jsou kufry na nářadí a boxy.

Pozitivní přetlakové tvarování

Oproti pozitivnímu podtlakovému tvarování je tvarovací cyklus zcela odlišný. Tvarování nastává po fázi ohřevu polotovaru. Forma je oproti jiným technologiím umístěna na horním pístu, nikoliv na pracovním stole lisu. Forma se přesune z horní do spodní (pracovní) úvratě a dojde tím k vtlačení formy do zahřátého materiálu, která neprodyšně dosedne na rám z druhé strany. Po uplynutí předepsaného času zpoždění vakua, dojde k přisátí ohřátého materiálu k povrchu formy. Zároveň je z pracovního prostoru lisu přiveden přetlak stlačeného vzduchu (viz obr. 2.6). Pomocí přetlaku je materiál dotvarován na tvarovací formu a ihned po přisátí začne kopírovat povrch formy a vznikne požadovaný výlisek. [12]

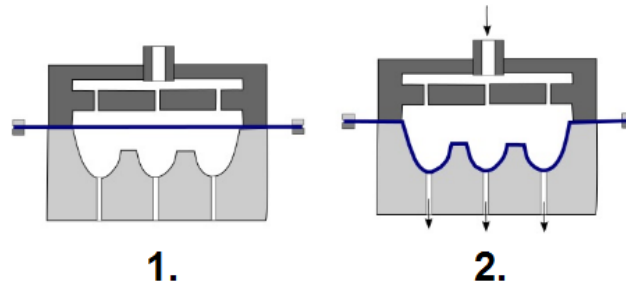


Obr. 2.6: Ukázka principu pozitivního přetlakového tvarování [11]

Technologie je výhodná pro díly s poměrem hloubka/základní plocha $\leq 0,4$ a vnitřní povrch výlisku dokonale kopíruje povrch formy. Nevýhodou forem je jejich složitost a náročnost. Pro pozitivní přetlakové tvarování jsou nutné vysoké tvarovací tlaky. [12]

Negativní přetlakové tvarování

U přetlakového negativního tvarování je tvarovací síla vyvozena nejen podtlakem, ale hlavně přetlakem stlačeného vzduchu, který působí na ohřátý materiál. Tvarovací cyklus je totožný s negativním podtlakovým tvarováním. Po ohřátí polotovaru na příslušnou teplotu dojde k přesunu horního pístu z horní do spodní úvratě. Na pístu je umístěn speciální tvárník, který utěsní tvarovací prostor nad ohřátým materiálem a po uplynutí předepsaného času dojde zároveň k podtlaku i přetlaku.[14] Podtlak nastane mezi materiálem a formou, přetlak mezi tvárníkem a materiálem (viz obr. 2.7). Technologie je vhodná pro díly s poměrem hloubka/základní plocha ≤ 1 a vnější povrch výlisku dokonale kopíruje povrch formy. Nejčastěji se technologie používá pro silnostěnné materiály. [12]



Obr. 2.7: Ukázka principu negativního přetlakového tvarování [11]

2.1.5 Chlazení výlisku

Další fází tvarovacího cyklu je chlazení výlisku ve formě. Jedná se o důležitou část technologického procesu, kdy výlisek přechází z oblasti tvarovacích teplot do oblasti ztuhnutí. První odvod tepla je zajištěn pomocí cirkulace teplonosného média v temperačních kanálech formy (nejčastěji vodou). Druhý typ odvodu tepla z výlisku je pomocí externích ventilátorů, které na výlisek působí studeným vzduchem a tím jej ochlazují. Chlazení výlisku může probíhat také pomocí vodné mlhy. [13] Jedná se o intenzivnější způsob chlazení a snížení teploty výlisku, avšak hrozí zde riziko vzniku povrchových vad na výlisku (např. vlhkostní šmouhy).

Temperační kanály nebývají ve formách, ale nacházejí se v upínacích deskách stroje, na kterých jsou jednotlivé formy upnuty. Odvod tepla z materiálu je realizován jeho přestupem do formy, upínacích desek a teplonosného média. Významným parametrem chlazení je teplota cirkulujícího média. S ohledem na maximální efektivitu chlazení a produktivitu výroby je teplota teplonosného média volena co nejnižší. Není vhodné používat teploty nižší než 5 °C, neboť hrozí nebezpečí rosení tvarovacích forem, které zapříčiňuje povrchové vady na výlisku (např. vlhkostní šmouhy). Význam problematiky chlazení roste s tloušťkou stěny výlisku a také s počtem vyráběných kusů. Pro kusovou výrobu budou tvarovací formy vyráběné např. ze dřeva nebo pryskyřice a pro sériovou a hromadnou výrobu ze slitin hliníku. Slitiny hliníku mají lepší tepelnou vodivost než dřevo nebo pryskyřice. [13]

Chlazení pomocí ventilátorů se používá v kusové a někdy také v sériové výrobě. Časový rozestup mezi vytvarováním a spuštěním chlazení je velice důležitý. Pro silnostěnné a špatně tvarovatelné materiály je vhodnější prodloužit prodlevu chlazení, aby mohlo dojít k lepšímu dotvarování výlisku a ke snížení vnitřního napětí v materiálu.

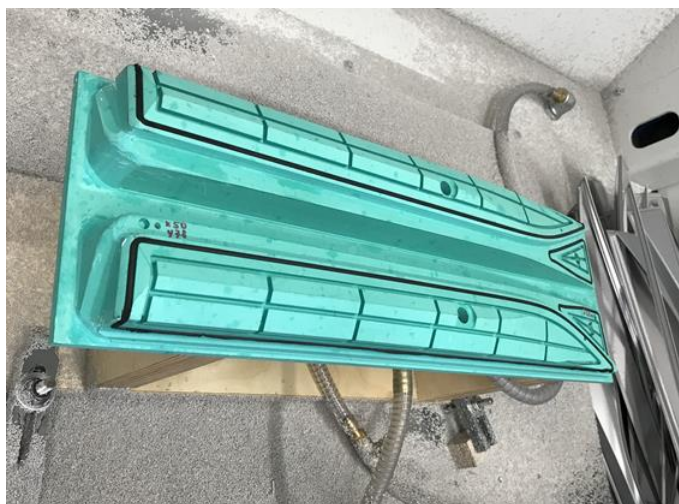
2.1.6 Odformování vylisku

Fáze odformování je poslední částí výrobního procesu tvarování, která je velice rychlá (netrvá ani 1s). Tato fáze bývá provedena strojně nebo ručně (platí pro poloautomatické stroje s ručním zakládáním materiálu). Odformování vylisku se provádí po ukončení chlazení a působení vakua (podtlaku). Pro snazší sejmutí vylisku z formy se mezi vylisek a tvarovací formu přivede menší množství stlačeného vzduchu. Pomocí tlaku stlačeného vzduchu dojde k „odfouknutí“ vylisku z povrchu formy. Forma se posléze přesune z horní do spodní (základní) úvratě. Čas odformování (tzn. doba přivedení tlaku vzduchu) se pohybuje od 0,1 do 0,5 s. [14] Při velkém času odformování může dojít k deformaci vylisku a k následnému znehodnocení dílu. K velkým deformacím dochází v uzavřených místech formy. Ruční odformování se provádí u poloautomatických tvarovacích lisů, kde se celý tvarovací proces řídí ručně a u tvarově jednoduchých forem, kde nevznikají žádná uzavřená místa. [14] Odformování je prováděno ručními nástroji, jako jsou např. paličky, nůžky atd.

2.1.7 Ořez vylisku

Ořezem tvarových vylisků dochází k odstranění přebytečného odpadu a vyříznutí požadovaného dílu. Ořez probíhá na jiných pracovištích a jiných výrobních strojích. Nejčastěji je prováděn na 3- a 5-osých frézkách nebo pomocí angulárních robotů. Pro plně automatické stroje, určené k tvarování tenkých materiálů (do 0,5 mm), je výrobní cyklus zakončen stříhem, kde dojde k vystřížení výrobku z vylisku. [13]

Ořez nebo odstřížení odpadu z vylisku je prováděno mimo tvarovací lis na strojích k tomu určených, jako jsou např. pákové nůžky, frézky, pily, roboty atd. Tvarově jednoduché vylisky se na strojích upínají pomocí sad upínek. Nevýhodou je snížená kvalita řezu. Pro tvarově složitější vylisky se používají tzv. frézovací přípravky, které dokonale kopírují tvar vylisku. Upnutí vylisku na přípravku je řešeno pomocí podtlaku. Frézovací přípravky jsou vybaveny přívodem vakua, drážkami pro rovnoměrné přísátí, gumičkou a popřípadě upínkami pro upnutí přebytečného odpadu (viz obr. 2.8). Přípravky jsou vyráběné z materiálů, které mají nízké mechanické vlastnosti, jako je např. dřevo, různé typy pryskyřice atd.



Obr. 2.8: Ukázka frézovacího přípravku s drážkami pro odvod vakua

Pro plně automatické stroje následuje operace vystřížení dílu z výlisku. Stříh je proveden pomocí horní části formy (razníku), která je umístěna na beranu (horním pístu) lisu. Operace stříh je prováděna pouze u materiálů, kde je tloušťka menší než 0,5 mm. [14]

2.2. Galvanické pokovení plastových dílů

Jedná se o povrchovou úpravu plastových dílů pro jejich estetické hodnoty a zvýšení chemické odolnosti. Galvanické pokovování je v dnešní době rozšířené v mnoha odvětvích průmyslu, jako je automobilový, letecký, zdravotnický a metalografický. Galvanické povlaky plastových dílů jsou rozdělovány dle užitných vlastností na funkční (technické) a dekorativní. Výhodou technických povlaků a jejich hlavním kritériem je technická funkčnost (tvrdost, houževnatost, nízká opotřebitelnost a vysoká korozní odolnost). Naproti tomu prioritou dekorativních povlaků jsou vzhledové vlastnosti vyloučeného povlaku (lesk, mat, satén a barevný odstín). Dalšími důležitými faktory a vlastnostmi povlaků jsou korozní odolnost a nízká opotřebitelnost. Dekorativní povlaky chromu mají obvykle tloušťku 0,2 - 0,5 μm . [15]

Historie technologie galvanického pokovení spadá až do druhé poloviny 19. stol., kdy se v letech 1848 – 1849 podařilo Junotovi de Bussyemu pochromovat kovový díl. Chemické složení prvních elektrolytů se výrazně lišilo od dnešních a při současných znalostech se může chemické složení zdát víc než raritní a zvláštní. Roku 1856 Anton Geuther poprvé vyloučil povlaky chromu z vodných roztoků kyseliny chromové. Technologii si roku 1920 nechal patentovat Dr. Fink. [16]

Přestože od podání prvního patentu na technologii galvanického pokovení uplynulo sto let, mechanismus vylučování chromu není zcela objasněn a není vyloučeno, že při sériové výrobě nebude docházet ke vzniku nesprávně pochromovaných dílů. Základní složkou pro galvanické pokovení je oxid chromový, který se ve vodě rozpouští na kyselinu chromovou. Chromované anionty nezůstávají v roztoku v této jednoduché formě a částečně přecházejí v polychromany. Z těchto roztoků není technologicky možné přímo vyredukovat kovový chrom a k jeho vyloučení dochází až po přidání určitého typu látky – katalyzátoru. Katalyzátory umožní a urychlí průběh vylučování chromu. Jejich volba se ukázala být zásadním momentem k dosažení vysoké kvality a ekonomické výhodnosti funkčního chromování. [16]

Po roce 2024, v souladu s nařízením EU číslo 2017/C 241/02, již nebude možné používat oxid chromový. [17] Z tohoto důvodu je snahou hledat nové technologické možnosti galvanického pokovení na bázi třímocného chromu (musí být nutná pasivace po galvanickém pokovení). Mezi trendy, které jsou ve zkušební výrobě, patří např. proces leptání plastu pomocí manganistanu draselného.



Obr. 2.9: Ukázka galvanicky pokovených plastových dílů [18]

2.2.1 Galvanické lázně

Galvanické pokovování se provádí v galvanických lázních, které mají přesně stanovené složení. Dle způsobu využití dílu a požadavků na jeho pochromovanou vrstvu se dělí na lázně pro dekorativní chromování, pro speciální chromování a pro funkční chromování. Nosnou a základní složkou galvanických lázní a procesu chromování je oxid chromový. U funkčního chromování se koncentrace oxidu chromového pohybuje v rozmezí 200 – 300 g/l. Optimální koncentrace je 250 g/l, neboť při této koncentraci je nejvyšší katodový proudový výtěžek. Snaha snížit výnos šestivalentního chromu do odpadních

vod a pohybovat se v koncentracích oxidu chromového v rozmezí 150–200 g/l si vynutila nové typy katalyzátorů, které však v provozní praxi neměly úspěch. [16]

Důležitou částí galvanické lázně jsou **katalyzátory**. Jejich správná volba a chemické složení výrazně ovlivňuje proces chromování a provoz lázně z ekonomického hlediska. Základním katalyzátorem jsou sírany, které se do lázně přidávají jako kyselina sírová. Mimo sírany mají katalytický vliv také fluoridy nebo soli, které obsahují fluorboritanové nebo fluorokřemičitanové anionty. Přítomnost těchto látek zvýší katodický proudový výtěžek, ale také výrazně zvýší agresivitu elektrolytu vůči základnímu materiálu. Dochází ke zvýšenému rozpouštění železa do chromovací lázně a tím postupně k jejímu znehodnocování. Navíc nárůstem znečištění lázně balastními kovy dochází ke zvyšování svorkového napětí a tím zvýšené spotřebě elektrické energie. [19] Nejnovějšími typy katalyzátorů jsou v současnosti organické sekundární katalyzátory. Jedná se o alkylsulfonované kyseliny a jejich deriváty. Používají se v kombinaci se základním katalytickým účinkem síranů. Jejich aplikací došlo k výraznému posunu v technologii funkčního chromování. [19]

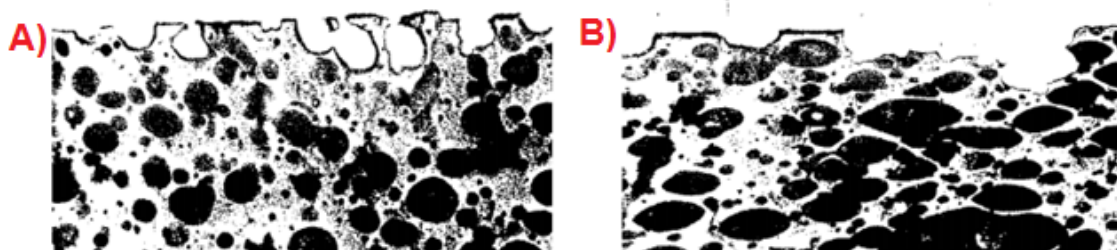
Pro docílení odpovídající (konstantní) kvality galvanického povlaku, je nutné dodržovat předepsanou koncentraci galvanických lázní. S různými organickými přísadami, jedná se např. o leskutvorné, vyrovnávací přísady, nosiče lesku, smáčedla apod. Při procesu galvanického pokovování dochází k jejich chemické nebo elektrochemické spotřebě. Z toho důvodu musí být odpovídajícím způsobem doplňovány. Samotné doplňování může probíhat buď automaticky dávkovacími přístroji nebo ručně. [20]

Plastový díl, který je vyroben tvarováním nebo vstřikováním (popř. jinými výrobními technologiemi, např. lisováním, reakčním vstřikováním atd.), prochází během technologie galvanického pokovení čtrnácti výrobními operacemi, při nichž dosahuje jeho povrchu požadovaných tlouštěk vrstev povlaku požadované estetické hodnoty – lesku. [20]

2.2.2. Problematika vnitřního napětí v plastovém díle

Důležitou vlastností, která vzniká již při výrobě samotného plastového dílu, je jeho vnitřní napětí. Vliv vnitřního napětí má zásadní vliv na přilnavost výsledné galvanické kovové vrstvy povlaku. Snížení vnitřního napětí je závislé na mnoha faktorech výrobní technologie – hlavně na teplotě tvarování, popř. vstřikování. Při vysoké teplotě taveniny

vstřikování je napětí sice menší, ale materiál má tendenci degradovat a pro technologii pokovování je to nevyhovující. Pro odstranění vnitřního napětí z vstřikovaných výrobků se používá metoda teplotní expozice (žihání), jejímž cílem je rovnovážný stav struktury a vnitřní relaxace molekul. Relaxace se provádí ohřátím dílu na nižší teplotu než je jeho zpracovatelská teplota po předepsanou dobu a samovolným ochlazením pomocí vzduchu. Čas a teplota ohřátí dílu je pro každý materiál odlišná. [21] Pro měření vnitřního napětí se používá tzv. metoda ponořování plastového dílu do tenzoaktivního prostředí (např. pro ABS do kyseliny octové).



Obr. 2.10: Ukázka dílu po moření bez vnitřního napětí (A) a s vnitřním napětím (B) [22]

Odstranění vnitřního napětí z dílu je důležité pro fázi galvanického pokovování, která je nazývána mořením (viz kap. 2.2.4), při němž je na povrchu plastu vytvořena síť kavern. a nerovností umožňující dobrou adhezi kovového povlaku k plomeru. V případě ABS dochází k vymoření částic butadienu. Na obr. 2.10. jsou v příčném řezu černými kuličkami znázorněny butadienové části polymeru v matrici ABS. Po moření vzniknou na povrchu dílu kaverny. Pokud materiál obsahuje vnitřní napětí, pak se po vymoření butadienových částí polymeru síť kavernu nevytvoří a povrch není dobře připraven pro zakotvení galvanické vrstvy – kaverny jsou zborcené (viz obr. 2.10 B).

2.2.3 Příprava dílu – navěšování na závěsy

Výrobek před galvanickým pokovením musí být zcela zbaven nečistot a musí být bez vnějších či vnitřních vad. Vyrobený díl je nutné před první operací – mořením, umístit na pomocné manipulátory, tzv. závěsy, které se používají pro tzv. závěsové pokovování. Další technologií pokovování je bubnové. Pro bubnové pokovování se používají tzv. bubny. Technologie závěsového pokovování se využívá především pro dekorativní pokovení plastových dílů. Jedná se o rozšířenou výrobní technologii, největší objem výroby spadá především do automobilového průmyslu. [23]

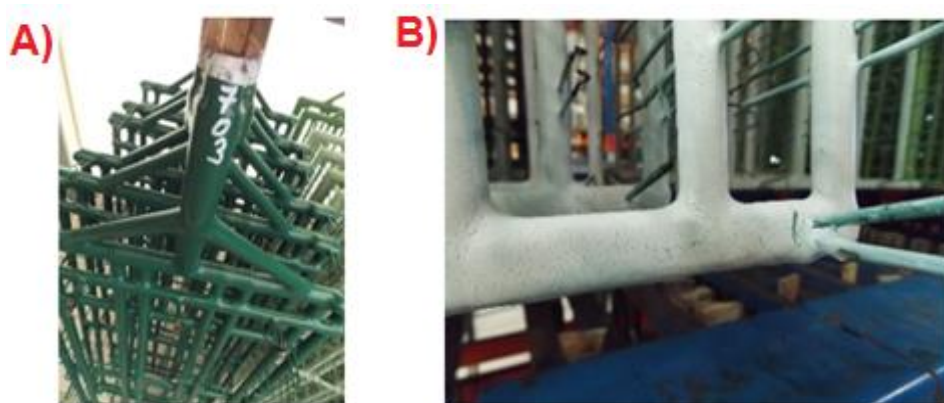


Obr. 2.11: Nepochromované díly upevněné na závěsu

Samotný závěs je připevněn pomocí držáku (tzv. žabek) k tyči, ta je na každé straně zakončena segmentem s vybráním, které využívá dopravník při převozu tyče po výrobní lince. Dopravník vkládá tyče do lůžek, do kterých je přiveden elektrický proud z usměrňovače napětí. Pomocí usměrňovače dochází k elektrolyze neboli k vlastnímu pokovení. Závěsy jsou vyráběny v mnoha variantách a jsou specifické pro každý díl. Vyráběny jsou z mosazi a měly by být pájeny pomocí stříbra kvůli dobré vodivosti elektrické energie. Z ekonomického hlediska jsou, ale vyráběny většinou kombinací šroubování a svařování. Dle typu a tvaru pokovovaného výrobku jsou pod izolační hmotou opatřené závrtem, do kterého jsou pájené nebo tepané další mosazné úchyty a čelisti pro snazší a správné uchycení výrobků před pokovením. Jako pomocné závěsy jsou vyráběny závěsy pro zavěšení stínících lišt, které mají za účel zamezit vzniku napálených míst v krajních pozicích tyčí, protože holé mosazné závěsy by se v lince mohly rozpadnout a mohlo by dojít k rozpouštění závěsů v kyselinách. [23]

K ochraně závěsů se používá polymer se sytě zeleným pigmentem, který má při pokovení dvě funkce: funkci estetickou, kdy pomocí zelené barvy je možno na závěsech rozpoznat již špatně pokovené výrobky a praktickou. Pomocí různých odstínů zeleného pigmentu lze odhadovat přibližné stáří a míru užívání (opotrebování) závěsu (viz obr. 2.11).

Technologické závěsy pro galvanické pokovení lze dělit na závěsy pro jednodruhové díly a na závěsy kombinační (viz obr. 2.12). Pojmem jednodruhové díly se rozumí výrobky, které mají stejný tvar a velikost. Použití závěsů pro jednodruhové díly se využívá v hromadné nebo sériové výrobě. Závěsy kombinační se využívají pro pokovení různých typů výrobků, tzn. výrobky mají odlišný tvar a velikost. Kombinační závěsy se využívají v kusové výrobě a při galvanickém pokovení zkušebních vzorků. [24]



Obr. 2.11: Ukázka závěsů A) – nový závěs, B) – opotřebený závěs [25]



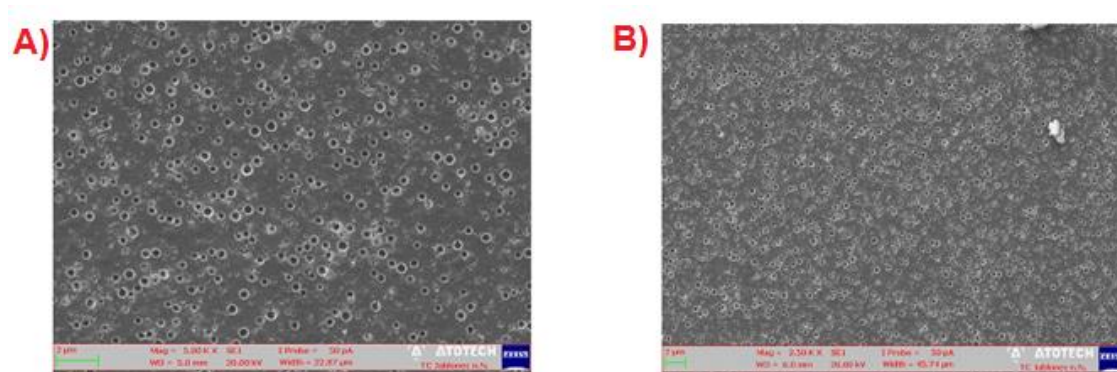
Obr. 2.12: Ukázka typů závěsů A) - závěs pro jednodruhové díly s nepokovenými výrobky, B)- kombinační závěs pro více druhů s pokovenými výrobky [25]

2.2.4 Moření – leptání dílu

Po navěšení výrobků na závěs následuje operace moření nebo tzv. leptání povrchu výrobku kyselinou chromsírovou v koncentraci 380 g/l kyseliny chromové a 400 g/l kyseliny sírové s přídavkem oxidu chromitého. Jedná se o žravou oxidující karcinogenní látku [26], nejnebezpečnější roztok z celé technologie galvanického pokovení. Moření je nejdůležitější výrobní operace galvanického pokovování, kterou se připraví povrch plastu pro vytvoření a zakotvení galvanické povrchové úpravy. Moření se provádí v silně oxidačním prostředí kyseliny chromsírové, která je ohřáta na teplotu $65 \div 68 \text{ }^\circ\text{C}$. Nejčastějším materiálem výrobků pro galvanické pokovení je ABS. Při moření dochází u ABS k odleptání butadienu, čímž na povrchu dílu dochází ke vzniku malých kavern, ideálně o velikosti $0,25 \div 1 \text{ } \mu\text{m}$. Do vzniklých kavern (viz obr. 2.13 a obr. 2.14) se v dalších výrobních operacích redukuje kovy z dalších roztoků. Při teplotě $65 \div 68 \text{ }^\circ\text{C}$ probíhá moření cca $12 \div 20 \text{ min}$ [25]. Samotný butadien je teplotou rozkládán až na oxid uhličitý a vodu, která zároveň zředuje předepsaný roztok kyseliny. Postupně dochází k redukovaní chromového aniontu kyseliny na iont chromitý. V případě,

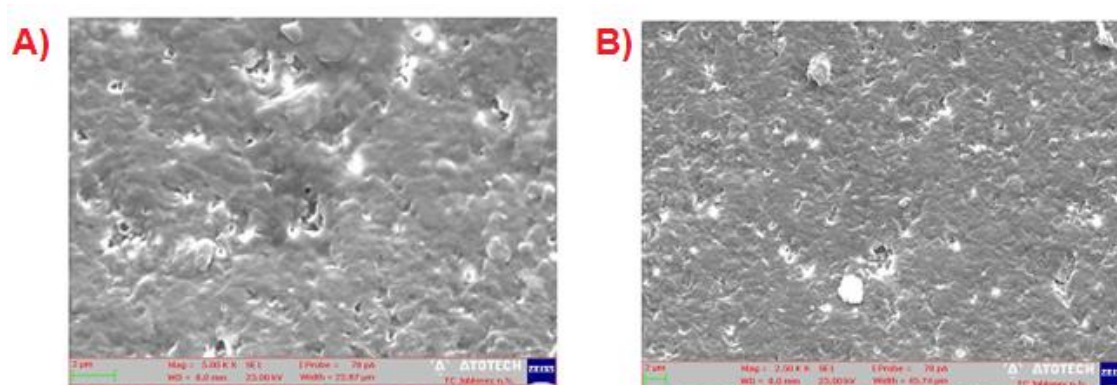
že by došlo k velkému nárůstu koncentrace chromitých iontů nad 30 g/l, došlo by k zastavení leptacího účinku na ABS. Z tohoto důvodu je do procesu vložen tzv. Oxamat. Jedná se o zařízení, které pracuje na bázi zpětné oxidace trojmocných iontů chromu na šestimocný a udržuje koncentraci Cr 3+ v přijatelné hladině. [25]

Aby nedocházelo k rozvrstvení leptacího roztoku při ohřívání a k lokálnímu zkoncentrování oxidu chromového, bývá míchán vzduchováním nebo lopatkovým míchadlem. Tím je zajištěno proudění roztoku v lázni a omývání výrobků. I při moření kyselinou chromsírovou se používají tenzidická aditiva a speciální přípravky. [25]



Obr. 2.13: Ukázka naleptání povrchu z ABS
A) – zvětšeno 5 000x, B) – zvětšeno 2 500x [22]

Pro snížení povrchového napětí se používají tzv. smáčedla, která zlepšují látkovou výměnu na povrchu výrobku. Jedná se o vhodnější přístup kyseliny chromsírové k plastovému dílu a zamezuje se tím uchycení nečistot ze spadlých nebo postupně se rozkládajících starších dílů. Smáčedla se využívají také pro lepší odvod zplodin z leptací lázně. [25]

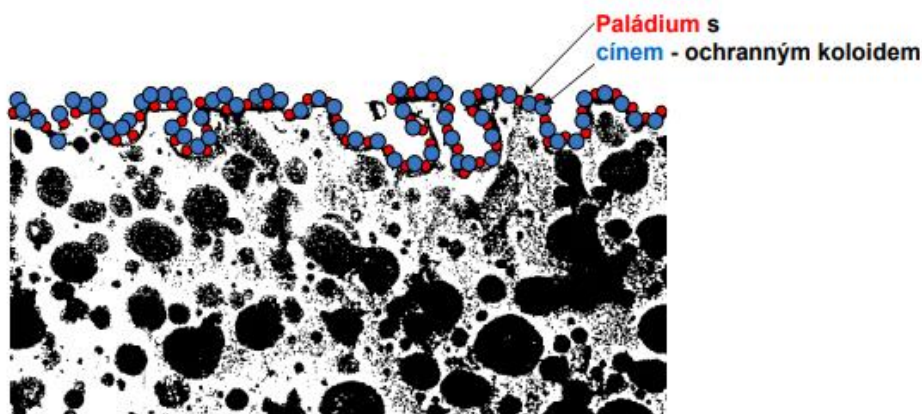


Obr. 2.14: Ukázka špatně naleptaného povrchu
A) – zvětšeno 5 000x, B) – zvětšeno 2 500x [22]

2.2.5 Aktivace

Další fází výrobního procesu po operaci moření je tzv. aktivace, která zajišťuje aktivaci povrchu před chemickým niklováním. Aktivací se rozumí přidání speciálního aktivčního roztoku na leptaný povrch, který zajistí absorpci koloidálních zárodků na leptaném povrchu a vytváří vodivý podklad pro následný povlak chemického niklu. [25] Mezi materiály, které se používají k vylučování niklu, patří: palladium, platina, ruthenium, kobalt a nikl. Kompromisem mezi náklady a funkcí představuje palladium. Cena palladia však rapidně stoupá a chemická předúprava dílu se prodražuje. [27] Čas aktivace při teplotě 30 °C je 2 ÷ 3 min. [28]

Pro aktivaci povrchu se používá např. aktivátor UDIQUE 879 W. Jedná se o koncentrovaný roztok, který se skládá z chloridu palladnatého a v kyselině chlorovodíkové rozpuštěného chloridu cínatého. Chlorid cínatý je nutný pro zvýšení stability aktivční lázně. Obě složky koncentrovaného roztoku se spotřebovávají absorpcí na naleptaných dílech. Aktivace výrobku se provádí namáčením v aktivční lázni, která je umístěna ve vanách. Pro přípravu aktivční lázně se využívá destilovaná voda, kyselina chlorovodíková a chlorid cínatý. Kyselinu chlorovodíkovou je nutno přidávat pomalu a za mírného míchání. [28]

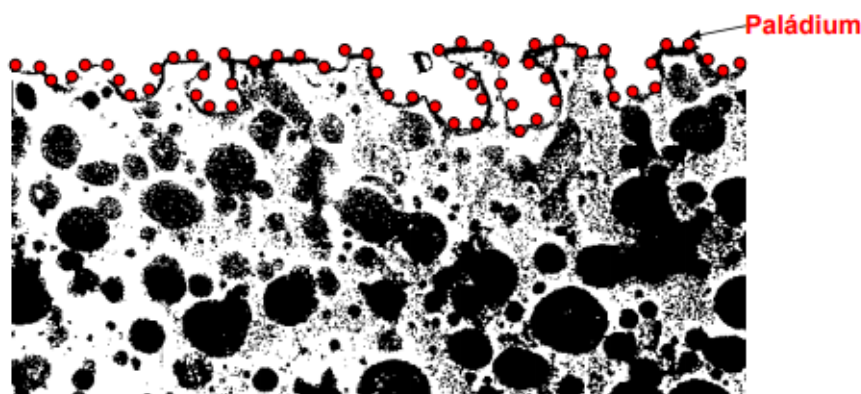


Obr. 2.15: Ukázka aktivovaného povrchu ABS dílu [22]

2.2.6 Urychlení vylučování chemického niklu

Po namočení výrobku v aktivční lázni následuje operace urychlení. Tato technologická operace provádí uvolnění zárodků palladia odstraněním ochranného koloidního cínu za účelem vylučování chemického niklu v následné operaci. Cín po operaci aktivace plnil ochrannou funkci povrchu. Po odstranění cínu se palladium stane aktivní a je volné (viz

obr. 2.16). Urychlovač je dodáván ve formě kapalného koncentrátu, který se používá jak pro nasazení nové lázně, tak i pro doplňování současné lázně. Urychlovač má jednosložkové složení a usnadňuje používání v automatizovaných výrobních linkách, pojme velké množství cínu a lze jej velmi snadno filtrovat. [29]



Obr. 2.16: Ukázka povrchu ABS dílu po odstranění cínu [22]

2.2.7 Chemické niklování

Předposlední chemickou operací předúpravy povrchu plastového dílu je chemické niklování, které vytváří na povrchu elektricky vodivý povlak. Vylučování niklu začne autokatalyticky na aktivovaném povrchu plastového dílu, tedy na obnažených zárodcích palladia. Tloušťka výsledného niklu je cca 0,5 μm (viz obr. 2.17). Povrch se stává vodivým a je připraven k elektrochemickému (galvanickému) pokovení. [30]

Chemický nikl je do lázně dodáván jako koncentrát (např. UDIQUE 891). Do lázně jsou dále přidávány další přípravky: redukční činidlo (např. UDIQUE 892) a stabilizátor (např. UDIQUE 893). Stabilizátor je mírně alkalický koncentrát niklu, který působí lehce korozivně. [30]



Obr. 2.17: Ukázka povrchu ABS dílu s vrstvou chemického niklu [22]

Technologické parametry niklovací lázně pro dekorativní pokovování jsou teplota, čas, hodnota pH a složení samotné lázně. Optimální teplota lázně je 30 °C a plastové díly jsou zde namáčeny 8 ÷ 10 min. Optimální hodnota pH lázně je 9,0. Pokud pH nedosáhne hodnoty 9,0, je nutné do roztoku přidat amoniak. [25]

2.2.8 Imerzní mědění

Po chemickém niklování následuje mědění plastového dílu tzv. imerzní mědi, kdy na niklové vrstvě dojde k vytvoření stejnosměrného měděného povlaku a ukončí se tak proces zvodivění povrchu dílu. [31] Mezi přednosti této operace patří to, že vyloučené povlaky mědi lze bez dalších technologických operací upravit v před mědicí nebo přímo při kyselém lesklém mědění (viz kap. 2.2.9). Zavedením této technologie lze mimo před niklovací lázně ušetřit i několik dalších oplachových kroků, což zajistí výraznou redukci potřebných provozních nákladů. [31]

Vzniklé povlaky imerzní mědi jsou velice tenké, dosahují tloušťky pod 1 μm (viz obr. 2.18). Vyznačují se velmi dobrou přilnavostí na povlaky chemického niklu a vyloučený povlak imerzní mědi příznivě ovlivňuje i adhezi k základnímu materiálu. Platí zde základní pravidlo: „O co intenzivnější je povlak chemické mědi, o to více je ovlivněna přilnavost k základnímu materiálu.“ [31]



Obr. 2.18: Ukázka povrchu ABS dílu s vrstvou chemického niklu a imerzní mědi [22]

Pro nanášení imerzní mědi se používá koncentrát z kyseliny sírové, iontů mědi a také inhibitorů (např CUPROSTAR IC), který umožňuje stejnoměrné vylučování povlaku. Pomalé, ale přesto stejnoměrné chemické mědění, je známkou nízké koncentrace lázně. Při vysoké koncentraci může docházet k vytváření nestejnosměrného povlaku. Lázeň pro imerzní mědění musí být uložena ve speciálních vanách. [31]

Technologickými parametry lázně imerzní mědi pro dekorativní pokovování jsou teplota, čas a hodnota pH. Optimální teplota lázně je 23 °C a plastové díly jsou zde namáčeny 1 ÷ 2 min. Optimální hodnota pH lázně je 0,9. Pokud pH nedosáhne hodnoty 0,9, zvýší se přidáním čisté kyseliny sírové do roztoku. [25]

Alternativou pro imerzní mědění je tzv. operace předniklování. Touto operací vzniká silná vrstva elektrolytického niklu, která dosahuje tloušťky až 2,5 μm (viz obr. 2.19). Nikl je zde vyloučen elektrolyticky a jedná se o tzv. Wattsův elektrolyt.



Obr. 2.19: Ukázka povrchu ABS dílu s vrstvou chemického niklu a předniklu [22]

2.2.9 Kyselé lesklé mědění

Technologickou operací imerzního mědění došlo k vytvoření stejnosměrného povlaku mědi na plastovém díle. Dalším technologickým krokem k dokonalému pokovení výrobku je mědění kyselou lesklou mědí. Duktilní měď vyrovnává napětí mezi vyloučenými vrstvami kovu a plastového dílu, které vznikají vzhledem k různým koeficientům roztažnosti. Kyselou lesklou mědí dochází k vytvoření velice lesklého a vyrovnaného povrchu. Vrstva lesklé mědi má tloušťku cca 20 ÷ 30 μm (viz obr. 2.20). [32]

Elektrolyt pro lesklé mědění (např. CUPROSTAR TM 1530) je na bázi kyseliny sírové. Lze ho ideálně využít všude tam, kde je kladen velký důraz na vysoké vyrovnání povlaku a velmi dobrou zabíhavost lesku v nízkých proudových hustotách. Lázeň se vyznačuje vysokou stabilitou přísad a přídavků, které ovlivňují fyzikální vlastnosti vyloučené vrstvy, jež jsou velmi tažné a mají dobrou přilnavost s následnými nanášenými vrstvami (např. Ni). [32] Elektrolyt se skládá ze složek síranu měďnatého pentahydrátu, z chemicky čisté kyseliny sírové (96 %), z chemicky čisté kyseliny chlorovodíkové (33 %) nebo z chemicky čistého chloridu sodného. Síran měďnatý pentahydrát se využívá

pro nastavení koncentrace mědi v elektrolytu. Alternativně lze využít roztok síranu měďnatého. Použitím roztoku odpadne náročné rozpouštění a čištění síranu měďnatého pentahydrátu. Při zesilování je potřeba dbát na zvyšování objemu elektrolytu. Oproti pentahydrátu obsahuje roztok síranu měďnatého navíc asi 15 g/l kyseliny sírové. [32] Kyselina sírová se používá pro zvýšení vodivosti elektrolytu. Její nedostatek se projevuje zvýšením potřebné proudové hustoty během vylučování a náchylností k napalování ve vysokých proudových hustotách. [32] Kyselina chlorovodíková, resp. chlorid sodný, je potřebný na nastavení obsahu chloridových iontů. Nedostatek způsobuje reliéfovité vylučování ve vysokých proudových hustotách. Při přebytku se na anodách silněji vytváří chlorid měďný, čímž se anody pasivují. [32]



Obr. 2.20: Ukázka povrchu ABS dílu s vrstvou chemického niklu, imerzní mědi a lesklé mědi [22]

Mezi technologické parametry lázně pro dekorativní pokovování patří teplota, proudová hustota, anodová proudová hustota a napětí. Optimální teplota lázně je 25 °C, proudová hustota 4,0 A/dm², napětí 4,5 V a anodová proudová hustota 2 A/dm². [25]

2.2.10 Pololesklé niklování

Po technologické operaci mědění kyselou lesklou mědí následuje výrobní operace niklování pololesklým niklem. Jedná se o technologický proces, kdy dochází k vylučování pololesklých niklových povlaků. Pololesklá vyloučená vrstva z lázně se využívá jako první vrstva při duplexním niklování a zabraňuje hloubkové korozi. Výsledná tloušťka vrstvy se pohybuje mezi 8 – 10 μm (viz obr. 2.21). [33]

Povlak pololesklého niklu je charakteristický malou pórovitou, sloupcovou strukturou niklu, prakticky bez síry, dobře vyrovnává a je tažný. Vyloučené vrstvy lze bez dalších úprav bezproblémově pokrýt vrstvou lesklého niklu, která má velmi dobrou přilnavost.

Elektrolyty pro pololesklé niklování (např. ELPELYT E 10 X) jsou na bázi síranu nikelnatého. Samotný elektrolyt se skládá z roztoku síranu nikelnatého hexahydrátu, chloridu nikelnatého hexahydrátu, kyseliny borité a niklové soli. Síran nikelnatý

hexahydrát, chlorid nikelnatý hexahydrát a kyselina boritá se používají pro první nasazení lázně a pro doplňování ztrát výnosem dílů během provozu. Niklové soli se přidávají také v kapalné formě, tím odpadá nákladné rozpouštění solí a jejich čištění. [33]



Obr. 2.21: Ukázka povrchu ABS dílu s vrstvou pololesklého niklu [22]

Lázeň pro operaci s pololesklým niklem je nutné předeřát na optimální teplotu 58 °C, maximální povolená teplota je 63 °C. Dalším důležitým technologickým parametrem je hodnota pH. Lázeň pro pololesklý nikl má mít pH 4,2. Při poklesu pH na hodnotu $\leq 3,9$ je nutné přidat do elektrolytu speciální přídavky. Optimální katodická proudová hustota je 4,0 A/dm² a rozptyl hodnot může být min. 2,0 až 8,0 A/dm². [25]

2.2.11 Lesklé niklování

Vyloučené vrstvy pololesklého niklu lze bez dalších úprav bezproblémově pokrýt vrstvou lesklého niklu, která má velmi dobrou přilnavost a používá se k vysoce lesklému vyrovnání povlaků. Pomocí elektrolytu pro lesklý nikl lze vylučovat velmi dobře vyrovnané, světlé až vysoce lesklé a tažné niklové povlaky, které je možno vzhledem k velice dobrému rozptylu lesku a hloubce vyrovnávání jednoduše chromovat. Tloušťka výsledné vrstvy je obdobná jako u pololesklého niklu (8 – 10 μm), viz obr. 2.22. Lázeň pro lesklý nikl lze provozovat pohybem katodové tyče nebo mícháním pomocí stlačeného vzduchu [34] a je používána také pro povlakové systémy s vysokou korozní odolností. Elektrolyt pro lesklé niklování (ELPELYT LS 1) je kompatibilní s pololesklou lázní (ELPELYT E 10 X). Vyloučené povlaky z těchto niklovacích lázní je možno vylučovat bez operace meziplachování. [34]

Složení elektrolytu je podobné jako u elektrolytu pro pololesklé niklování. Je na bázi síranu nikelnatého, avšak do lázně pro lesklé niklování jsou přidány speciální aditiva pro zvýšení výsledného lesku (např. ELPELYT CARRIER X 5 a ELPELYT LS 1

BRIGHTENE). Leskutvorné přísady ovlivňují tažnost vylučovaného povlaku a mění jeho vnitřní tažné napětí na napětí tlačné. [34]

Pro technologickou operaci lesklého niklování je nutné lázeň přehřát na optimální teplotu 60 °C, maximální povolená teplota je 65 °C. Hodnota pH je obdobná jako u lázně pro pololesklý nikl, tj. pH 4,2. Optimální katodická proudová hustota je 4,0 A/dm² a rozptyl hodnot může být min. 2,0 až 8,0 A/dm². [25]



Obr. 2.22: Ukázka povrchu ABS dílu s vrstvou z lesklého niklu [22]

2.2.12 Mikroporézní niklování

Vrstva z mikroporézního niklu se používá na vytvoření vnějšího korozně ochranného systému. Vzniklá vrstva je velice tenká a dosahuje hodnot 1,5 – 2,5 μm (viz obr. 2.23) Technologický proces mikroporézního niklování výrazně zlepšuje odolnost povlakového systému soustavy nikl/chrom. Na povrchu vrstvy lesklého niklu vyčnívají pevné částičky – póry, které umožňují vylučování mikroporézního chromového povlaku. [35]

Lázeň pro mikroporézní nikl (např. DUR-Ni 4000) obsahuje velmi jemné nekovové částičky. Částičky se udržují v pohybu pomocí stlačeného vzduchu. Během galvanického procesu se velké množství těchto částí zabudují do vyloučené niklové vrstvy a při následném chromování se na těchto místech chrom nevyloučí, ale naopak dojde ke vzniku mikroporézního povlaku. Takto vytvořený povlak splňuje nejvyšší možné nároky na protikorozní ochranu a doporučuje se pro použití na výrobcích, které jsou vystavené vnějšímu prostředí. Technologie je jednoduchá pro obsluhu i kontrolu a ve většině případů ji lze integrovat do stávajících zařízení. [35] U mikroporézního niklování je nutné lázeň přehřát na doporučenou teplotu 55 °C, maximální povolená

teplota je 60 °C. Hodnota pH je 4,0, optimální katodická proudová hustota je 4,0 A/dm² a rozptyl hodnot může být min. 2,0 až 6,0 A/dm². [25]



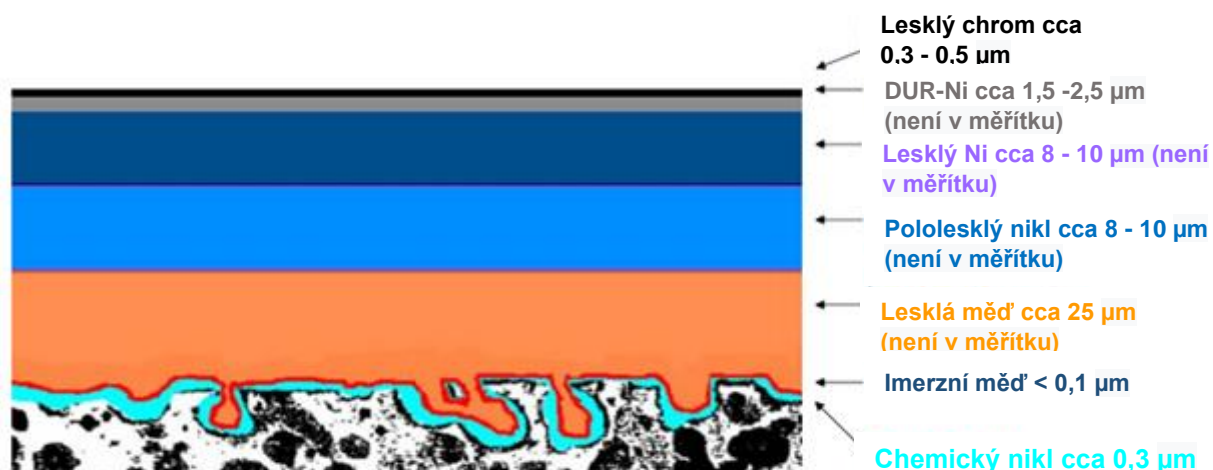
Obr. 2.23: Ukázka povrchu ABS dílu s vrstvou z mikroporézního niklu [22]

Složení elektrolytu je podobné jako u elektrolytu pro lesklé niklování a je na bázi síranu nikelnatého. Aditiva pro lesklé niklování jsou obsažena v elektrolytu a plní stejnou funkci jako u lesklého niklu. Jediným rozdílem v lázních je přídavek pevných částic, které se zabudovávají během vylučování do niklového povlaku a následně ovlivňují vytváření konečného mikroporézního chromu. [35]

2.2.13 Chromování

Konečný chromový efekt a lesk získá výrobek finálním chromovým povlakem. Jedná se o poslední namáčecí technologickou operaci, kterou výrobek musí projít, aby získal požadovaný povrch v té nejlepší možné kvalitě. Poslední vrstva lesklého chromu dosahuje tloušťek 0,3 - 0,5 μm (viz obr. 2.24) a zabráňuje vzniku koroze na již vzniklé niklové vrstvě. Vrstva chromu je velice otěruvzdorná. [36]

Elektrolyt pro chromovací lázeň (např. Ankor 1120 R) pracuje se směsí kyselin a tento typ elektrolytu se používá pro vytváření chromových povlaků o tloušťce v rozmezí 0,25 - 0,5 μm . V celém použitelném rozsahu katodických proudových hustot jsou vylučovány povlaky také s vynikající krycí schopností, kterou lze ještě zlepšit zvýšením koncentrace kyseliny chromové na cca 340 g/l. [36] Elektrolyt se skládá z kyseliny chromové, chemicky čisté 96 % kyseliny sírové, z uhličitanu barnatého, katalyzátoru a přídavku pro zvýšení smáčivosti, který snižuje povrchové napětí elektrolytu a tím také tvorbu aerosolu při pokovování. Alternativně je možno použít pěnivé smáčedlo. [36]



Obr. 2.24: Ukázka konečného povrchu ABS dílu se všemi předešlými technologickými operacemi [22]

U mikroporézního niklování je nutné lázeň přehřát na optimální teplotu 40 °C, maximální povolená teplota je 45 °C. Hodnota pH zde není důležitá. Optimální katodická proudová hustota je 15,0 A/dm² a rozptyl hodnot může být min. 10,0 až 20,0 A/dm². [25]

2.2.14 Sušení dílu a sundání ze závěsu

Galvanicky pokovené výrobky je nutné před sušením řádně očistit. Operace čištění se provádí za účelem redukce a odstranění zbytků elektrolytů z galvanického povlaku, který se zachytí na plochách výrobku. K čištění se využívá deionizovaná voda, která je zbavena všech iontově rozpustných látek křemíku. [25]

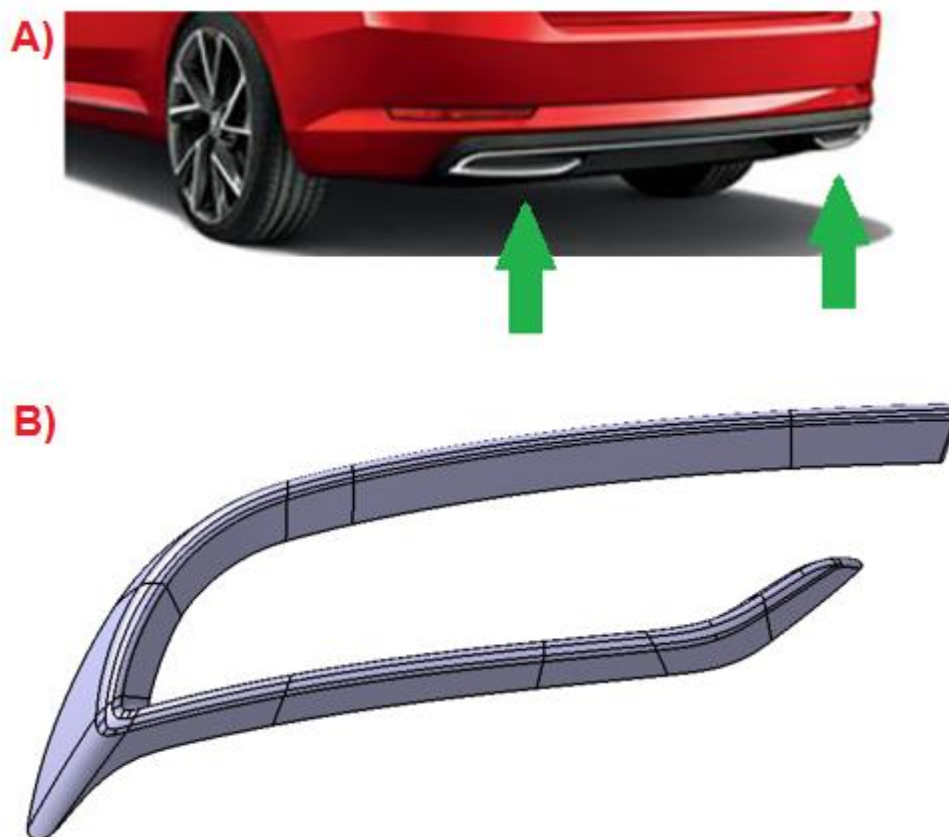
Po očištění výrobků od zbytků elektrolytu, se provádí sušení dílů. Operací sušení dojde ke snížení obsahu vlhkosti dílu a vypaření zbytků elektrolytu. Vysušený díl nesmí mít na svém povrchu zbytky fleků po technologických operacích v galvanických lázních. Tím by došlo k znehodnocení výrobků. [25] Sušení probíhá u výrobků stále zavěšených na závěsu. Po řádném vysušení jsou výrobky ze závěsu sváženy a dochází ke kontrole jejich povrchu. Výrobky se kontrolují 100 % opticky a provádí se namátková kontrola kvality vzniklých vrstev. Použité závěsy je nutné pro další nasazení do galvanického procesu tzv. odkovat a vyčistit. Odkování se dělí dva kroky, prvním krokem je elektrolytické odkování a druhým krokem je chemické odkování. [25]

3 Experimentální část

Experimentální část diplomové práce se zabývá optimalizací procesních parametrů při tepelném vakuovém tvarování vybraných dílů chrom paketu osobního automobilu s cílem dosáhnout vysoké kvality jejich povrchu, který je galvanicky pokovován. Důležitým kritériem kvality dílu je splnění požadavků při klimatickém cyklickém zatěžování simulující jeho životnost během očekávaných provozních podmínek. Řešení je realizováno ve společnosti Pajr s.r.o., kde jsem pracovníkem technického oddělení. V přípravné fázi výrobního projektu byly pro technologii vakuového tvarování navrženy procesní parametry, které jsou používány ve firmě při tvarování dílů shodného materiálu (popisované v kapitole technologie tvarování výrobků první série viz kap. 3.3). Jak se však ukázalo následně, tento navržený výrobní postup nesplňoval požadavky kladené na kvalitu galvanického pokovení plastových dílů. Cílem experimentální části diplomové práce je proto navržení optimalizace technologického procesu vakuového tvarování směřující k zvýšení přilnavosti galvanického povlaku k povrchu dílu (v experimentální části zpracováno v kapitole technologie tvarování výrobků druhé série), viz kap 3.5.6.

3.1 Charakteristika plastových dílů

Experimentální výzkum byl realizován na dílech „okrasná tvarová lišta levá a pravá“, které jsou součástí sportovního chrom paketu vozu ŠKODA OCTAVIA třetí generace a jsou přilepeny pomocí dvousložkového silikonu LOCTITE SI 5607 na zadní difuzor do předem vyznačených míst. Sestava galvanicky pokovených dílů se zadním difuzorem je jako celek montována ve společnosti ŠKODA AUTO a.s. do zadního nárazníku. Jedná se o galvanicky pokovené výrobky vyrobené technologií vakuového tvarování. Díl s označením „okrasná tvarová lišta levá“ je znázorněn na obr. 3.1. Tento díl je určen na levou stranu vozu a díl s označením „okrasná tvarová lišta pravá“, určený na pravou stranu vozu, je jeho zrcadlovým obrazem dle roviny ZX. Originální CAD data dílů byla vytvořena v programu CATIA V5 R28. Díl není tvarově složitý, ale v nejvyšších místech formy lze vlivem technologie vakuového tvarování očekávat velké ztenčení tloušťky stěny výrobku.



Obr. 3.1: Zkušební díl A) – sestava dílů (zelené šipky) se zadním difuzorem namontovaná v zadním nárazníku, B) - CAD model zkušební dílu „okrasná tvarová lišta levá“

Dle výkresové dokumentace musí díly splňovat požadavky norem TL 528 (zkouška měření tloušťky galvanických vrstev) a PV 1200 (klimatická cyklická zkouška) a před uvolněním do sériové výroby musí být řádně odzkoušeny. Díly jsou vyráběny z materiálu ABS RT1669 NATUR CN0000 SF, který je vhodný pro technologii vakuového tvarování a následné galvanické pokovení. Materiál je dodáván ve tvaru desek o tloušťce 3,1 mm. Typické vlastnosti materiálu jsou uvedeny v tab. 3.1. Jedná se o čistý ABS lehce nažloutlé barvy, který je dodáván firmou Mitras. [37] Dle materiálového listu výrobce je teplota skelného přechodu 94 °C a hustota 1,06 g/cm³.

Tab. 3.1: Mechanické vlastnosti materiálu ABS RT1669 NATUR [37]

Mechanické vlastnosti	Předpis	Hodnota
Pevnost v tahu	ISO 527	38 MPa
Pevnost v ohybu	ISO 178	57 MPa
Poměrné prodloužení na mezi kluzu	ISO 527	3,4 %
Modul pružnosti v tahu	ISO 527	2050 MPa

3.2 Konstrukce tvarovací formy

Díly jsou vyráběny technologií pozitivního pneumatického tvarování s pneumatickým předtvarováním. Při volbě negativního tvarování by docházelo k velkému ztenčování stěn ve výlisku a k vzniku velkého vnitřního napětí. Během pozitivního tvarování dochází také k ztenčování stěn ve výlisku, ale úbytek materiálu není tak výrazný, jako by tomu bylo u negativního tvarování, což bylo ověřováno na zkušebních vzorcích odlišných projektů ve společnosti Pajr s.r.o.

Konstrukce samotné formy úzce souvisí s vybranou technologií a forma pro tvarování dílů je konstruována jako pozitivní nástroj. Při konstrukci formy pro pozitivní tvarování bylo nutné brát v úvahu tloušťku počáteční desky pro tvarování, protože forma musí být menší o hodnotu výsledné tloušťky ve výlisku. Vlivem technologické operace odformování výlisku nemohla být na formě žádná uzavřená místa. Kdyby se ve formě vyskytovala uzavřená místa, výlisek by se nepodařilo odformovat a došlo by k jeho znehodnocení vlivem zdeformování nebo protržení výlisku. V důsledku tepelných změn v materiálu (při ohřevu a chlazení výlisku) běžně dochází ke změnám rozměrů, tzv. smrštění výlisku. Se smrštěním bylo nutné počítat při konstrukci formy. Pro tento typ materiálu byla forma vyrobena s přídavkem smrštění větší o 0,6 %.

Pro technologii tvarování byla zvolena tvarovací sestava o dvou formách, které jsou vůči sobě symetrické. Velikost sestavy má značný vliv na rozměr polotovaru – desky. Jednotlivé formy jsou vyrobeny ze slitiny hliníku DIN EN AW 5754. [38] Na spodní straně formy jsou technologické kapsy, které slouží k přívodu podtlaku nebo přetlaku. Do tvarovací formy jsou vyvrtány technologické díry o průměru 0,8 mm. Pro správný přívod podtlaku k ohřátému polotovaru jsou navrtány až do technologických kapes na spodní straně formy (v místech, kde je požadováno dokonalé přisátí výlisku k formě) včetně nezbytných míst v rádiusech a na hranách formy.

3.3 Technologie tvarování výrobků první série

Pro tvarování výlisků byl využit tvarovací lis GEISS U8 DU 1200/800 (viz obr. 3.2), na kterém lze provádět pozitivní i negativní tvarování s i bez předtvarování polotovaru. Polotovarem je deska z uvedeného materiálu o rozměrech 550 x 450 x 3,1 mm. Pneumatický lis využívá pro pojezd pohyblivých částí stlačený vzduch. Hlavní části stroje

jsou: spodní stůl, vrchní rám, horní a spodní ohřev a horní píst. Pro přisátí ohřátého materiálu se využívá podtlakové čerpadlo (vývěva). Maximální velikost výlisku může být 1200 x 800 mm. [39] Pro změnu rozměru výlisku se do lisu vkládá deska s vyříznutým otvorem s požadovanými rozměry tvarovací soustavy.



Obr. 3.2: Tvarovací lis GEISS U8 DU 1200/880

Před tvarováním je lis ohřát pomocí olejového temperačního okruhu na provozní teplotu 60 °C (pro prvotní nahřátí stroje a namazání jeho pohyblivých částí) a tvarovací sestava forem na teplotu 85 °C, pomocí vodní temperace. Vlivem postupného ohřevu polotovaru (pomocí topných těles) dochází k samovolnému ohřevu lisu a jeho teplota se ustálí na hodnotě 85 °C. Polotovar o tloušťce 3,1 mm je vkládán do lisu na vrchní desku s gumovým těsněním, které zamezuje úniku podtlaku během procesu tvarování.

Galvanické pokovení dílů je prováděno na speciálních závěsech pro 62 párů, tj. pro 124 výrobků. Při tvarování prvních pěti výlisků je nastavena vyšší teplota ohřevu polotovaru (viz tab. 3.2), aby došlo k zahřátí stroje při náběhu výroby na teplotu 85 °C. Prvních pět výlisků je ze série vyřazeno. Tvarování výlisku je prováděno při technologických parametrech, které jsou uvedeny v tab. 3.2. Proces pozitivního vakuového tvarování s pneumatickým předtvarováním pomocí stlačeného vzduchu, byl popsán v kap. 2.1.4. Míra předtvarování je dána tlakem stlačeného vzduchu (0,2 MPa) a dobou jeho působení, viz tab. 3.2. Během první série tvarování bylo vyrobeno 70 výlisků. Po ochlazení výlisku

v tvarovacím lise je na pákových nůžkách odstřižen přebytečný odpad po jeho obvodu a na obr. 3.3 je vyobrazen výlisek s odstřiženým odpadem.

Tab. 3.2: Technologické parametry tvarování (současný stav)

	Ohřev polotovaru	Míra topného výkonu		Doba předtvarování	Zpoždění vakua	Chlazení výlisku
		Horní ohřev	Spodní ohřev			
	[°C]	[%]	[%]	[s]	[s]	[°C]
Náběh výroby	177	80	70	1,3	2,5	67
První série	173	80	70	1,3	2,3	67

Součástí tvarovacího lisu GEISS U8 DU 1200/880 je spodní a horní ohřev skládající se z topných těles. Na tvarovacím lisu lze nastavit procentuální snížení nebo zvýšení topného výkonu celé sestavy těles (např. horního ohřevu), ale také samostatné nastavení procentuálního topného výkonu jednotlivých těles. [39] Tím lze docílit lepšího vytvarování výlisku v jednotlivých částech formy. Pro tvarování první série dílů byl realizován horní i spodní ohřev, avšak každý byl nastaven na jiný procentuální topný výkon. Horní ohřev polotovaru byl pro výrobu celé série nastaven na 80 % svého topného výkonu, ale spodní ohřev byl snížen na 70 % topného výkonu (viz tab. 3.2). Z důvodu snahy o snížení vnitřního napětí ve výlisku a následné zvýšení kvality přilnavosti galvanického povlaku, je procentuální výkon horního ohřevu o 10 % vyšší. Tělesa horního ohřevu byla po obvodu výlisku nastavena na vyšší procentuální topný výkon a směrem ke středu výlisku byl u topných těles postupně snižován až na hodnotu 60 % (viz obr. 3.4).

Procentuální topný výkon spodního ohřevu výlisků pro první sérii byl nižší o 10 % a jednotlivá tělesa ohřevu byla nastavena na nižší procentuální topný výkon než u horního ohřevu. To bylo dáno snahou o snížení vnitřního napětí v povrchových vrstvách, při dotyku polotovaru k temperované formě. Jednotlivá topná tělesa měla po obvodu nižší topný výkon než při horním ohřevu. Ohřev směrem ke středu polotovaru byl snížen na hodnotu 60 % (viz obr. 3.5).



Obr. 3.3: Odstřižený výlisek první série tvarování

	A	B	C	D	E	F	G
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0	80	94	94	94	80	0
4	0	80	70	70	70	80	0
5	0	80	70	60	70	80	0
6	0	80	60	60	60	80	0
7	0	80	65	60	65	80	0
8	0	80	65	65	65	80	0
9	0	80	94	94	94	80	0
10	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0

Obr. 3.4: Nastavení výkonu topných těles horního ohřevu polotovaru

	A	B	C	D	E	F
1	0	0	0	0	0	0
2	0	95	95	95	95	0
3	0	70	66	66	68	0
4	0	69	69	70	69	0
5	0	69	60	60	69	0
6	0	69	60	60	69	0
7	0	69	69	70	69	0
8	0	69	66	66	69	0
9	0	99	99	99	99	0
10	0	0	0	0	0	0

Obr. 3.5: Nastavení výkonu topných těles spodního ohřevu polotovaru

Po vytvarování výlisku a ostřížení technologického odpadu po jeho obvodu následoval ořez k oddělení vytvarovaného dílu (viz kap. 2.1.7), který je následně recyklován. K ořezu výlisků byla využita portálová pětiosá frézka GEISS FZ 2000x1000, která disponuje otočným vřetenem o 360°, max. otáčky vřetene 30 000 1/min a řídicím systémem SIMENS SINUMERIK 840D. Upnutí výlisku je realizováno pomocí frézovacího přípravku a přivedeného podtlaku vzduchu. Frézovací přípravek přesně kopíruje tvar výlisku a jeho součástí jsou hadičky, těsnění a drážky pro přívod podtlaku, pomocí kterého je realizováno upnutí výlisku (viz kap. 2.1.7). Křivka ořezu dílu vychází z originálních CAD dat dílu a součástí ořezu výlisku je vytvoření upínacích prvků pro snazší upnutí dílu na galvanický závěs. Z důvodu zvýšení kvality přilnavosti galvanického pokovení, byly volné konce dílu spojeny vyfrézovaným technologickým odpadem (viz obr. 3.6). Spoj technologickým odpadem eliminoval deformaci dílu kroucením při leptání jeho povrchu kyselinou chromsírovou a propojil koncové části dílů v jeden celek. Obvodový ořez výlisku je v částech spoje a upínacích prvků vyfrézován do hloubky 0,75 mm, z důvodu snazšího oddělení budoucích galvanicky pokovených prvků od základního dílu. K ořezu výlisků byla použita stopková fréza o průměru 4 mm.



Obr. 3.6: Galvanicky pokovený díl se zvýrazněným spojem volných konců pomocí technologického odpadu výlisku

3.4 Galvanické pokovení výrobků první série

Oříznuté a očištěné výrobky jsou před expedicí do galvanického výrobního závodu kontrolovány, aby nebyly znehodnoceny (např. škrábanci, nečistotami atd.) a nedocházelo k zbytečnému nárůstu neshodných dílů. Galvanické pokovení bylo prováděno ve společnosti Galvanoplast Fischer Bohemia, s.r.o. se sídlem v Liberci. Společnost Galvanoplast Fischer Bohemia s.r.o. spadá do mezinárodní skupiny Fischer Oberflächentechnologie GmbH. Skupina Fischer se zabývá finálními povrchovými úpravami, převážně galvanickým pokovením plastových dílů pro automobilový, letecký a potravinářský průmysl. [40]

Vytvarovaný a oříznutý díl prochází čtrnácti výrobními operacemi, kde je jeho povrch nejprve naleptán a následně jsou na něj nanášeny galvanické elektrolyty k docílení požadovaného lesklého povrchu (viz kap. 2.2). Jednotlivé složky použitých galvanických lázní jsou uvedeny v tab. 3.3. Závěsy na pokovení byly pro tento projekt navrženy společností Galvanoplast Fischer Bohemia s.r.o. na 62 kusů. První série dodaných dílů pro galvanické pokovení obsahovala 62 kusů levé strany dílu a 62 kusů pravé strany dílu.

Po sundání dílů ze závěsu a jejich následném osušení v sušících pecích, byly galvanicky pokovené díly připravené k expedici. Během vstupní kontroly kvality galvanicky pokovených dílů ve firmě Pajr s.r.o. došlo k zjištění velké procentuální zmetkovitosti. U pokovených výrobků z první série byla u dílu „okrasná tvarová lišta levá“ zmetkovitost 45 % a u dílu „okrasná tvarová lišta pravá“ 53 %. Mezi vzniklé vady nejčastěji patřilo zvlnění chromového povlaku na povrchu dílu (viz obr. 3.7) a odloupenutí segmentů vrstev galvanického pokovení (viz obr. 3.8). Zvlnění povlaku neboli tzv. puchýře, se nejčastěji vyskytovaly na plochách před vnitřním rádiusem. U pěti kusů dílu „okrasná tvarová lišta levá“ se puchýře objevily v zahnuté špičce dílu. Při bližším zkoumání byla v místě vady zřejmá nedostatečná adheze galvanického pokovení k povrchu plastového dílu. Pod galvanickým pokovením byly viditelné vzduchové „bublinky“, které zabraňují přilnavosti povlaku na plastový díl. Delaminace povrchu dílu neprobíhala po celé jeho ploše rovnoměrně. Pod odloupenutou vrstvou byl plastový díl zasažen „barevnými mapami“ od předešlých galvanických lázní (viz obr. 3.8). Tyto skvrny měly nejčastěji hnědou barvu s bílou „vlásečkou“, která oddělovala delaminaci povrchu od přilnavé části dílu. Na povrchu jsou vidět bílé tečky, které značí přilnavá místa, v nichž došlo ke vzniku kavern a k zachycení galvanického povlaku.



***Obr. 3.7:** Galvanicky pokovený díl se zvlněným povrchem*

Tab. 3.3: Výrobní operace při galvanickém pokovování dílů

Č.o.	Technologická operace	Galvanická lázeň	Složení lázně	Technologické parametry			
				Koncentrace [g/l]	Teplota [°C]	Čas [min]	pH
1.	Moření – leptání dílu	UDIQUE BL 2010	Kyselina chromová	380,0	66	15	X
			Kyselina sirová	400,0			
			Oxid chromitý	15,0			
			Palladium	15,0			
2.	Aktivace	UDIQUE 879 W	Kyselina chlorovodíková	200,0	30	3	X
			Chlorid palladnatý	50,0			
			Chlorid cínatý	4,0			
			X	X			
3.	Urychlení	UDIQUE 8810	X	X	50	5	X
			Redukční činidlo	21,0			
			Stabilizátor	20,0			
			Nikl	3,5			
4.	Chemické niklování	UDIQUE 891	Kyselina sirová	18,0	23	2	0,9
			Měď	0,5			
			Měď	55,0			
			Kyselina sirová	65,0			
5.	Imerzní mědění	CUPROSTAR IC	Siřan měďnatý	59,0	23	2	X
			Siřan nikelnatý	550,0			
			Chlorid nikelnatý	180,0			
			Kyselina boritá	40,0			
6.	Kyselé lesklé mědění	CUPROSTAR 1560	Siřan nikelnatý	550,0	58	5	4,2
			Chlorid nikelnatý	180,0			
			Kyselina boritá	40,0			
			Siřan nikelnatý	550,0			
7.	Pololesklé niklování	ELPELYT E 10 X	Chlorid nikelnatý	180,0	60	8	4,2
			Kyselina boritá	40,0			
			Siřan nikelnatý	550,0			
			Chlorid nikelnatý	180,0			
8.	Lesklé niklování	ELPELYT LS 1	ELPELYT CARRIER	10,0	57	10	4,0
			Nikl	75,0			
			Chlorid nikelnatý	180,0			
			ACETIC ACID SPEC	40,0			
9.	Mikroporézní niklování	DUR-Ni 4000	Kyselina chromová	340,0	41	8	X
			Kyselina sirová	40,0			
			Uhlíčitán barnatý	25,0			
			X	X			
10.	Chromování	Ankor 1120 R	Kyselina chromová	340,0	41	8	X
			Kyselina sirová	40,0			
			Uhlíčitán barnatý	25,0			
			X	X			

Některé díly obsahovaly obě zmíněné vady najednou na odlišných místech dílu. Mezi další vady patřilo zmatnění lesklého povlaku a „zezlacení“ výrobku z důvodu zvýšené teploty při operaci lesklého niklování.



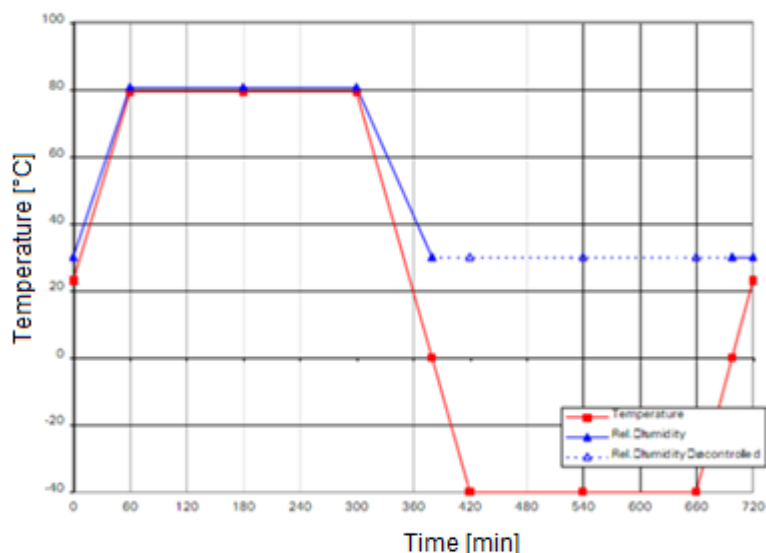
Obr. 3.8: Galvanicky pokovený díl s odloupnutou chromovou vrstvou

3.5 Hodnocení kvality a analýza příčin špatné přilnavosti galvanického povlaku k povrchu dílu

Možnou příčinou delaminace galvanického povlaku na nevyhovujících dílech bylo zřejmě zvýšené vnitřní napětí ve výrobku. Celkově bylo vyřazeno 61 kusů, z toho z levé strany 28 kusů a z pravé strany 33 kusů. Před analýzou příčin špatné adheze galvanického povlaku k povrchu dílu byly v rámci řešení (úkolů) experimentální části práce zhodnoceny požadavky na díl dle výkresové dokumentace odpovídající standardům VW TL 528 a PV1200.

3.5.1 Klimatická zkouška

Klimatická zkouška byla provedena dle PV1200, jedná se o cyklicky se opakující zkoušku prováděnou v klimatické komoře za účelem simulace vlivu okolního a životního prostředí na zkoušený díl. Při jednom cyklu zkoušky, který trvá 12 hodin, dochází k ohřevu komory a následné expozici dílu teplotě 80 °C při relativní vlhkosti 80 %. Po 240 min je zkušební komora, resp. díl ochlazen na teplotu -40 °C (rychlost chlazení je zřejmá z obr. 3.9) a ponechán na této teplotě dalších 240 min (relativní vlhkost prostředí se již nekontroluje). Po uplynutí předepsaného času se komora ohřeje na pokojovou teplotu (23 °C) a dojde k ukončení jednoho cyklu. [41] Grafické znázornění průběhu zkoušky je uvedeno na obr. 3.9. Cílem zkoušky je vyhodnotit chování dílů během namáhání, které je vyvoláno cyklicky se měnící teplotou a vlhkostí (např. zhodnotit vznik trhlin, deformaci dílu, delaminaci jeho povrchu atd.). [41]



Obr. 3.9: Grafické znázornění jednoho cyklu klimatické zkoušky PV1200 [41]

Pro klimatickou zkoušku PV1200 byly okometricky vybrány nejlepší galvanicky pokovené díly z tvarování první série, tzn. výrobky bez škrábanců, delaminace povrchu a bez puchýřů. Ke zkoušce byl potřeba jeden díl z každé strany, tj. jeden kus „okrasné tvarové lišty levé“ a jeden kus „okrasné tvarové lišty pravé“ (viz obr. 3.10). Galvanicky pokovené díly se před započítáním zkoušky namontovaly do zadního difuzoru, který byl součástí zadního nárazníku. Součástí montážní sestavy byla také „střední tvarová lišta“, která byla v rámci výrobního procesu také galvanicky pokovená.



Obr. 3.10: Vybrané galvanicky pokovené díly pro klimatickou zkoušku PV1200

Klimatická zkouška probíhala ve spolupráci se zkušebním oddělením (EKV/4) společnosti ŠKODA AUTO a.s. v Mladé Boleslavi. Dle výkresové dokumentace je zkouška realizována v rozsahu 20 cyklů, vyhovujícím kritériem je díl bez zjevných pohledových (povrchových) vad. Do klimatické komory se vložila celá zkompletovaná sestava galvanicky pokovených dílů s difuzorem a zadním nárazníkem a následně došlo k

zahájení zkoušky. Po dokončení desátého cyklu se díly zkontrolovaly a zkouška se musela bohužel ukončit. Důvodem bylo „zvrásnění“ a vznik „puchýřů“ na 90 % povrchu galvanicky pokovených dílů (viz obr. 3.11). Povrch „okrasné tvarové lišty levé“ vykazoval menší deformace, ale stále více jak polovina plochy dílu bylo zdeformována (viz obr. 3.12). Vzhledem k nízké přilnavosti galvanického pokovení k plastovému dílu a měnící se předepsané teplotě a relativní vlhkosti prostředí, byla zkouška vyhodnocena jako nevyhovující a díly označeny jako nevhodné pro sériovou výrobu.



Obr. 3.11: Galvanicky pokovená díl „okrasná tvarová lišta pravá“ po 10 cyklech klimatické zkoušky PVI200



Obr. 3.12: Galvanicky pokovená díl „okrasná tvarová lišta levá“ po 10 cyklech klimatické zkoušky PVI200

3.5.2 Měření tloušťek vrstev galvanického povlaku

Pro měření tloušťek vrstev galvanického povlaku dle TL 528 byly vybrány díly s puchýři a delaminací povrchu a díly bez zjevných povrchových vad. Naměřené tloušťky vrstev pokovení shodných a neshodných dílů byly posuzovány s požadavky odpovídající

předpisu TL 528, které jsou uvedeny v tab. 3.4. Předpis definuje požadavky dle jednotlivých podkategorií, ty jsou závislé na způsobu využití daného výrobku na vozidle a jsou označeny velkými písmeny. Použití dílu v rámci experimentálního výzkumu odpovídá podkategorii D – Exteriérové díly s velkým korozním zatížením. [42]

Tab. 3.4: Minimální požadavky na tloušťky jednotlivých vrstev galvanického povlaku [42]

Lesklá měď	Pololesklý nikl	Lesklý nikl	Mikroporézní nikl	Chrom
$\geq 25 \mu\text{m}$	$\geq 7,5 \mu\text{m}$	$\geq 7,5 \mu\text{m}$	$\geq 0,8 \mu\text{m}$	$\geq 0,5 \mu\text{m}$

K měření tlouštěk vrstev galvanického pokovení bylo využito optické mikroskopie. Pro zobrazení snímků a následné měření tlouštěk vrstev byl použit optický mikroskop Zeiss Axio Imager M2 (viz obr. 3.13), který využívá k snímkování metodu odraženého světla (LOM). Snímky byly v režimu diferenciálního interferenčního kontrastu (DIC – Nomarski).



Obr. 3.13: Optický mikroskop Zeiss Axio Imager M2 [48]

Vybrané díly byly označeny zjednodušeným popisem NOK1, NOK2, OK1 a OK2. Označení NOK1 a OK1 bylo zvolené pro „okrasnou tvarovou lištu levou“ a označení NOK2 a OK2 je pro „okrasnou tvarovou lištu pravou“. Díly označené jako NOK1 a NOK2 byly již vyřazené při kontrole kvality galvanického pokovení (viz kap. 3.4), na povrchu měly „puchýře“ a delaminaci povrchu. Všechny díly byly ve stejných pozicích příčně rozříznuty a z dílů byly vyříznuty vzorky o délce $20 \div 30 \text{ mm}$. Jednotlivé pozice vyříznutých vzorků jsou označeny písmeny **A** a **B** na obr. 3.14. Na vyříznutých vzorcích byly připraveny metalografické výbrusy, které byly zapouzdřeny do fotopolymeru

(Technovit 2000LC) a vybroušeny korundovými a SiC kotouči. Vybroušené vzorky byly následně leštěny na textilních plátnech s použitím diamantových suspenzí o zrnitosti 3 μm , 1 μm a 0,25 μm . Pro grafické odlišení jednotlivých vrstev byly vzorky následně leptány směsí zvýrazňujících roztoků kyseliny dusičné a ethanové.



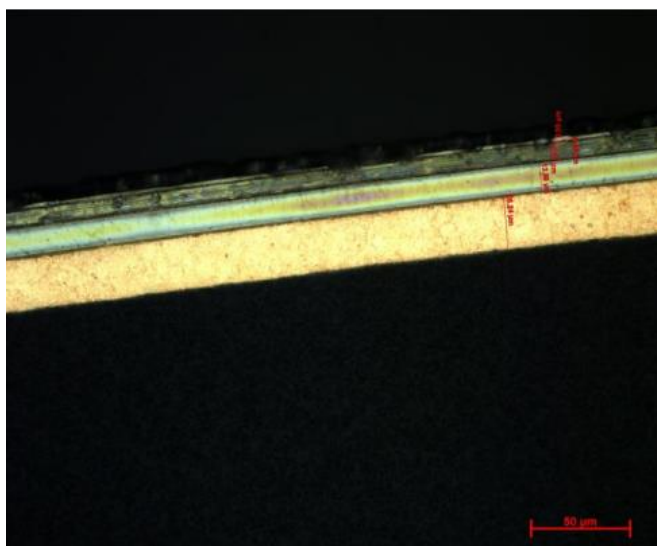
Obr. 3.14: Galvanicky pokovený NOK2 díl s vyznačenou polohou vyříznutých vzorků

Měřením se získaly tloušťky vrstev lesklé mědi, chromu, pololesklého, lesklého a mikroporézního niklu. Měření tlouštěk probíhalo při pětiset násobném zvětšení metalografického výbrusu, viz příklady na obr. 3.15 a obr. 3.16. Zkušební vzorky z neshodných dílů (NOK1 a NOK2) dosahovaly při měření menších tlouštěk vrstev než vzorky ze shodných dílů (OK1 a OK2). To je způsobeno vyříznutými vzorky u neshodných dílů v místě delaminace galvanického povrchu. Výsledné rozdíly tlouštěk vrstev mezi OK a NOK díly byly velice malé a neměly vliv na velikost přilnavosti k základnímu plastovému dílu. Naměřené hodnoty vyříznutých vzorků jsou zaznamenány v tab. 3.5.

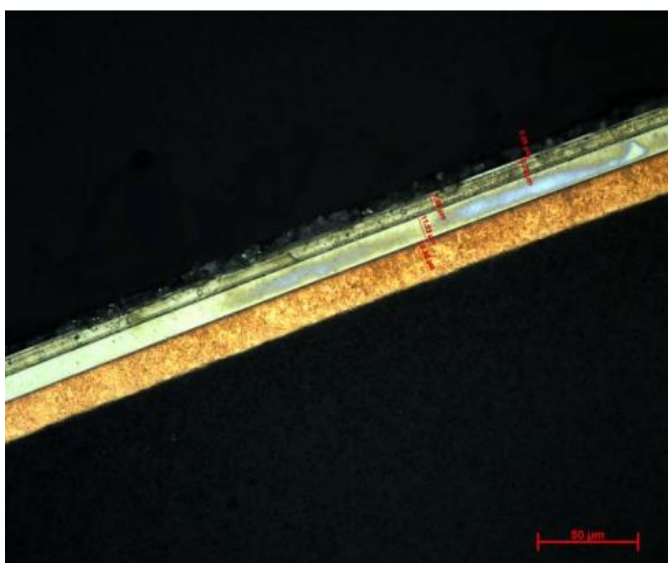
Tab. 3.5: Naměřené tloušťky jednotlivých vrstev

Vzorek		Tloušťka vrstvy [μm]				
Označení	Místo	Lesklá měď	Pololesklý nikl	Lesklý nikl	Mikroporézní nikl	Chrom
OK1	A	32,29	17,11	12,70	1,24	1,10
	B	28,24	13,59	10,01	0,96	0,55
OK2	A	31,55	18,24	11,74	1,12	1,02
	B	26,33	12,45	9,92	0,88	0,76
NOK1	A	23,26	13,53	8,43	0,83	0,83
	B	20,38	11,53	7,69	0,97	0,65
NOK2	A	22,85	12,45	7,95	0,81	0,58
	B	19,22	10,52	6,82	0,75	nezměřeno

Naměřené tloušťky u dílů OK1, OK2 a NOK1 odpovídaly požadavku normy TL 528, avšak tloušťka chromové vrstvy u dílu NOK2 v pozici **B** byla velmi malá a nepodařilo se jí při zachování rozlišení změřit. Při zvětšení rozlišení mikroskopu by bylo možno vrstvu změřit, ale její tloušťka by byla menší než naměřená hodnota 0,58 μm pro pozici **A** stejného dílu. Tím pádem zkušební vzorek NOK2 nesplňoval předepsané tolerance tlouštěk vrstev normou TL528. Na obr. 3.15 je zobrazen snímek metalografického výbrusu dílu OK1 v pozici **B** a na obr. 3.16 je uveden snímek dílu NOK1 v téže pozici. Na zobrazených snímcích lze rozpoznat značný úbytek lesklé mědi u vzorku NOK1, v tomto případě je rozdíl v tloušťkách 7,86 μm . Rozdíly v okolních tloušťkách vrstev niklu a chromu dosahují relativně nízkých hodnot.



Obr. 3.15: *Náhled tlouštěk vrstev výbrusu – vzorek OK1, místo B, zvětš. 500x (SM)*

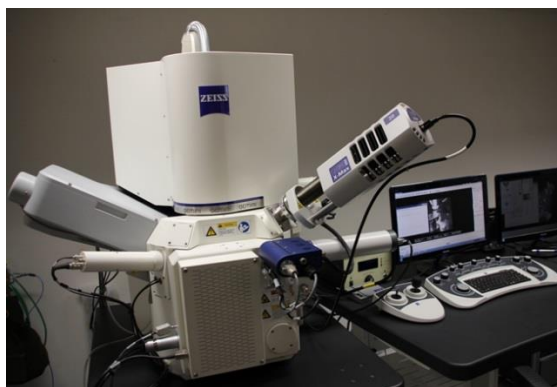


Obr. 3.16: *Náhled tlouštěk vrstev výbrusu – vzorek NOK1, místo B, zvětš. 500x (SM)*

3.5.3 Analýza povrchu plastového dílu pod galvanickou vrstvou

Vlivem nevyhovujících výsledků klimatické zkoušky PV1200 a následného neuvolnění dílů do sériové výroby, byly vybrané díly za účelem zjištění příčin špatné přilnavosti galvanického pokovení podrobeny analýze povrchu pomocí elektronové mikroskopie. Analýza povrchu nemohla být provedena na dílech, které byly v klimatické komoře při zkoušce PV1200, a to z důvodu přilepení galvanicky pokovených dílů k zadnímu difuzoru. Při odlepení výrobků by mohlo nastat trvalé znehodnocení dílů a znevěrohodnění provedených analýz. Pro zkoumání povrchu „okrasných tvarových lišt“ byl vybrán jeden díl „okrasné tvarové lišty levé“ z první série vakuového tvarování, který byl vyřazen při vstupní kontrole galvanicky pokovených dílů. Na tomto dílu se vyskytla velká delaminace galvanického pokovení a výrobek částečně odpovídal dílům po klimatické zkoušce PV1200.

K analýze povrchu galvanicky pokovených dílů byl použit rastrovací elektronový mikroskop ZEISS Ultra Plus Laboratoře mikroskopie Ústavu pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace TU v Liberci (viz obr. 3.17). Vybrané díly byly v místě delaminace galvanického pokovení příčně rozříznuty, z dílů byly odebrány vzorky o délce 20 ÷ 30 mm (viz obr. 3.18), které byly následně zbaveny vrstev galvanického povlaku. K analýze povrchu plastového dílu se využila plocha dílu pod pokovením a odpadlý segment galvanického povlaku. Plocha vzorku pod pokovením dosahovala výrazných rozdílů ve zbarvení naleptaného povrchu. Zkoumané vzorky byly umístěny na terčíky (držáky), plastové díly byly povrchově pokoveny platinou o tloušťce 1 nm (pro docílení lepšího odrazu elektronů) a umístěny do prostoru mikroskopu, kde se při měření nachází vakuum a na vzorky dopadá svazek elektronů. K pokovení plastů byl použit přístroj Quorum Q150R ES.

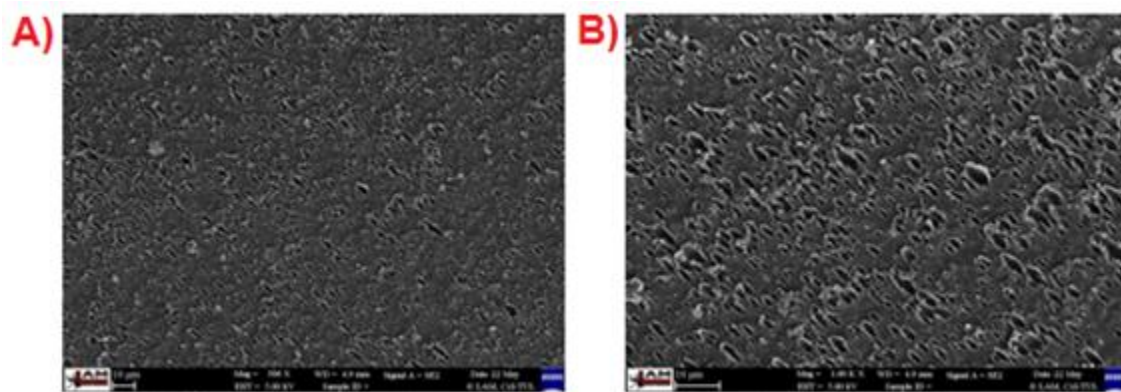


Obr. 3.17: Elektronový rastrovací mikroskop ZEISS Ultra Plus

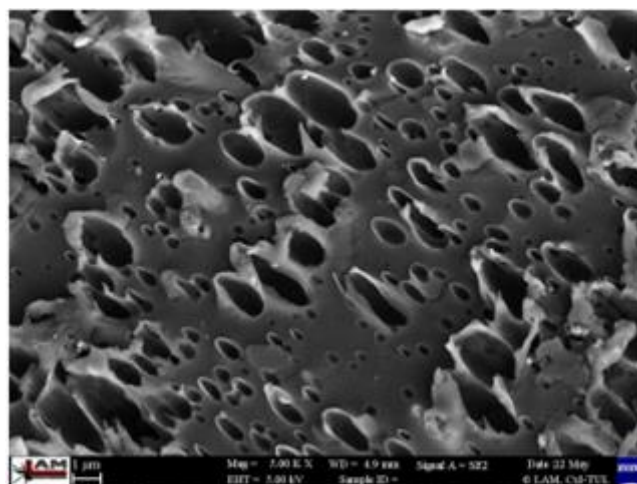


Obr. 3.18: Galvanicky pokovený díl „okrasné tvarová lišta pravá“
s vyznačenou polohou vyříznutých vzorků

Povrch vyříznutého vzorku pod odloupnutým segmentem pokovení je při různém zvětšení zobrazen na obr. 3.19 a obr. 3.20 a povrch odpadlého segmentu galvanického pokovení na obr. 3.21.

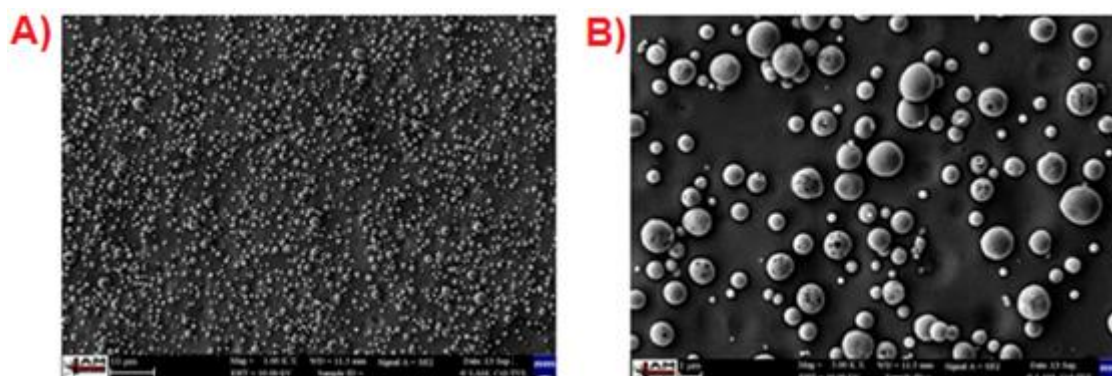


Obr. 3.19: Detail povrchu ABS vzorků pod odloupnutou galvanickou vrstvou
A) - zvětšeno 500x, B)- zvětšeno 1000x (SEM)



Obr. 3.20: Detailní snímek povrchu ABS vzorků
pod odloupnutou galvanickou vrstvou, zvětšeno 5000x (SEM)

Na obr. 3.19 a obr. 3.20 jsou viditelné galvanické kaverny, které tvarem odpovídají nepravidelným elipsám a jsou náhodně rozmístěny na povrchu vzorku. Pro přilnavost galvanického pokovení mají kaverny zásadní vliv. Kaverny vznikly při technologické operaci moření ABS dílu (viz kap. 2.2.5). Tvar kavern není rozhodující, důležitým faktorem je jejich naleptaná hloubka a vzniklá hustota na povrchu. Na povrchu vzorku ABS, pod odloupenou vrstvou pokovení, vykazují kaverny určitý stupeň deformace, která mohla být způsobena odloupením segmentu galvanického pokovení. Dle obr. 3.19 je hustota naleptaných kavern velice nízká a chybí jejich hlubší prostorová (jakoby „houbovitá“) struktura. Leptání povrchu bylo patrné pouze v nejvyšší povrchové vrstvě, protože hloubka naleptání kavern byla velice nízká. Zcela zde chybí pozůstatky složek chemického niklu, které by se při správné nebo minimální přilnavosti k základnímu materiálu ABS měly na povrchu plastového dílu udržet i po odtržení galvanického povlaku.



Obr. 3.21: Detail plochy vnitřní strany odloupeného segmentu

A) - zvětšeno 1000x, B) - zvětšeno 5000x (SEM)

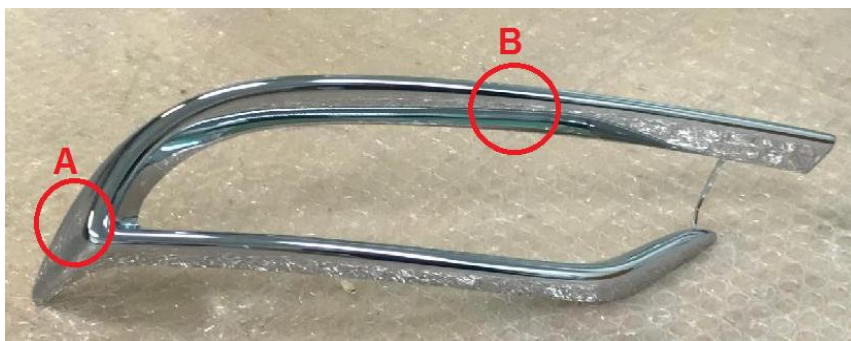
Na obr. 3.21 jsou na vnitřní straně odloupeného segmentu galvanického pokovení viditelné kuličky chemického niklu, přičemž jejich povrchová hustota je velice nízká. Rozmístění kuliček chemického niklu pozičně odpovídá vyleptaným kavernám na povrchu vyříznutého vzorku. Velikost a prostorová hustota kuliček chemického niklu a také mědi má velký vliv na přilnavost galvanického pokovení k základnímu materiálu.

3.5.4 Test přilnavosti galvanického povlaku

Vzhledem k nízké hodnotě přilnavosti povlaku k dílu, bylo potřeba na galvanicky pokovených dílech vykonat tzv. mřížkový test, pomocí kterého je zjišťována velikost přilnavosti pokovení k základnímu materiálu. Tímto testem se určí soudržnost

galvanického povlaku při jeho porušení hloubkovými řezy až do základního materiálu a při následném pokusu o odlepení povlaku lepicí páskou se určí míra přilnavosti.

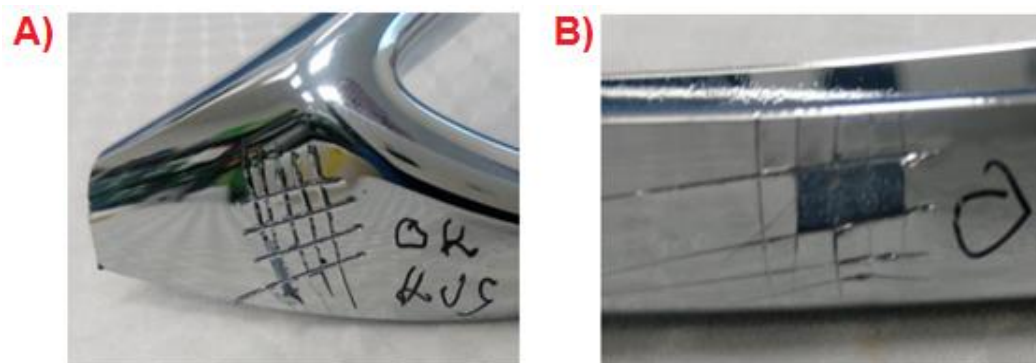
K vyhodnocení přilnavosti povlaku (mřížkového testu) byly vybrány díly bez vad galvanického pokovení a jeden díl s delaminací pokovení. Výsledky přilnavosti na dílech jsou následně porovnány mezi sebou. Měření přilnavosti pokovení probíhalo dle normy ČSN EN ISO 2409. Princip zkoušky spočívá v provedení pěti rovnoběžných řezů a pěti dalších, které jsou na rovnoběžné řezy kolmé. Je nutné, aby řezy byly provedeny až na základní materiál. Rozestupy mezi jednotlivými řezy se řídí tloušťkou galvanického povlaku. [43] Při tloušťce povlaku do 60 μm je rozstup řezů 1 mm. Řezy se provedly rovnoměrným tahem ostrého nástroje skalpele a hodnotilo se odlupování vrstvy podél řezů nebo v místě jejich protnutí. Po narušení struktury povlaku příčnými a vodorovnými řezy se na poškozený povrch nalepila lepicí páska a následně došlo k jejímu odlepení. Velikost přilnavosti povlaku byla hodnocena počtem a hustotou přilepených segmentů na lepicí pásce. Adheze povlaku se hodnotí pěti stupni, kdy nejlépe hodnocený povrch je vyhodnocen stupněm jedna (vzniklé čtverečky lpí pevně na podkladu, stopy po řezu jsou ostré a hladké) a nejhůře hodnocený povrch stupněm 5 (skoro všechny čtverečky mřížky jsou odloupeny od podkladu, nátěr se zvedá a odlupuje v se pružích již při prvním rovnoběžném řezu). [43]



*Obr. 3.22: Galvanicky pokovený díl „okrasné tvarové lišty levé“
s vyznačenými pozicemi mřížkového testu: **A** a **B***

Pro porovnání konečných výsledků přilnavosti byly vybrány díly s odlišnou kvalitou galvanického pokovení. Mřížkové testy byly na dílech provedeny v pozicích **A** a **B** dle obr. 3.22 (umístění pozice **A** je na boční ploše galvanicky pokoveného dílu). Pozice mřížkových testů byly vybrány záměrně na místech, kde se u neshodných dílů vyskytly náznaky delaminace pokovení. Snímky se znázorněnými výsledky mřížkového testu

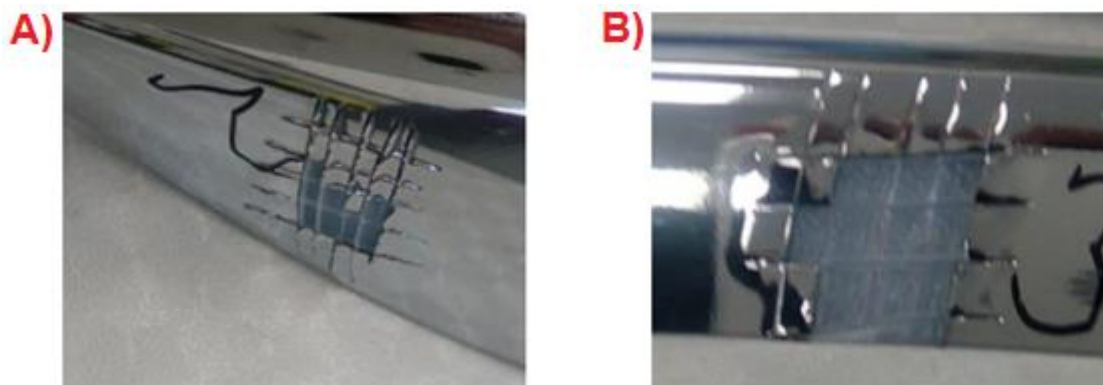
„okrasné tvarové lišty pravé“ bez povrchových vad galvanického pokovení jsou uvedeny na obr. 3.23.



Obr. 3.23: Mřížkový test „okrasné tvarové lišty pravé“ bez povrchových vad

A) mřížkový test v pozici A, B) mřížkový test v pozici B

Dle normy ČSN EN ISO 2409 byl vybrán galvanicky pokovený díl bez povrchových vad v pozici **A** ohodnocen stupněm 2, neboť vzniklé jednotlivé čtverečky mřížky po odtržení lepicí pásky dosáhly velice dobré přilnavosti k základnímu materiálu ABS, ale stopy po vzniklých řezech byly neostré a roztřepené (viz obr. 3.23). Naopak v pozici **B** byla výsledná přilnavost pokovení po mřížkovém testu relativně horší než v pozici **A**, po odlepení lepicí pásky zůstaly na lepivém podkladu pásky tři čtverečky a dle normy byl mřížkový test vyhodnocen stupněm 3.



Obr. 3.24: Mřížkový test „okrasné tvarové lišty pravé“ s delaminací povrchu

A) mřížkový test v pozici A, B) mřížkový test v pozici B

Snímky se znázorněnými výsledky mřížkového testu „okrasné tvarové lišty pravé“ s delaminací povrchu jsou zobrazeny na obr. 3.24. Na povrchu galvanicky pokoveného dílu byly delaminace zaznamenány na více místech a díl byl na základě vizuálního hodnocení označen při vstupní kontrole jako neshodný díl. Mřížkový test na tomto díle

v pozici **A** byl dle normy ČSN EN ISO 2409 vyhodnocen stupněm hodnocení 4. Po odstranění lepicí pásky došlo k odlepení poloviny vzniklých čtverečků mřížky od základního materiálu ABS. Narušený galvanický povrch mimo mřížku, kde pokračovaly čáry podélného a příčného řezu, dosahoval stále dobré přilnavosti k povrchu. Podobná situace se objevila u případu v pozici **B**, kde výsledná přilnavost byla také hodnocena stupněm 4. Po odloupení lepicí pásky ze vzniklé mřížky zůstala na jejím lepivém podkladu více jak polovina vyříznutých mřížek.

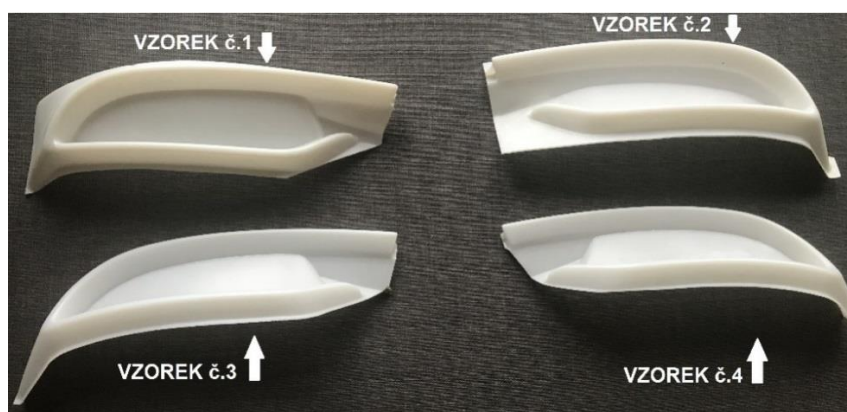
Výsledky mřížkových testů na galvanicky pokovených dílech s delaminací a bez delaminace pokoveného povrchu ukázaly odlišnou přilnavost k základnímu materiálu. Pokovený díl bez povrchových vad dosahoval dle normy ČSN EN ISO 2409 stupně hodnocení 2 a 3. V případě dílu s delaminací galvanického povlaku byl díl hodnocen hůře než prvně zmíněný díl, přesněji stupněm hodnocení 4 (v obou pozicích). Díly byly vyrobeny při relativně stejných technologických podmínkách tvarování a galvanicky pokoveny za shodných podmínek, na stejném galvanickém závěsu. Avšak výsledná přilnavost na dílech je odlišná a nedosahuje stejných hodnot. Proto bylo přistoupeno k hodnocení vnitřní napjatosti základních plastových dílů metodou jejich expozice tenzoaktivnímu prostředí (viz kap. 3.5.5).

3.5.5 Analýza vnitřního napětí v plastových dílech

Předchozími studii byla zjištěna proměnlivost výsledků přilnavosti galvanického povlaku k základnímu materiálu. Z tohoto důvodu bylo na dílech bez galvanického povlaku provedeno hodnocení jejich vnitřní napjatosti metodou působení v tenzoaktivních látkách (plastové díly jsou ponořovány v tenzoaktivním prostředí). V případě ABS je doporučovanou tenzoaktivní látkou 99 % kyselina octová. Ponořování dílu bylo prováděno nejprve při pokojové teplotě. Díl bez galvanického pokovení byl vložen do kyseliny octové po dobu 30 s, posléze vyndán, opláchnut demineralizovanou vodou a osušen. Po dokonalém osušení je díl vložen zpět do kyseliny octové na dobu 120 s. Poté byl díl vyjmut, opláchnut opět demineralizovanou vodou a vysušen na vzduchu okolního prostředí. Zkouška máčení dílu v kyselině octové se provedla za účelem uvolnění vnitřního napětí v základním materiálu, které se vyskytne v podobě světlých míst mikrotrhlin až otevřených trhlin na jeho povrchu (podle obsahu a velikosti napětí). Přítomnost vnitřního napětí zabraňuje leptání povrchu plastového dílu

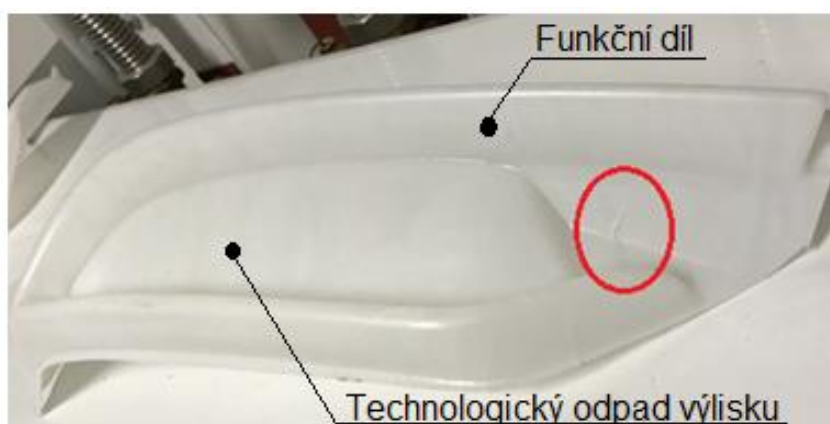
ve fázi moření (viz kap. 2.2.5) a způsobuje nedostatečnou adhezi galvanického povlaku. [44]

K uvolnění napětí byly vybrány vzorky, které nebyly galvanicky pokoveny, ani jinak mechanicky namáhány. Vzorky byly připraveny ze zbylých vakuově vytvarovaných výlisků pomocí pásové pily. Součástí vzorků byl vytvarovaný díl a technologický odpad při tvarování. Tyto vzorky byly vyrobeny stejnými technologickými parametry jako díly, které prošly povrchovou úpravou. Zkouška byla provedena na čtyřech vzorcích (viz obr. 3.25).



Obr. 3.25: Vzorky připravené k analýze vnitřního napětí

U **vzorku č. 1** byly na jeho pohledové straně vidět „mapy“ světlejšího odstínu základního materiálu (viz obr. 3.26). Vzniklá místa jsou velice rozsáhlá a vyskytují se na celém povrchu vzorku. Světlá místa se ve větší koncentraci vyskytly v oblastech, kde došlo při tvarování k velkému protažení materiálu a v určitých místech technologického odpadu se vyskytly náznaky trhlin.



Obr. 3.26: Vzorek č. 1 po uvolnění vnitřního napětí s viditelnými světlými místy a náznakem trhlin (vyznačeno červeně)

U **vzorku č. 2** byla světlá místa na pohledové straně vzorku minimální, ale větší koncentrace světlých míst se vyskytla na nepohledové straně. Světlá místa byla lépe rozpoznatelná, z důvodu zmatnění vzorku na nepohledové straně. Vzorek byl na nepohledové straně matný již po vytvarování, z důvodu matné lícové strany počátečního polotovaru. Na pohledové a nepohledové straně nebyly zaznamenány žádné náznaky trhlin. Větší koncentrace světlých míst na vzorku č. 2 byla převážně v technologickém odpadu (viz obr. 3.27).



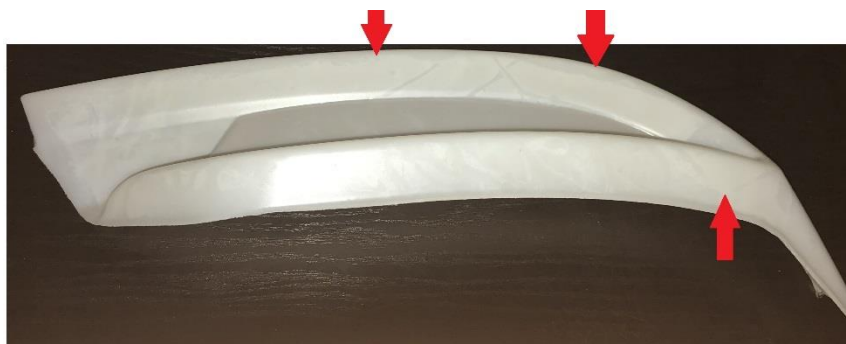
Obr. 3.27: Vzorek č. 2 po uvolnění vnitřního napětí s viditelnými světlými místy

Vzorek č. 3 po osušení od demineralizované vody vykazoval na své pohledové straně světlá místa s výskytem trhlin, která nebyla v tak velkém rozsahu jako u vzorku č.1. Mírné náznaky trhlin se vyskytly na ploše konečného dílu, ale ve spodní hraně ořezu došlo k protržení vzorku (viz obr. 3.28). Protržení vzorku nastalo v oblasti, kde byla zjištěna nízká tloušťka materiálu ve vzorku. Následnou expozicí kyselině octové došlo k porušení soudržnosti v materiálu a ke vzniku lomu.



Obr. 3.28: Vzorek č. 3 po uvolnění vnitřního napětí s viditelnými náznaky trhlin (vyznačeno zeleně) a vzniklým protržením materiálu (vyznačeno červeně)

Poslední **vzorek č. 4** po osušení od demineralizované vody vykazoval na pohledové straně velké světlé skvrny, které byly výhradně na povrchu budoucího dílu v oblasti rovných ploch (viz obr. 3.29). Na povrchu technologického odpadu byla světlá místa v menším množství a k náznaku trhlin na vzorku č. 4 nedošlo. Na nepohledové straně vznikla světlá místa podobná tvaru „housenek“.



***Obr. 3.28:** Vzorek č. 4 po uvolnění vnitřního napětí s viditelnými světlými místy na rovných plochách (znázorněno šipkami)*

Po expozici vzorků v kyselině octové a následném vyhodnocení zjištěných výsledků na zkušebních vzorcích, lze konstatovat, že plastové díly vyráběné technologií vakuového tvarování jsou zatíženy reziduálním vnitřním napětím. Každý vzorek dosahoval jiných hodnot výsledků polohy a hustoty světlých míst (skvrn), u některých dílů byl zaznamenán náznak trhlin nebo protržení dílu.

3.6 Technologie tvarování výrobků druhé série

Vzhledem k zjištěnému vnitřnímu napětí, které úzce souvisí s kvalitou naleptání povrchu při galvanickém pokovování a adhezí povlaku k povrchu plastového dílu, bylo nutné přistoupit k optimalizaci technologického procesu vakuového tvarování s cílem minimalizovat vnitřní napjatost na konečných dílech.

V rámci optimalizace technologického procesu vakuového tvarování byla do výrobního procesu zařazena fáze žihání, která se využívá k odstranění nebo snížení vnitřního napětí u výrobních technologiích, kde je výrobek při zpracování zatížen teplem a tlakem. [21] Technologie žihání termoplastů se dělí na tři hlavní části. První částí je ohřev výlisku na předepsanou teplotu žihání (pro materiál ABS na 80 °C) následuje teplotní výdrž výlisku a posléze dochází k pomalému ochlazování vlivem okolního prostředí. [23] Žiháním vytvarovaného výlisku se dosáhne tzv. „teplotního vyrelaxování“ materiálu, tj. odstranění jeho vnitřní napjatosti, která byla způsobena během výroby účinkem tepla

a tlaku. Dalšími opatřeními, která byla realizována pro snížení vnitřního napětí ve výlisku, byla změna v nastavení teplot horních a spodních těles ohřevu, změna velikosti předtvarování ohřátého polotovaru, teploty tvarování a teploty vyjmutí výlisku z formy.

Tvarování druhé série s provedenými úpravami proběhlo na stejném vakuovém lisu GEISS U8 DU 1200/880 (viz kap. 3.3). Vlivem znehodnocení pěti kusů výlisků při rozběhu první série tvarování, byl vakuový lis před tvarováním přehřát na vyšší teplotu 70 °C. K temperaci formy byla využita voda a forma byla temperována na teplotu 85 °C.

Základní polotovar pro tvarování druhé série výlisků byl totožný, jako při tvarování první série (viz kap. 3.1). Z důvodu nahřátí vakuového lisu byly z druhé série vyřazeny tři kusy výlisků a celkem bylo vyrobeno 80 kusů. Jeden kus výlisku byl při náběhu výroby vyřazen z důvodu vysoké teploty a dva výlisky z důvodu špatného vytvarování k povrchu formy. Tvarování druhé série výlisků proběhlo s optimalizovanými technologickými parametry, které jsou uvedeny v tab. 3.6.

Tab. 3.6: Technologické parametry tvarování druhé série

	Ohřev	Míra topného výkonu		Doba	Zpoždění	Chlazení
	polotovaru	Horní ohřev	Spodní ohřev	předtvarování	vakua	výlisku
	[°C]	[%]	[%]	[s]	[s]	[°C]
Náběh výroby	174	67	85	1,5	2,5	71
Druhá série	168	67	85	2,0	2,7	71

V rámci optimalizace výrobního procesu bylo během tvarování sníženo tepelné namáhání pohledové strany základního polotovaru. Při tvarování výlisku není materiál až tak teplotně zatížen a vnitřní napětí by mělo být teoreticky v menším rozsahu. Při nižší teplotě ohřevu však vzniká riziko nedokonalého vytvarování k povrchu formy a znehodnocení výlisku. Po odzkoušení různých teplot ohřevu polotovaru byl tento nastaven na teplotu 168 °C (viz tab. 3.6). Při zvolení nižší teploty ohřevu nebyl materiál ve všech místech výlisku správně vytvarován k povrchu formy. Pro tvarování výlisků druhé série byl ohřev polotovaru realizován rovněž pomocí horních a spodních topných těles, avšak každý byl nastaven na jiný optimalizovaný procentuální topný výkon. Horní ohřev polotovaru byl pro výrobu druhé série vzorků snížen na 67 % svého topného výkonu, ale spodní ohřev

byl procentuálně zvýšen na 85 % topného výkonu (viz tab. 3.2). Nastavení horních topných těles na vyšší procentuální topný výkon při první tvarovací sérii vedlo k velkému vnitřnímu napětí ve výlisku, převážně na pohledové straně (viz kap. 3.5.5). V rámci optimalizace procesu došlo k snížení procentuálního výkonu horního ohřevu vůči první sérii o 13 %. Tělesa horního ohřevu byla po obvodu výlisku nastavena na vyšší procentuální topný výkon a směrem ke středu výlisku byl u topných těles postupně snižován až na hodnotu 55 % (viz obr. 3.29). Procentuální topný výkon spodního ohřevu výlisků pro druhou sérii vzorků byl vyšší o 15 % než v případě první série výlisků. Jednotlivá topná tělesa měla po obvodu vyšší procentuální výkon než při horním ohřevu, ale směrem ke středu polotovaru byl u topných těles snížen na hodnotu 63 % (viz obr. 3.30).

	A	B	C	D	E	F	G
1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0
3	0	85	85	85	85	85	0
4	0	85	74	74	74	85	0
5	0	85	60	60	60	85	0
6	0	85	55	55	55	85	0
7	0	85	60	60	60	85	0
8	0	85	74	74	74	85	0
9	0	85	85	85	85	85	0
10	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0

Obr. 3.29: Nastavení topných těles horního ohřevu

	A	B	C	D	E	F
1	0	0	0	0	0	0
2	0	90	90	90	90	0
3	0	90	79	79	90	0
4	0	90	67	67	90	0
5	0	90	63	63	90	0
6	0	90	63	63	90	0
7	0	90	67	67	90	0
8	0	90	79	79	90	0
9	0	90	90	90	90	0
10	0	0	0	0	0	0

Obr. 3.30: Nastavení topných těles spodního ohřevu

Další úpravou výrobního procesu byla změna velikosti předtvarování ohřátého polotovaru. Technologická veličina předběžného protažení, která udává velikost předtvarování polotovaru, resp. čas pro přivedení stlačeného vzduchu, byla při tvarování druhé série výlisků zvýšena. Při předtvarování polotovaru do tvaru kulového vrchlíku

dochází vlivem nízké míry předtvarování k jeho následnému velkému tažení povrchem formy, při jejím pohybu ze spodní do horní (tzv. pracovní) úvratě. Lze předpokládat, že tažení polotovaru formou se může výrazně podílet na celkovém stupni vnitřního napětí ve výlisku. Z toho důvodu byl čas předběžného protažení zvýšen o 0,7 s na dobu 2,0 s. Při tomto nastavení bylo docíleno vyššího stupně předtvarování, a tím nižšího tahu polotovaru formou během procesu tvarování.

Poslední úpravou, která byla v rámci optimalizace výroby provedena, bylo zavedení fáze žíhání výlisku po jeho vyjmutí z tvarovacího lisu. V souvislosti s touto změnou byla provedena také úprava chlazení výlisku, resp. zvýšena teplota, při které je výlisek vyjímán z formy (o 4 °C oproti první tvarovací sérii). Při výběru způsobu žíhání bylo možné přistoupit buď k celkovému žíhání výlisku v peci nebo k lokálnímu žíhání horkovzdušnou pistolí. Zvoleno bylo celkové žíhání výlisku v peci, z důvodu rovnoměrného způsobu žíhání po celé jeho ploše. Při volbě teploty bylo nutné brát v úvahu možnou deformaci tvaru výlisku, která by mohla nastat při překročení teploty skelného přechodu. Výlisek po vyjmutí z tvarovacího lisu byl včetně technologického odpadu vložen do pece s teplotou 80 °C (viz obr. 3.31). Doba expozice výlisku byla 25 s, poté byl výlisek z pece vyjmut a plynule ochlazován okolním prostředím na teplotu cca 22 °C. Po ochlazení výlisku se provedlo odstřížení přebytečného technologického odpadu pomocí pákových nůžek.



Obr. 3.31: Výlisek druhé série žíhán v peci při 80 °C po dobu 25 s

Vzhledem k malému výskytu kavern a nízké hloubce naleptání povrchu, které bylo zaznamenáno u vzorků z první tvarovací série, byla provedena úprava ořezu tak, aby výrobek byl pro galvanické pokovování vyztužen prvky technologického odpadu (viz obr. 3.32). Tyto prvky zajišťují nejen vyztužení dílu pro operaci pokovování, ale

umožní také rovnoměrný průchod elektrického proudu, který je potřebný k pokovení základního dílu. Součástí dílů z první tvarovací série byl vyříznutý úzký spoj, který se při galvanickém pokovení částečně odlomil a některé díly byly posléze mírně deformovány. V upraveném návrhu ořezu byl obvodový ořez výlisku v místech vyztužujících a upínacích prvků vyfrézován do hloubky 0,75 mm, z důvodu snazšího oddělení budoucích galvanicky pokovených prvků od základního dílu.



Obr. 3.32: Galvanicky pokovený díl s vyztužujícími prvky (vyznačeno červeně)

K ořezu výlisků druhé série byla použita totožná frézka jako při ořezu dílů první série (GEISS FZ 2000x1000). Upnutí výlisků bylo realizováno frézovacím přípravkem a přivedeným podtlakem vzduchu. Křivka obvodového ořezu dílu byla totožná s díly z první série tvarování. K ořezu výlisků byla použita stopková fréza o průměru 4 mm.

3.7 Hodnocení vnitřní napjatosti dílů druhé (optimalizované) tvarovací série

Pro kontrolu vnitřního napětí a ověření provedených optimalizací technologického procesu vakuového tvarování bylo na zkušebních vzorcích druhé série provedeno jeho uvolnění v tenzoaktivním prostředí – kyselině octové.

K uvolnění napětí byly vybrány díly, které byly vyžihány v peci při teplotě 80 °C po dobu 25 s. Díly byly vyříznuty z vakuově vytvarovaných výlisků pomocí pásové pily, jejich součástí byl i technologický odpad při tvarování. Připravené vzorky byly vkládány jednotlivě do lázně kyseliny octové způsobem uvedeným v kap. 3.5.5. Pro potřebu zkoušky v kyselině octové byly připraveny čtyři vzorky (viz obr. 3.33).



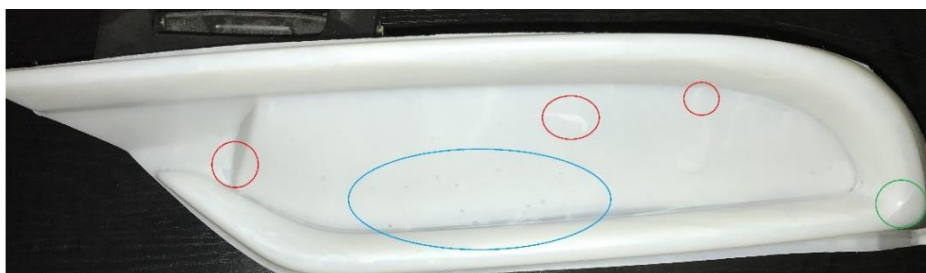
Obr. 3.33: Připravené vzorky druhé série k analýze vnitřního napětí

Na povrchu **vzorku č.1** druhé tvarovací série byla na pohledové straně vidět malá světlá místa (viz obr. 3.34), která jsou nerovnoměrně rozmístěna po povrchu zkušební vzorku. Zkušební vzorek je bez názaku trhlin.



Obr. 3.34: Vzorek č.1 se světlými místy na povrchu (vyznačeno červeně)

Na povrch **vzorku č.2**, po osušení od demineralizované vody, vznikly v oblasti technologického odpadu „bublinky“ o průměru cca 1 ÷ 2 mm (viz obr. 3.35). Na povrchu konečného dílu žádné „bublinky“ nevznikly, avšak došlo k mírnému názaku trhliny (označeno zeleně). Na pohledové straně vzorku byla patrná světlá místa odstínu od základního materiálu, která se však nacházela výhradně v oblasti technologického odpadu.



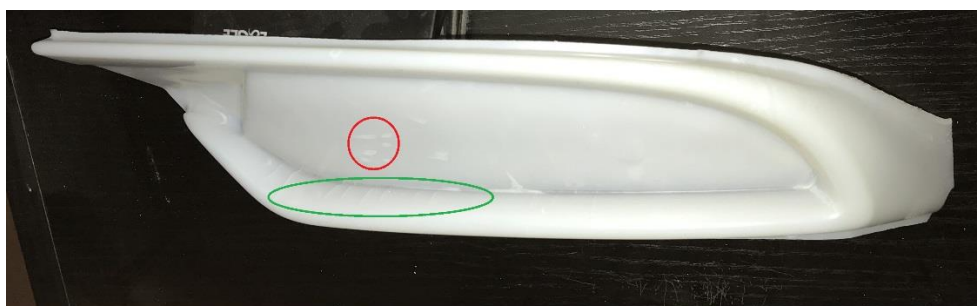
Obr. 3.35: Vzorek č.2 se světlými skvrnami na povrchu (vyznačeno červeně), s názakem trhliny (vyznačeno zeleně) a s výskytem bublinek (vyznačeno modře)

Vzorek č.3 druhé tvarovací série vykazoval na pohledové straně stopy vnitřního napětí v relativně větší míře než vzorek č.1. Na povrchu vzorku vznikly světlé skvrny nepravidelného tvaru s největší hustotou ve špičce vzorku (viz obr. 3.36). Po uvolnění napětí došlo k náznaku trhliny na boční straně dílu (viz obr. 3.36).



Obr. 3.36: Vzorek č.3 se světlými skvrnami na povrchu (vyznačeno červeně) a s náznakem trhliny (vyznačeno zeleně)

Poslední **vzorek č.4** po osušení od demineralizované vody nevykazoval na povrchu konečného dílu žádná světlá místa, ani žádné světlé skvrny, které by naznačovaly přítomnost vnitřního napětí ve vzorku. Světlá místa se vyskytla ojediněle v oblasti technologického odpadu a ve spodní hraně ořezu došlo k vytvoření několika napěťových trhlin (viz obr. 3.37). Tyto trhliny byly nerovnoměrně rozmístěny po celé délce prolisu.



Obr. 3.37: Vzorek č.4 se světlými skvrnami na povrchu (vyznačeno červeně) a s náznaky trhlin (vyznačeno zeleně)

Při konečné analýze zjištěných výsledků na zkušebních vzorcích, lze konstatovat úbytek vnitřního napětí na vzorcích druhé tvarovací série. Po optimalizaci technologického procesu nebylo vnitřní napětí úplně odstraněno, ale jeho výskyt na povrchu vzorků druhé série byl podstatně eliminován. Každý vzorek dosahoval jiných hodnot výsledků polohy světlých míst (skvrn), povrchové hustoty skvrn nebo vzniku (náznaku) napěťových trhlin. Vzhledem k zjištěnému pozitivnímu výsledku byly vytvarované a oříznuté díly galvanicky pokoveny a následně byla u nich zhodnocena kvalita pokovení.

3.8 Galvanické pokovení vzorků druhé tvarovací série

Před vlastním procesem pokovení byla nejprve provedena optická kontrola všech „okrasných tvarových lišt levých“ a „okrasných tvarových lišt pravých“. Výstupní kontrola se zaměřila na povrchové vady (např. škrábance, nečistoty atd.), aby nedocházelo k zbytečnému pokovení špatných dílů. Galvanické pokovení dílů druhé série bylo provedeno opět ve spolupráci se společností Galvanoplast Fischer Bohemia s.r.o., za podmínek uvedených v kap. 3.4.

Během vstupní kontroly kvality galvanicky pokovených dílů ve firmě Pajr s.r.o. byla procentuální zmetkovitost nižší než při vstupní kontrole dílů z první tvarovací série. Procentuální zmetkovitost u dílů „okrasné tvarové lišty levé“ byla 24,8 % a „okrasné tvarové lišty pravé“ 21 %. Mezi vzniklé vady s větším výskytem patřila opět delaminace galvanického povlaku (viz obr. 3.38) a vznik tzv. puchýřů. Delaminace povrchu se nejčastěji vyskytla v oblasti, kde došlo při uvolnění vnitřního napětí ke vzniku trhlin, viz vzorek č.4 druhé série (viz kap. 3.7). Zvlnění povlaku (tzv. puchýře) se nejčastěji vyskytovalo na plochách před vnitřním rádiusem.



Obr. 3.38: Galvanicky pokovený díl s delaminací povrchu

Optimalizováním technologického procesu vakuového tvarování plastového dílu došlo k snížení celkové procentuální zmetkovitosti pokovené dávky. Celkem bylo vyřazeno 15 kusů „okrasných tvarových lišt levých“ a 13 kusů „okrasných tvarových lišt pravých“ z celkového počtu 124 kusů.

3.9 Hodnocení kvality pokovených dílů na základě optimalizace procesu vakuového tvarování

Kvalitativně neshodné díly se vyznačují delaminací galvanického povlaku a výskytem tzv. puchýřů. Tyto vady se však u dílů, zhotovených po optimalizaci výrobního procesu, vyskytovaly v menší míře, proto mohlo být přistoupeno k analýze přilnavosti povlaku na plastových dílech způsobem, odpovídající hodnocení vzorků první tvarovací série. Po provedených analýzách přilnavosti galvanického povlaku k povrchu dílu byly v rámci řešení (úkolů) experimentální práce zhodnoceny požadavky na díl dle výkresové dokumentace odpovídající standardům VW TL 528 a PV1200.

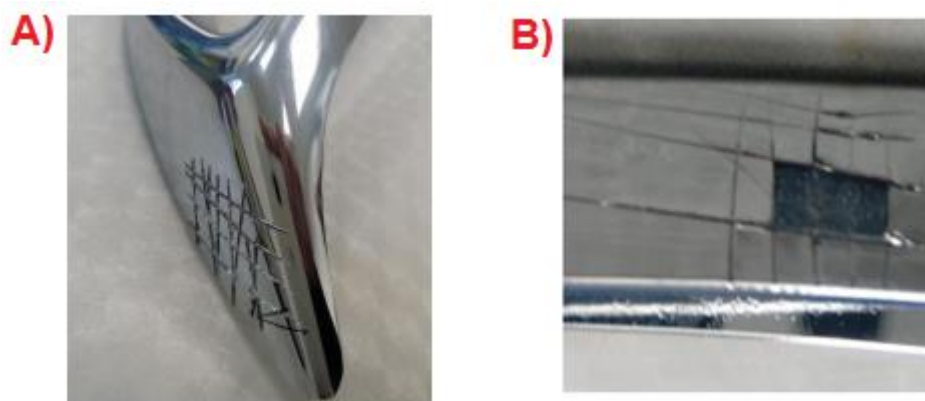
3.9.1 Test přilnavosti galvanického povlaku

Pro určení stupně přilnavosti galvanického povlaku k plastovému dílu, který byl vyroben během druhé série vakuového tvarování, byl vykonán mřížkový test dle normy ČSN EN ISO 2409. Tímto testem se určí soudržnost galvanického povlaku při jeho porušení hloubkovými řezy až do základního materiálu a při následném pokusu o odlepení povlaku lepicí páskou se určí stupeň přilnavosti. Popis principu mřížkového testu byl uveden v kap. 3.5.4. Pro zjištění stupně přilnavosti byl vybrán jeden pár dílů bez povrchových vad pokovení. Mřížkové testy byly vykonány na dílech v pozicích **A** a **B**, dle obr. 3.39. Umístění pozice **A** bylo na boční ploše galvanicky pokoveného dílu. Pozice mřížkových testů byly vybrány v místech, kde docházelo k indikaci vnitřního napětí na zkušebních vzorcích při jeho uvolňování (viz kap. 3.7). Snímky se znázorněnými výsledky mřížkového testu „okrasné tvarové lišty levé“ bez povrchových vad galvanického pokovení jsou uvedeny na obr. 3.40.



Obr. 3.39: Galvanicky pokovený díl „okrasné tvarové lišty levé“ s vyznačenými pozicemi **A** a **B**

V pozici **A** je vzorek hodnocen stupněm přilnavosti 2. Vzniklé jednotlivé čtverečky mřížky po odtržení lepicí pásky dosáhly velice dobré přilnavosti k základnímu materiálu ABS, ale stopy po vzniklých řezech byly neostré a roztřepené. Naopak v pozici **B** byla výsledná přilnavost pokovení po mřížkovém testu relativně horší než v pozici **A**, neboť po odloupení lepicí pásky zůstaly na jejím lepivém podkladu čtverečky pokovení a dle normy byl mřížkový test vyhodnocen stupněm 3, tj. maximálně přípustným stupněm pro uvolnění dílu zákazníkovi.

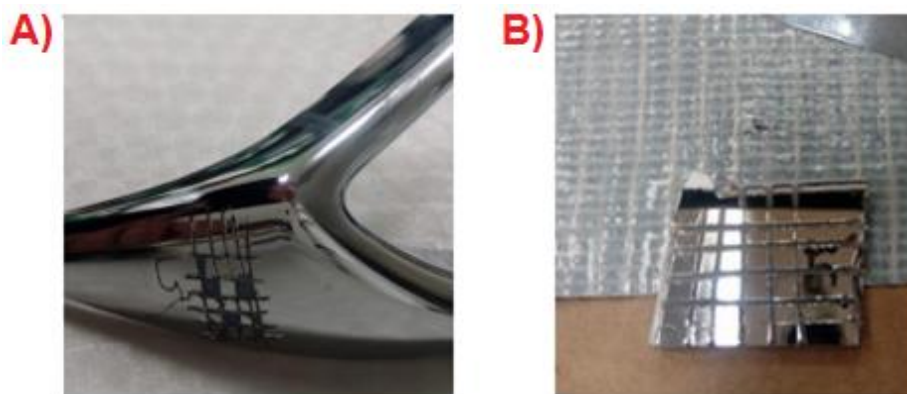


Obr. 3.40: Mřížkový test „okrasné tvarové lišty levé“ bez povrchových vad

A) mřížkový test v pozici A, B) mřížkový test v pozici B

Na vybraném vzorku „okrasné tvarové lišty pravé“ byl vypracován mřížkový test v pozici **A** dle obr. 3.41 a vyhodnocen stupněm hodnocení 3. Po odstranění lepicí pásky došlo k odlepení čtyř vzniklých čtverečků mřížky od základního materiálu ABS. Narušený galvanický povrch mimo mřížku, kde pokračovaly čáry podélného a příčného řezu, dosahoval stále dobré přilnavosti k povrchu. Podobná situace se objevila u případu v pozici **B** (viz obr. 3.41), kde byl ze zkušební vzorku vyříznut segment o délce 30 mm z důvodu lepšího narušení povrchu při mřížkovém testu. Výsledná přilnavost byla hodnocena stupněm hodnocení 2. Po odloupení lepicí pásky vzniklé čtverečky mřížky zůstaly na základním materiálu ABS.

Výsledky mřížkových testů na galvanicky pokovených dílech druhé série ukázaly mírně zlepšenou přilnavost povlaku k základnímu materiálu. Díly okrasných tvarových lišt (levé i pravé) bez povrchových vad dosahovaly stupně hodnocení 2 a 3.



Obr. 3.41: Mřížkový test „okrasné tvarové lišty pravé“ bez povrchových vad
 A) mřížkový test v pozici A, B) mřížkový test v pozici B

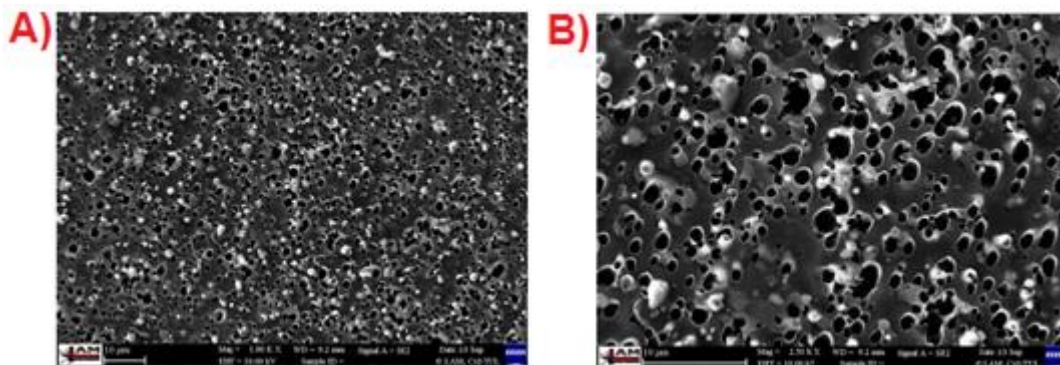
3.9.2 Analýza povrchu plastového dílu pod galvanickou vrstvou

Na základě analýzy vnitřního napětí dílu a následného galvanického pokovení byla zaznamenána nižší procentuální zmetkovitost pokovené výrobní dávky. Pro zjištění hloubky a plošné hustoty naleptání povrchu základního materiálu a vznik kavern pod galvanickým pokovením byla provedena mikroskopická analýza povrchu. Pro analýzu povrchu „okrasné tvarové lišty“, byl vybrán jeden pár dílů, které byly bez povrchových vad. K analýze byl použit rastrovací elektronový mikroskop ZEISS Ultra Plus (viz kap. 3.5.3).

Vybrané díly pro studium povrchu byly příčně rozříznuty v oblasti, kde došlo k rozříznutí vzorků první série tvarování. Z dílů byly odebrány vzorky o délce 20 ÷ 30 mm (viz obr. 3.42). Tyto vzorky byly následně zbaveny vrstvy galvanického povlaku odloupenutím. K analýze povrchu se využila plocha vzorku pod pokovením. Vyříznuté vzorky byly pro potřeby elektronové mikroskopie povlakovány vrstvou platiny o tloušťce 1 nm.

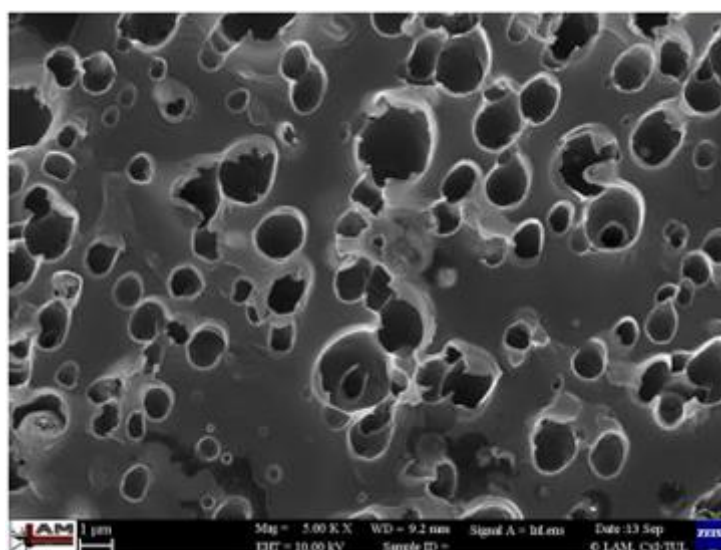


Obr. 3.42: Galvanicky pokovený díl „okrasné tvarová lišta levá“
 s vyznačenou polohou vyříznutých vzorků



Obr. 3.43: Povrchu ABS vzorků druhé série pod odloupnutou fólií povlaku

A) - zvětšeno 1000x, B)- zvětšeno 2500x (SEM)



Obr. 3.44: Detail povrchu ABS vzorků pod odloupnutou fólií povlaku, zvětšeno 5000x (SEM)

Na obr. 3.43 a obr. 3.44 jsou viditelné kaverny, které zaujímají nepravidelné tvary a jsou náhodně rozmístěny na povrchu vzorku. Jak již bylo uvedeno, více než tvar, je důležitou veličinou naleptaná hloubka kavern a jejich hustota na povrchu dílu. Dle obr. 3.43 došlo k zhuštění naleptaných kavern oproti vzorkům první série. Hloubka vzniklých kavern na vzorku druhé tvarovací série se mírně zlepšila oproti vzorkům z první série, ale i nadále lze říci, že je podprůměrná. Toto stanovisko je podpořeno konzultací s pracovníky společnosti Funchem s.r.o., kteří mají v oblasti galvanického pokovování plastových dílů více jak desetiletou zkušenost. Ve vzniklých kavernách došlo k nízkému výskytu chemického niklu.

3.9.3 Měření tloušťek vrstev galvanického povlaku

K měření tloušťek jednotlivých vrstev galvanického pokovení byly vybrány vzorky bez povrchových vad. Z druhé série galvanicky pokovených dílů byly vybrány celkem 2 díly (jeden pár). Následně se naměřené tloušťky vrstev pokovení porovnaly s požadavky dle předpisu TL 528 (viz tab. 3.4). K měření tloušťek jednotlivých vrstev galvanického pokovení byl využit opět optický mikroskop Zeiss Axio Imager M2.

Vybrané díly byly označeny zjednodušeným popiskem OK1 a OK2. „Okrasná tvarová lišta levá“ byla označena popiskem OK1 a „okrasná tvarová lišta pravá“ označena popiskem OK2. Oba dva díly byly ve stejných pozicích příčně rozříznuty a z dílů byly vyříznuty vzorky o délce $20 \div 30$ mm. Jednotlivé pozice vyříznutých vzorků byly označeny písmeny **A** a **B**, viz obr. 3.45. Na vyříznutých vzorcích byly připraveny metalografické výbrusy, které byly zapouzdřeny do fotopolymeru a metalograficky vybroušeny korundovými a SiC kotouči.

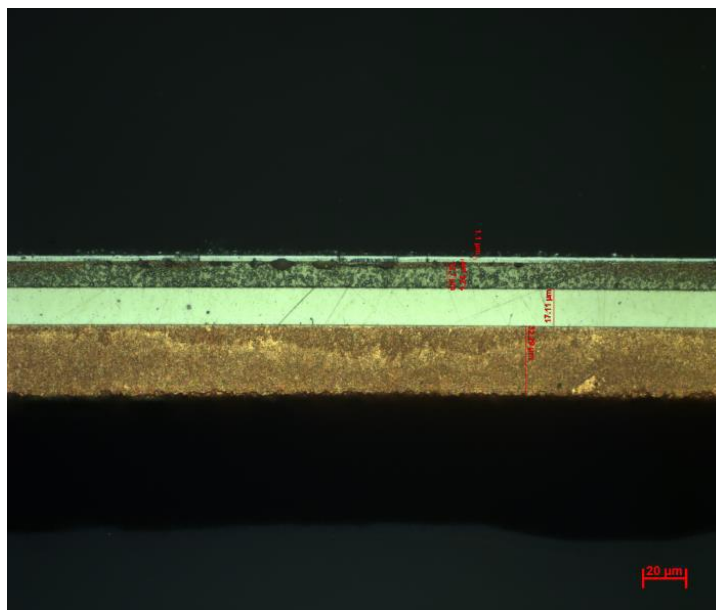


Obr. 3.45: Galvanicky pokovený díl OK2 s vyznačenou polohou vyříznutých vzorků

Měřením se získaly tloušťky vrstev lesklé mědi, chromu, pololesklého, lesklého a mikroporézního niklu. Naměřené hodnoty vyříznutých vzorků druhé tvarovací série jsou uvedeny v tab 3.7.

Tab. 3.7: Naměřené tloušťky jednotlivých vrstev

Vzorek		Tloušťka vrstvy [μm]				
Označení	Místo	Lesklá měď	Pololesklý nikl	Lesklý nikl	Mikroporézní nikl	Chrom
OK1	A	45,22	17,15	12,02	2,60	1,15
	B	31,55	13,03	10,10	1,22	0,85
OK2	A	43,18	14,60	11,95	2,45	1,24
	B	29,25	12,55	9,77	1,08	0,72



Obr. 3.46: *Náhled tloušťek vrstev výbrusu – vzorek OK1, místo A, zvětš. 500x (SM)*

Naměřené tloušťky u dílů OK1 a OK2 odpovídají toleranci normy TL 528. Při porovnání s díly OK1 a OK2 z první tvarovací série, byly zjištěné mírné rozdíly tloušťek vrstev převážně u lesklé mědi, kde vzorky z druhé série dosáhly větší tloušťky pokovení. Na obr. 3.46 je zobrazen snímek metalografického výbrus dílu OK1 v pozici A.

3.9.4 Klimatická zkouška

Pro klimatickou zkoušku PV1200 byl vybrán jeden pár dílů bez povrchových vad galvanického pokovení. Vybraný pár dílů (2 díly) byl dle vizuálního hodnocení bez delaminace, nečistot a tzv. puchýřů. Díly byly uloženy do klimatické komory (viz obr. 3.47) a vystaveny podmínkám vlhkostně – teplotnímu zatížení dle PV1200, viz kap. 3.5.1.

Při průběhu zkoušky docházelo k průběžným kontrolám mezi jednotlivými cykly a během kontrol nedocházelo k pohledovým deformacím galvanického povlaku. Po ukončení klimatické zkoušky, dokončením dvacátého cyklu, se díly vyjmulý z komory a následně vizuálně zhodnotily. Povrch „okrasné tvarové lišty levé“ i „okrasné tvarové lišty pravé“ nevykazoval žádné vzniklé deformace galvanického pokovení. Výsledný povrch byl bez vzniklé delaminace pokovení a vykazoval vysoký lesk, viz obr. 3.48.



Obr. 3.47: Vybraná „okrasná tvarová lišta levá“ v klimatické komoře



Obr. 3.48: Náhled dílů po expozici při klimatické zkoušce PV1200

4 Diskuse a vyhodnocení výsledků

Vyhodnocení provedených optimalizací technologického procesu vakuového tvarování, které bylo realizováno za účelem zvýšení adheze galvanického povlaku k plastovému dílu, je provedeno na základě získaných experimentálních výsledků. Ty se získaly měřením přilnavosti galvanického povlaku, analýzou uvolnění napětí a mikroskopickým rozbořem naleptaného povrchu. Díly byly dále vyhodnoceny na základě předepsaných zkoušek uvedených v jejich technické dokumentaci odpovídající standardům koncernu VW: TL 528 (měření tloušťek vrstev galvanického povlaku) a PV1200 (zkouška klimatických změn).

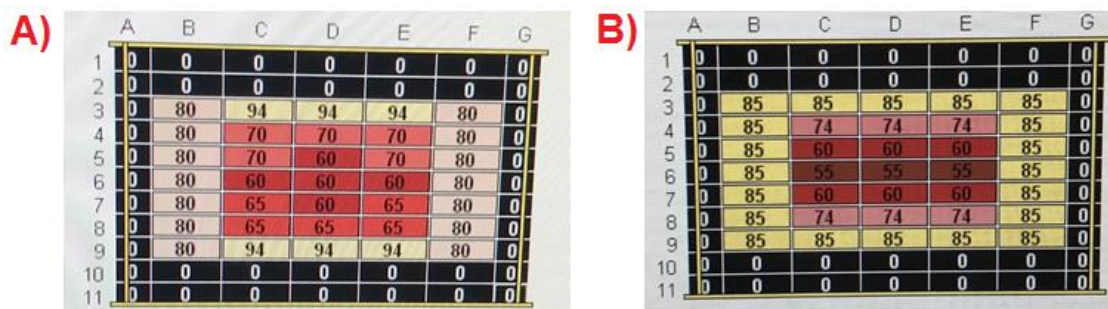
4.1 Vyhodnocení optimalizace technologického procesu za účelem snížení vnitřního napětí dílu

Z důvodu předčasného ukončení klimatické zkoušky u dílů první tvarovací série, vlivem špatné přilnavosti galvanického pokovení k plastovému dílu, byla provedena analýza jejich vnitřní napjatosti, která potvrdila její přítomnost. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k optimalizaci výrobního procesu s cílem minimalizovat vnitřní napjatost výlisků před operací galvanického pokovení.

U dílů první série tvarování byly technologické parametry voleny výhradně za účelem dokonalého vytvarování polotovaru dle tvaru formy. Po odzkoušení technologických parametrů během náběhu výroby, byla následně teplota ohřevu materiálu stanovena na **teplotu 173 °C**. Pro tvarování dílů první série byl **horní ohřev** nastaven na **80 %** svého topného výkonu a **spodní ohřev** na **70 %**. Doba přivedení stlačeného vzduchu, který je potřebný k **předtvarování** ohřátého polotovaru, byla **1,3 s**. Tato hodnota nebyla vhodně zvolena, protože po předtvarování docházelo k velkému tahovému namáhání polotovaru způsobené pohybem formy ze spodní do horní úvratě (viz kap. 3.3), což negativně ovlivňuje vnitřní napjatost dílu.

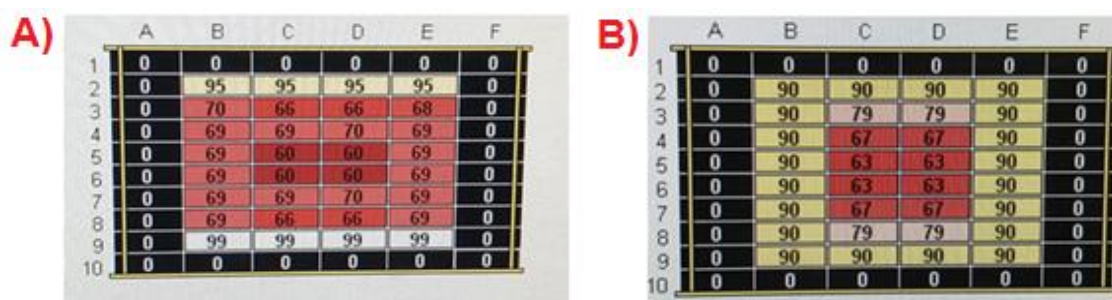
V rámci optimalizace výrobního procesu zůstal horní i spodní ohřev polotovaru totožný jako při první sérii, ale technologické parametry ohřevu byly změněny tak, aby celková **teplota ohřevu** polotovaru byla nižší, přesněji **168 °C**. Provedenou optimalizací došlo ke změně v nastavení topného výkonu horního a spodního ohřevu. Topný výkon **horního ohřevu** byl snížen na **67 %** a naopak **spodní ohřev** byl zvýšen na **85 %**. Provedenou optimalizací topného výkonu došlo ke změně smyslu ohřevu, kdy polotovar byl více

tepelně zatížen na nepohledové straně (spodním ohřevem) a méně na pohledové straně. Optimalizován byl rovněž topný výkon jednotlivých topných těles horního a spodního ohřevu. Tělesa horního ohřevu ve sloupcích B a F byla zvýšena o 5 % svého topného výkonu a tělesa C3, D3, E3, C9, D9 a E9 byla snížena o 9 % topného výkonu, oproti tvarování první série. Směrem ke středu výlisku byla topná tělesa postupně snižována, až na 55 % jejich topného výkonu. Provedenými změnami byla snaha snížit tepelné zatížení pohledové strany polotovaru a rozdělit přivedené teplo do obvodu výlisku (viz obr. 4.1).



Obr. 4.1: Topná tělesa horního ohřevu A) nastavená topná tělesa pro první sérii tvarování, B) topná tělesa pro druhou sérii tvarování s provedenou optimalizací

U spodního ohřevu byl topný výkon těles ve sloupcích B a E shodně zvýšen o 21 % a u těles C2, D2, C9 a D9 byl naopak snížena o 5 %. Tělesa spodního ohřevu C5, D5, C6 a D6 byla směrem ke středu postupně snižována až na 63 % svého topného výkonu (viz obr. 4.2).



Obr. 4.2: Topná tělesa spodního ohřevu tvarovacího lisu A) nastavená topná tělesa pro první sérii tvarování, B) topná tělesa pro druhou sérii tvarování s provedenou optimalizací

Při nevhodně zvoleném krátkém čase přivedení stlačeného vzduchu, který je potřebný pro předtvarování ohřátého polotovaru, docházelo k velkému tahovému namáhání polotovaru pohybem formy. Následnou optimalizací byl při druhé tvarovací sérii čas přivedeného stlačeného vzduchu navýšen o **0,7 s** na **celkový čas 2,0 s**. Po zvýšení množství přivedeného stlačeného vzduchu, byl polotovar předtvarován do vyšší výšky a tahové

namáhání polotovaru povrchem formy bylo minimalizováno. Po optimalizaci předtvarování polotovaru bylo nutné rovněž prodloužit časovou prodlevu mezi předtvarováním a vytvořením vakua. Tato časová prodleva (**zpoždění vakua**) byla při **první sérii** tvarování **2,3 s**, při tvarování **druhé série** byla prodloužena o **0,4 s** na výsledný čas **2,7 s**. Změny v technologických parametrech první a druhé tvarovací série jsou uvedeny v tab. 4.1.

Tab. 4.1: Technologické parametry první a druhé série tvarování

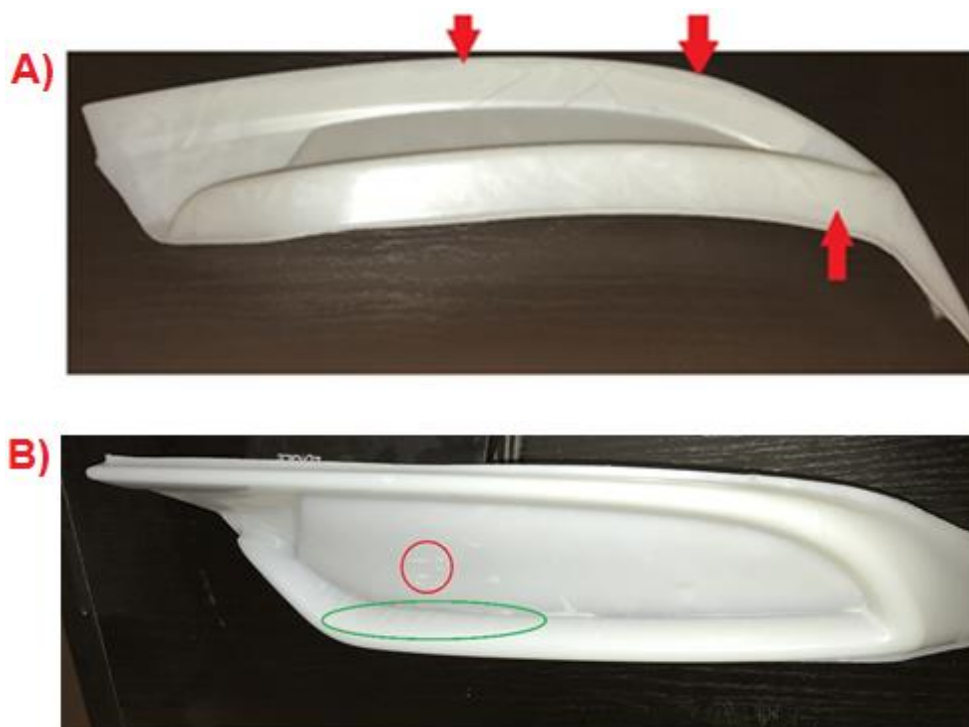
	Ohřev polotovaru	Míra topného výkonu		Doba předtvarování	Zpoždění vakua	Chlazení výlisku
		Horní ohřev	Spodní ohřev			
	[°C]	[%]	[%]	[s]	[s]	[°C]
První série	173	80	70	1,3	2,3	67
Druhá série	168	67	85	2,0	2,7	71
Rozdíl v parametrech	-5	-13	+15	+0,7	+0,4	+4

Důležitou fází provedené optimalizace technologického procesu bylo zavedení **operace žihání** vytvarovaných výlisků z důvodu tzv. „**teplotního vyrelaxování**“ materiálu po jeho tepelném a tlakovém zatížení. Žihání plastových dílů bylo provedeno v **peci** při teplotě **80 °C**, po dobu 25 s bezprostředně po jeho vytvarování. Následně byly díly plynule ochlazovány na teplotu okolí.

Přítomnost vnitřního napětí ve zkušebních vzorcích první a druhé série byla analyzována způsobem ponořování vzorků v **tenzoaktivní látce** (99 % **kyselině octové**). K analýze přítomnosti vnitřního napětí byly vybrány shodně 4 vzorky z první a z druhé série tvarování. Vzorky **první série** vykazovaly **velký výskyt světlých míst a napěťových trhlin**, které indikují přítomnost vnitřního napětí. U jednoho ze vzorků bylo zaznamenáno také jeho **protržení** v oblasti, kde při tvarování vznikla nejmenší tloušťka stěny.

Vzorky druhé série (po provedené optimalizaci technologického procesu) vykazovaly menší výskyt oblastí světlých míst, než vzorky první série (viz obr. 4.3). Světla místa se navíc vyskytovala většinou v místech technologického odpadu vzorku, což neovlivňuje

kvalitu výsledného dílu. Vzorčky po optimalizaci výrobního procesu však stále vykazovaly napěťové trhliny, které se vyskytovaly v oblasti spodní hrany ořezu (viz kap. 3.7). Vnitřní napětí se provedenými optimalizacemi technologického procesu nepodařilo trvale odstranit, výsledkem je však jeho minimalizace. Proto lze provedené optimalizace vyhodnotit jako vyhovující.



Obr. 4.3: Porovnání vzorků po uvolnění napětí A) vzorek první série tvarování s vyznačeným výskytem světlých míst, B) vzorek druhé série tvarování s vyznačeným výskytem světlých míst

4.2 Vyhodnocení přilnavosti galvanického pokovení

Vyhodnocení přilnavosti vzniklého galvanického povlaku bylo provedeno v souladu s normou ČSN EN ISO 2409. Porovnání výsledků přilnavosti galvanického povlaku první a druhé série jsou uvedené v tab. 4.2.

Dle vizuálního hodnocení dosáhly vzorky **první série bez pohledových vad** ve zvolených místech **stupně přilnavosti 2 a 3**. Vyhodnocený stupeň **přilnavosti 2** definuje velice **dobrou přilnavost povlaku**, po odtržení lepicí pásky k základnímu materiálu, stupeň **přilnavosti 3** značí mírné její **snížení**, neboť po odlepení lepicí pásky zůstalo na lepivém podkladu více povlaku. Dle okometrického vyhodnocení vzorků, které obsahovaly **delaminaci povrchu a tzv. puchýře**, dosáhly v uvedených místech **stupně**

přilnavosti 4, který značí nízkou, **nevyhovující přilnavost povlaku** (vzniklých čtverečků mřížky) k základnímu materiálu.

Na vzorcích z **druhé série** byly provedeny mřížkové testy ve stejných pozicích jako u vzorků z první série. Pro zjištění stupně přilnavosti byly vybrány díly bez pohledových vad galvanického pokovení. Vybrané díly dosáhly ve zvolených místech obdobných **stupňů přilnavosti 2 a 3**. Provedenými optimalizacemi technologického procesu tvarování nebylo dosaženo zlepšení přilnavosti galvanického povlaku k plastovému dílu (viz tab. 4.2).

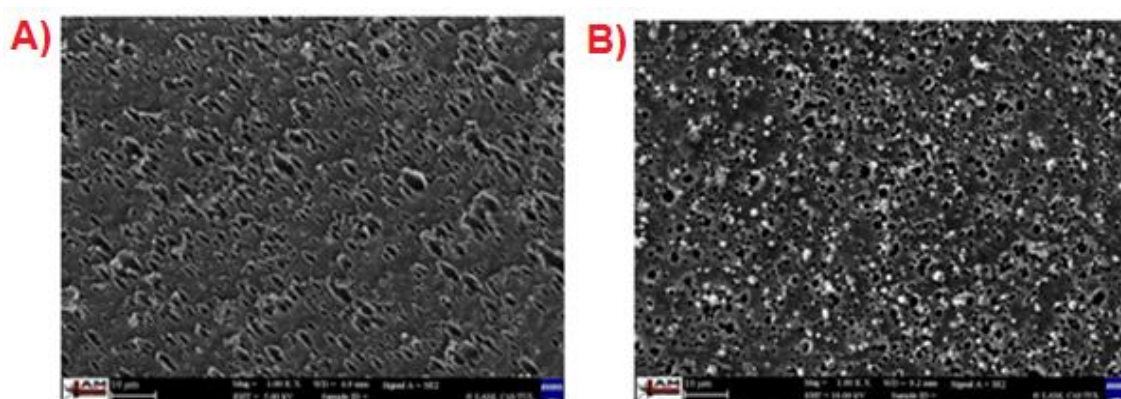
Tab. 4.2: Výsledky přilnavosti galvanického povlaku dle ČSN EN ISO 2409

Vzorek	Stupeň hodnocení dle ČSN EN ISO 2409	
	Pozice A	Pozice B
„Okrasná tvarová lišta pravá“ první série bez pohledových vad	2	3
„Okrasná tvarová lišta pravá“ první série s delaminací povrchu	4	4
„Okrasná tvarová lišta levá“ druhé série bez pohledových vad	2	3
„Okrasná tvarová lišta pravá“ druhé série bez pohledových vad	3	2

Při vstupní kontrole první série pokovených dílů ve firmě Pajr s.r.o., byla procentuální **zmetkovitost pokovené dávky vysoká**. Galvanicky pokovené „**okrasné tvarové lišty levé**“ dosahovaly zmetkovitosti **45 %** a „**okrasné tvarové lišty pravé**“ **53 %**. Během vstupní kontroly galvanicky pokovených dílů druhé série, byla procentuální **zmetkovitost pokovené dávky výrazně nižší** než při první sérii. U pokovených výrobků z **druhé série** byla zmetkovitost „**okrasné tvarové lišty levé**“ **24,8 %** a „**okrasné tvarové lišty pravé**“ **21 %**. Vzhledem k snížení procentuální zmetkovitosti pokovené dávky druhé série, lze provedené optimalizace technologického procesu vyhodnotit jako vyhovující.

4.3 Vyhodnocení analýzy povrchu plastového dílu pod galvanickým pokovením

Analýza povrchu vzorku **první série** (pod galvanickým pokovením) byla provedena v místě vzniklé delaminace a také na vnitřním povrchu galvanického povlaku. Po provedení rozboru naleptaného povrchu vzorku **první série**, byla zjištěna **nízká plošná hustota** vzniklých **kavern**. Pro přilnavost galvanického pokovení mají kaverny zásadní vliv, ne-li nejdůležitější. Nízká plošná hustota naleptaných kavern byla způsobena velkým vnitřním napětím v plastovém dílu a vzniklou silnou zámraznou vrstvou, která brání v naleptání jeho povrchu kyselinou chromsírovou. Při důkladné mikroskopické analýze byla zjištěna také nízká, **hloubka naleptaných kavern** a celková absence složek chemického niklu. Tyto složky by se při správné nebo minimální přilnavosti povlaku k základnímu materiálu ABS, měly na jeho povrchu udržet i po delaminaci povlaku. Při analýze vnitřní strany povlaku galvanického pokovení byla zjištěna nízká plošná hustota kuliček niklu, které pozičně odpovídaly vyleptaným kavernám na povrchu naleptaného vzorku.

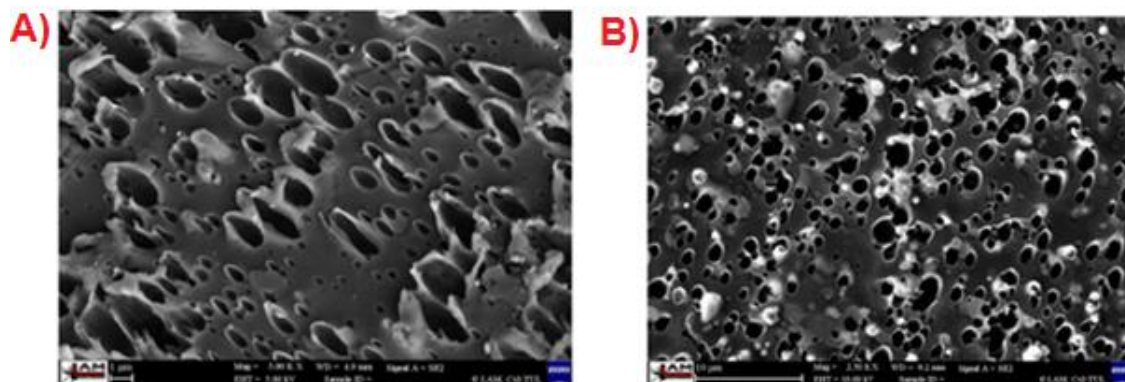


Obr. 4.4: Porovnání naleptání povrchu pod galvanickým pokovením při 1000násobném zvětšení

A) vzorek první série tvarování, B) vzorek druhé série tvarování

K analýze povrchu dílu **druhé série tvarování** byl vybrán galvanicky pokovený díl bez povrchových vad pokovení. Rozborem naleptaného povrchu pod galvanickým pokovením bylo zjištěno **zvýšení plošné hustoty** naleptaných **kavern** oproti vzorkům první série, hloubka vyleptaných kavern byla navíc větší, avšak stále podprůměrná. Ve vzniklých kavernách došlo k sporadickému výskytu chemického niklu, ale jeho plošná hustota byla minimální. Provedenými optimalizacemi technologického procesu se tedy docílilo: **zvýšení plošné hustoty** naleptaných **kavern** a mírného zvýšení jejich hloubky,

kteřá však není stále dostatečná. Porovnání výsledků rozsahu naleptání u vzorku první a druhé tvarovací série je zřejmé z obr. 4.4 a obr. 4.5.



*Obr. 4.5: Porovnání naleptání povrchu pod galvanickým pokovením při 5000násobném zvětšení
A) vzorek první série tvarování, B) vzorek druhé série tvarování*

4.4 Vyhodnocení výsledků měření vrstev pokovení

Vyhodnocení naměřených tlouštěk vrstev galvanického povlaku bylo provedeno v souladu s předpisem VW TL 528. Naměřené hodnoty jednotlivých tlouštěk vrstev u dílů první a druhé série tvarování jsou porovnány s požadavky koncernového předpisu v tab. 4.3.

Měření vrstev galvanického povlaku **první série** probíhalo na **dvou dílech bez vady** galvanického pokovení (označeno jako vzorek ok) a na **dvou dílech** se vzniklou **delaminací povrchu** (označeno jako vzorek nok). U vzorků druhé série bylo měření provedeno pouze na dílech bez povrchových vad. Měřeny byly jednotlivé složky galvanického povlaku, přesněji lesklé mědi, pololesklé mědi, lesklého niklu, mikroporézního niklu a velikost chromové vrstvy. Průměrné hodnoty naměřených tlouštěk jednotlivých vrstev jsou uvedeny v tab. 4.3. Z výsledků měření tlouštěk vrstev dílu je patrné, že nižších hodnot je dosahováno v pozici měření **B** než v pozici **A**, z důvodu jejího umístění na boční straně dílu, kde zkoumaná plocha není rovná, ale je prohnutá dle požadovaného tvaru. U dílu s **povrchovými vadami** tloušťky vrstev **neodpovídají** požadavkům dle TL 528, **OK** díly první a druhé série požadavkům koncernového předpisu **odpovídají**.

Tab. 4.3: Průměrné tloušťky vrstev galvanického povlaku porovnané s předpisem TL 528

Vzorek		Tloušťka vrstvy [μm]				
Označení	Místo	Lesklá měď	Pololesklý nikl	Lesklý nikl	Mikroporézni nikl	Chrom
OK 1. Série	A	31,92	17,67	12,22	1,18	1,06
	B	27,29	13,02	9,96	0,92	0,65
NOK 1. Série	A	23,05	12,99	8,19	0,82	0,75
	B	19,80	11,02	7,25	0,75	0,65
OK 2. Série	A	44,20	15,87	11,90	2,53	1,19
	B	30,40	12,80	9,93	1,15	0,77
TL528		≥ 25	$\geq 7,5$	$\geq 7,5$	$\geq 0,8$	$\geq 0,5$

Při porovnání průměrných tlouštěk **druhé série** a **první série**, došlo k zvýšení tlouštěk vrstev u lesklé mědi, mikroporézniho niklu a chromu. U vrstvy **lesklé mědi** v pozici **A** je tloušťka po optimalizaci technologického procesu větší až o **12 μm** a v pozici **B** dokonce o **13 μm** . Vrstvy **lesklého** a **pololesklého niklu** byly naopak **vyšší** u **dílů první série**, ale výsledný rozdíl byl nepatrný, kromě pozice **A** vrstvy **pololesklého niklu**, kde byl rozdíl **1,8 μm** .

Vlivem provedených optimalizací technologického procesu došlo k výraznému zvětšení tloušťky první vrstvy galvanického pokovení (**lesklé mědi**), která se po moření nanáší na povrch základního materiálu.

4.5 Vyhodnocení vlivu klimatických změn

Vyhodnocení zkoušky klimatických změn galvanicky pokovených dílů bylo provedeno v souladu s předpisem VW PV1200. Zkouška byla vyhodnocena vizuálně a výsledky dílů první a druhé série tvarování jsou zobrazeny na obr. 4.6.

Dle výkresové dokumentace galvanicky pokovených dílů musí zkouška proběhnout v rozsahu 20 cyklů a výsledek musí být bez zjevných pohledových vad. Vlivem velkého

vnitřního napětí ve zkoušeném dílu a špatné adheze galvanického povlaku k základnímu materiálu byla zkouška u dílů první série tvarování předčasně ukončena. Na zkoušených dílech došlo vlivem teplotně – vlhkostních změn k značné delaminaci galvanického pokovení, na rozdíl od dílů, které byly galvanicky pokovovány po provedených změnách v technologickém procesu vakuového tvarování. Tyto díly byly po ukončení 20 cyklu bez zjevných vad pokovení a bez delaminace povrchu. Vzhledem k pozitivnímu zjištění průběhu a výsledku zkoušky, lze konstatovat že provedené technologické optimalizace procesu vakuového tvarování byly vhodně zvoleny za účelem zvýšení přilnavosti galvanického povlaku.



Obr. 4.6: Porovnání dílů po provedených klimatických zkouškách PVI200
A) galvanicky pokovený díl první série po 10 cyklech, B) galvanicky pokovený díl druhé série po 20 cyklech

5 Závěr

Hlavním cílem diplomové práce byla optimalizace technologického procesu vakuového tvarování plastových dílů z produkce firmy Pajr s.r.o. za účelem zvýšení přilnavosti galvanického povlaku k jejich povrchu a úspěšného absolvování předepsaných zkoušek. Teoretická část se zabývá popisem technologie vakuového tvarování a galvanického pokovování plastových dílů. Experimentální část diplomové práce se zaměřuje na popis současného stavu, analýzu neshodných dílů a optimalizací technologického procesu vakuového tvarování z hlediska požadované kvality při následném galvanickém pokovení dílu.

Na dílech, které byly vyrobeny při současném nevyhovujícím stavu, byly dle technické dokumentace provedeny požadované zkoušky odpovídající předpisům PV1200 a TL 528. Při první vlhkostně – teplotní zkoušce PV1200 došlo k velké delaminaci povrchu dílu a vlivem nízké adheze galvanického povlaku k plastovému dílu došlo k jeho „zvrásčení“. Následným měřením vrstev galvanického povlaku dle předpisu TL 528 se zjistilo, že díly s delaminací povlaku dosahují nevyhovujících rozměrů tloušťek jednotlivých vrstev. Na vybraných dílech byly provedeny mřížkové testy dle normy ČSN EN ISO 2409, které posuzují přilnavost povlaku k povrchu plastového dílu. Kvalitativně shodné díly dosahovaly vyhovujícího stupně přilnavosti 2 a 3, neshodné díly s delaminací povlaku dosahovaly stupně hodnocení 4 a nevyhovují požadavkům daného předpisu. V důsledku nízké přilnavosti povlaku byla na ploše plastového dílu pod galvanickým pokovením provedena mikroskopická analýza povrchu. Naleptaný povrch plastového dílu dosahoval nízké plošné hustoty vzniklých kavern a jejich nízké hloubky, pravděpodobně v důsledku přítomnosti vnitřního napětí v dílech, které bylo detekováno expozicí v tenzoaktivním prostředí (99 % kyselině octové). Z tohoto důvodu byly navrženy a realizovány úpravy technologického procesu vakuového tvarování včetně zařazení technologické operace – žíhání do poslední fáze výrobního procesu. Žíhání vytvarovaných výlisků bylo realizováno v peci při teplotě 80 °C po dobu 25 s. Vyžíhané vzorky byly následně exponovány tenzoaktivnímu prostředí pro detekci vnitřní napjatosti dílu a ověření vhodnosti provedených změn při jejich výrobě. Vzorky po optimalizaci vykazovaly menší výskyt vnitřního napětí, proto byly následně podrobeny analýzám hodnocení kvality galvanického povlaku. Optimalizace výrobního procesu se pozitivně projevila

také ve snížení zmetkovitosti dílů po galvanickém pokovení (z původních cca 49 % na cca 23 %).

Z experimentálního měření lze konstatovat, že optimalizováním technologického procesu vakuového tvarování a jeho parametrů se docílilo snížení vnitřního napětí v plastových dílech a splnění požadavků dle technické dokumentace výrobku, tzn. dosažení odpovídajících tloušťek jednotlivých vrstev galvanického povlaku (které byly ve většině případů větší než u původního řešení) a jeho dobré adheze po klimatickém namáhání. Vnitřní napětí se nepodařilo odstranit úplně, podařilo se jej však minimalizovat. Analýzou povrchu dílu pod galvanickým pokovením, bylo zjištěno, že po optimalizaci výrobního procesu jsou kaverny na povrchu dílu ve větší plošné hustotě (v důsledku snížení vnitřní napjatosti dílu), jejich hloubka je mírně větší než u původního řešení, ale není stále zcela vyhovující.

Použitá literatura

- [1] LENFELD, Petr. Katedra strojírenské technologie [online]. Liberec [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/08.htm
- [2] DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0617-6.
- [3] Geiss: one step ahead [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.geiss-ttt.com/>
- [4] Formech: Vacuum Forming Machines [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://formech.com/>
- [5] ŘEHULKA, Z. Konstrukce výlisků z plastů a forem pro zpracování plastů. SEKURKON s.r.o., 226 s. ISBN 80-86604-28-4.
- [6] R. ROSEN, Stanley. A HISTORY OF THE GROWTH OF THE THERMOFORMING INDUSTRY: Chapter I Thermoforming Pioneers 1930-1950 [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://thermoformingdivision.com/wp-content/uploads/History_of_thermoforming_chap1.pdf
- [7] BĚHÁLEK, Luboš, Pavel BRDLÍK, Martin BORŮVKA a Irena LENFELDOVÁ. Úvod do technologií zpracování plastů. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2019. ISBN 978-80-7494-460-4.
- [8] SOVA, Miloš. Negativní, pozitivní a kombinované způsoby tvarování plastů: Mechanické předtvarování [online]. 2015 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/negativni-pozitivni-a-kombinovane-zpusoby-tvarovani-plastu-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqQUkSFod1GxnXoGLJOvipM/>
- [9] Úvod do technologií zpracování plastů. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2019, s. 130. ISBN 978-80-7494-460-4.
- [10] TECHNOLOGIE VÝROBY PLASTŮ: POLOTOVARY Z PLASTŮ A JEJICH ÚPRAVA. https://download.spstrplz.cz/automatizace_vyrobnych_procesu/5_prednasky_KA5/13_TECHN_VYR_PLASTU.pdf [online]. [cit. 2020-06-04].
- [11] AUSPERGER, Aleš. Technologie zpracování plastů [online]. Liberec, 2015 [cit. 2020-06-04]. ISBN 978-80-88058-77-9. Dostupné z: <https://publi.cz/books/183/Impresum.html>
- [12] KREBS, J.: Teorie a technologie zpracování plastů. Liberec : TU v Liberci, 1981. ISBN 55-823-80
- [13] GRUENWALD, P.E., Thermoforming, A Plastic Processing Guide, USA, Technomic Publishing Company, 1998 ISBN 1-56676-625-7

- [14] FLORIAN, James. Practical thermofforming [online]. California, 1996 [cit. 2020-06-04]. ISBN ISBN 0-8247-9762-0.
- [15] OBR, Ladislav. Technologie pro povrchové úpravy: Funkční chromování. MM Průmyslové spektrum [online]. 2008, 23.04.2008, 66 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/funkcni-chromovani.html>
- [16] OBR, Ladislav a Jaromír VRBATA. Dekorativní chromování bez sloučenin šestivalentního chromu [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22016/dekorativni-chromovani-bez-sloucenin-sestivalentniho-chromu.html>
- [17] Souhrn rozhodnutí Evropské komise týkajících se povolení k uvedení na trh za účelem použití a/nebo k použití látek uvedených v příloze XIV [online]. 2006 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/udeleni_povoleni_latek_na_trh/\\$FILE/oer-rozhodnuti_povoleni_21-20170726.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/udeleni_povoleni_latek_na_trh/$FILE/oer-rozhodnuti_povoleni_21-20170726.pdf)
- [18] Přední a zadní chromové lišty. In: OB Autodíly [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.obautodily.cz/nahradni-dily-dle-modelu-vozu/skoda-octavia-iii/listy-prahove--bocni--zadni/predni-a-zadni-listy/>
- [19] BARTOVSKÁ, Jana. KATALYZOVANÉ REAKCE [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://old.vscht.cz/fch/cz/pomucky/bartovska/Kin-teorie/6-KatalyzovaneReakce.pdf>
- [20] ŠUBERT, Lubomír. Funkce a vliv předúprav na konečnou kvalitu galvanického povlaku [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-22016/funkce-a-vliv-preduprav-na-konecnou-kvalitu-galvanickeho-povlaku.html>
- [21] STEIDL, Josef. Žihání termoplastů. MM Průmyslové spektrum [online]. 2020, 20.4.2020 [cit. 2020-06-04].
- [22] PODZIMEK, Petr. Interní dokumentace firmy FUNCHEM. Liberec, 2010.
- [23] Kovo Finiš: Galvanické linky [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://kovofinis.cz/galvanika>
- [24] Ekomaziva s.r.o.: ZÁVĚSY PRO GALVANIZACI A ANODIZACI [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://www.ekomaziva.cz/zavesy_galvanizece
- [25] NOVÁK, Jan. Interní dokumentace firmy FISCHER. Liberec, 2018.
- [26] P-LAB: KYSELINA CHROMSÍROVÁ [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: https://www.p-lab.cz/katalog/kyselina-chromsirova_1743p
- [27] Investice.cz: Cennější než zlato. Cena palladia vystoupala na historické maximum [online]. 2019 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.investice.cz/cennejsi-nez-zlato-cena-palladia-vystoupala-na-historicke-maximum/>
- [28] Technical Data Sheet: UDIQUE 879 W ACTIVATOR. 2009.

- [29] ENTHONE S.R.O. Technical Data Sheet: UDIQUE 8810 ACCELERATOR. 2010..
- [30] ENTHONE S.R.O. Technical Data Sheet: UDIQUE 891. 2009.
- [31] ENTHONE S.R.O. Technical Data Sheet: CUPROSTAR™ IC. 2009.
- [32] ENTHONE S.R.O. Technical Data Sheet: CUPROSTAR™ 1560. 2011.
- [33] ENTHONE S.R.O. Technical Data Sheet: ELPELYT E 10 X. 2009.
- [34] ENTHONE S.R.O. Technical Data Sheet: ELPELYT ® LS 1. 2009.
- [35] ENTHONE S.R.O. Technical Data Sheet: UDIQUE 8810 ACCELERATOR. 2010.
- [30] ENTHONE S.R.O. Technical Data Sheet: UDIQUE 891. 2012.
- [31] ENTHONE S.R.O. Technical Data Sheet: CUPROSTAR™ IC. 2009.
- [32] ENTHONE S.R.O. Technical Data Sheet: CUPROSTAR™ 1560. 2011.
- [33] ENTHONE S.R.O. Technical Data Sheet: ELPELYT E 10 X. 2010.
- [34] ENTHONE S.R.O. Technical Data Sheet: ELPELYT LS 1. 2010.
- [35] ENTHONE S.R.O. Technical Data Sheet: DUR-NI 4000. 2009.
- [36] ENTHONE S.R.O. Technical Data Sheet: ANKOR 1120 R. 2009.
- [37] ENTHONE S.R.O. Technical Data Sheet: ABS RT1669 NATUR. Weiden, 2013.
- [38] ALFUN: Hliníkové plechy a pásy [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <http://www.alfun.cz/hlinik>
- [39] Geiss: Thermoformmaschinen [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.geiss-ttt.com/produkte/thermoformanlagen>
- [40] Fischer surface technologies: Kontakt [online]. [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.fischer-surface.cz/firme/skupina-fischer/>
- [41] PV1200. Testing for Resistance to Environmental Cycle Test (+80°C/-40)°C. 2004.
- [42] TL 528. Chrome-Plated Plastic Parts: Material Requirements. 2008.
- [43] ČSN EN ISO 2409. Nátěrové hmoty - Mřížková zkouška. 2013.
- [44] ANDRŠOVÁ, Zuzana. Interní dokumentace firmy FUNCHEM. Liberec, 2015.