



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



Vliv parametrů předtvarování fólie na kvalitu tvarově složitých dílů u technologie IMD

Disertační práce

Studijní program: P2303 – Strojírenská technologie
Studijní obor: 2303V002 – Strojírenská technologie
Autor práce: **Ing. Pavel Petera**
Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering



The Influence of Foil Preforming on Parts Quality in Case of Complex Parts Produced by IMD Technology

Dissertation

Study programme: P2303 – Engineering Technology
Study branch: 2303V002 – Engineering Technology

Author: **Ing. Pavel Petera**
Supervisor: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Disertační práce

ve studijním oboru

2303V002 Strojírenská technologie

se zaměřením na

Zpracování plastů

na

Katedře strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

Vliv parametrů předtvarování fólie na kvalitu tvarově složitých dílů u technologie IMD

Dissertation thesis

**The influence of foil preforming on parts quality in case of
complex parts produced by IMD technology**

Autor: Ing. Pavel Petera

Vedoucí katedry: Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.

Školitel: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Rozsah práce a příloh:

Počet stran: 117

Počet obrázků: 63

Počet tabulek: 6

Počet příloh: 2

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

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

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé disertační práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Anotace

Téma práce: Vliv parametrů předtvarování fólie na kvalitu tvarově složitých dílů u technologie IMD

Disertační práce se zabývá novou technologií IMD s předtvarováním (transferový typ), která umožňuje vysoce produktivní dekoraci dílů přímo ve vstřikovací formě. Technologie IMD s předtvarováním je alternativou k technologii IML, oproti které dosahuje výrazné snížení nákladů a naopak v porovnání se standardní technologií IMD umožňuje výrobu daleko složitějších tvarů. Téma práce je zaměřeno na hodnocení vlivu vybraných parametrů předtvarování na průběh deformace IMD fólie s přihlédnutím k výsledné kvalitě dílů charakterizované výskytem vad.

Měření experimentu práce probíhalo na velkoplošném IMD dílu se složitým tvarem, za použití IMD fólie s vysokým leskem a materiálu PC/ABS. Za účelem studia deformací před i po vstřikování byla vyvinuta a ověřena vlastní metodika zahrnující nový způsob tisku rastru na IMD fólii. Díky tomuto bylo možné kvantifikovat i deformaci, která vznikla během vstřiku. Pro hodnocení vlivu vybraných parametrů na kvalitu dílů byl hodnocen výskyt vad v různých oblastech dílu.

Téma bylo řešeno v souladu s SGS 21122.

Klíčová slova: IMD, předtvarování, transferový typ, deformace během vstřikování, výskyt vad

Annotation

Topic of dissertation: The influence of foil preforming on parts quality in case of complex parts produced by IMD technology

Presented dissertation is aimed on new technology IMD with pre-forming (transfer type), which allows highly productive decoration of injection-molded part directly in injection mold. IMD with pre-forming is an alternative to commonly used IML but when compared together IMD with pre-forming has a clear advantage in strong cost reduction according to IML. Additionally complexity of feasible shape is much higher in the case of IMD with pre-forming compared to standard IMD. This thesis is focused on evaluation of pre-forming parameters influence on foil deformation during IMD process but as well parts quality characterised by fault presence.

Experiment has been done on large and complex IMD part by using hi gloss IMD foil and PC/ABS resin. For the purpose of deformation study was developed and verified new process which included a new way of geometric pattern printing on IMD foil which allowed to evaluate also deformation which happened by melt flow during injection molding process. For evaluation the influence of pre-forming parameters on parts quality was presented own approach of faults presence evaluation.

The topic has been solved under the terms of solution of research program SGS 21122.

Keywords: IMD, preforming, transfer type, deformation during back-injection, faults presence

Poděkování:

Zde bych rád poděkoval všem, kteří mne při psaní práce podporovali a její psaní vůbec umožnili. Nerad bych na někoho zapomněl, ale nelze nezmínit ty, jimž patří největší poděkování.

Děkuji své manželce za obrovskou trpělivost, podporu a toleranci k psaní disertační práce při mém časově velice náročném zaměstnání.

Svému malému synkovi děkuji za psychickou podporu a trpělivost, kterou mi od narození poskytoval.

Dále bych velice rád poděkoval svému školiteli prof. Dr. Ing. Petru Lenfeldovi za cenné rady a doporučení nejen v průběhu psaní disertační práce, ale i v průběhu celého studia.

Rovněž bych rád poděkoval všem zainteresovaným ve společnosti Magna Exteriors & Interiors (Bohemia) s.r.o. za umožnění provedení experimentálního měření této práce a obecně za vstřícnost a pochopení.



OBSAH

1	ÚVOD	11
2	REŠERŠE SOUČASNÉHO STAVU PROBLEMATIKY	13
3	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	13
4	TECHNOLOGIE IMD	14
4.1	Standardní technologie IMD	15
4.2	Technologie IMD s předtvarováním	18
4.3	Teorie předtvarování IMD fólie	20
4.4	Teoretické proměnné předtvarování IMD fólie	23
4.4.1	Koncept předehřevu	24
4.4.1.1	Ohřev IMD fólie topným panelem z keramických článků	24
4.4.1.2	Ohřev IMD fólie topným panelem s IR trubicemi	26
4.4.2	Intenzita a doba předehřevu	27
4.4.3	Doba dochlazení fólie	30
4.4.4	Velikost vakua	31
4.5	Teorie zastříkování předtvarované IMD fólie	32
4.6	Technologie IML	39
4.7	Rešerše metod pro hodnocení deformace tenké fólie	41
5	VÝZKUM V OBLASTI TECHNOLOGIE IMD	44
5.1	Charakteristika materiálu	44
5.1.1	Materiál pro vstřikování zkušebních těles	44
5.1.2	IMD fólie pro výrobu zkušebních těles	46
5.2	Vstřikovací nástroj	46
5.3	Vstřikovací stroj a jeho dovybavení pro technologii IMD	49
5.3.1	Odvíjecí zařízení na IMD fólii	50
5.3.2	Systém na ohřev fólie	50
5.3.3	Vakuový systém	52
5.3.4	UV pec na vytvrzování dílů	52
5.3.5	Čisté prostředí v oblasti stroje	53





5.4	Nastavení výchozích technologických parametrů na stroji při vstřikování zkušebních dílů	53
5.4.1	Určení výchozích vstřikovacích parametrů	53
5.4.2	Určení výchozího konceptu a parametrů předtvarování	55
5.5	Volba parametrů pro výzkum vlivu kombinace intenzity a doby předehřevu	56
5.6	Volba parametrů pro výzkum vlivu velikosti vakua	57
5.7	Volba parametrů pro výzkum vlivu doby dochlazení fólie	58
6	PROCES MĚŘENÍ	60
6.1	Vytvoření metodiky pro studium deformací fólie na IMD dílech	60
6.1.1	Vývoj metody tvorby rastru na IMD fólii	60
6.1.2	Vytvoření metodiky hodnocení předtvarované fólie před zastříknutím	65
6.1.3	Návrh hodnocení vzorků s rastrem po zastříknutí	67
6.2	Způsob provedení kvalitativní analýzy	69
6.3	Návrh statistického vyhodnocení naměřených dat	71
6.3.1	Statistické vyhodnocení deformační analýzy	71
6.3.2	Statistické vyhodnocení kvalitativní analýzy	72
6.4	Vyhodnocení zkoumaných vlivů předtvarování IMD fólie	74
6.4.1	Vyhodnocení celkové deformace elementů IMD fólie pro veškeré proměnné veličiny	75
6.4.2	Vyhodnocení vlivu kombinace intenzity a doby předehřevu	80
6.4.3	Vyhodnocení vlivu velikosti vakua	88
6.4.4	Vyhodnocení vlivu dochlazení fólie	90
6.4.5	Vyhodnocení vlivu velikosti deformace během vstřikování na výskyt vad	93
7	DISKUZE VÝSLEDKŮ	97
8	ZÁVĚR	104
8.1	Přínos pro vědu	106
8.2	Přínos pro praxi	106
8.3	Doporučení k pokračování disertační práce:	107
9	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	108
10	SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA DISERTAČNÍ PRÁCE:	112
11	SEZNAM PŘÍLOH	115

Seznam zkratk a termínů

Řecké symboly

Zkratka	Význam	Jednotka
α	Úhel příkroستی plochy na díle (vůči rovině fólie)	[°]
ϵ_{celk}	Poměrná deformace elementu (celková)	[-]
ϵ_v	Poměrná deformace elementu (dosažená vstřikem)	[-]
ϵ_T	Poměrná deformace elementu (dosažená tvarováním)	[-]
Δl_{pos}	Posuv rastru fólie	[mm]

Latinské symboly

Zkratka	Význam	Jednotka
D	Průměr výrobku	[mm]
H	Výška výrobku	[mm]
H ₀	Hypotéza statistického vyhodnocení (parametry jsou nezávislé)	
H ₁	Hypotéza statistického vyhodnocení (parametry jsou závislé)	
L _v	Velikost hrany rastru po vstřikování (směr udán dodatečným indexem x/y)	[mm]
L _T	Velikost hrany rastru po tvarování (směr udán dodatečným indexem x/y)	[mm]
L _p	Natisknutá velikost hrany rastru (směr udán dodatečným indexem x/y)	[mm]
NOK _x	Podíl neshodných výrobků	[-]
p ₁	Tlak vzduchu v dutině formy před otevřením ventilu (barometrický tlak)	[Bar]
p ₂	Tlak vzduchu v zásobníku vakua před otevřením ventilu	[Bar]
P _{fz}	Tlak na začátku tvarování	[Bar]
s	Výběrová směrodatná odchylka	
SC _x	Průměrný počet vad na díle	[-]
T	Testová statistika	
T _g	Teplota skelného přechodu	[°C]
T _f	Teplota viskózního toku	[°C]
T _{fl}	Úroveň prohřátí fólie (pouze pro účely srovnání s referenční hodnotou)	[-]
T _m	Teplota tání krystalů	[°C]
t _w	Teplota temperace nástroje	[°C]
V _f	Objem dutiny formy	dm ³
V ₀	Objem potrubí mezi vakuovým ventilem a dutinou formy	dm ³
V _z	Objem zásobníku vakua a přilehlé hadice až k vakuovému ventilu	dm ³
y ₀	Vzdálenost mezi hranou dělicí roviny a linií rastru v definovaném bodě po natvarování, ale před vstřikem	[mm]
y ₁	Vzdálenost mezi hranou dělicí roviny a linií rastru v definovaném bodě po natvarování, ale po vstřiku	[mm]
z	Vzdálenost mezi fólií a paralelním elementem na povrchu tvárnice	[mm]



Technické zkratky/výrazy

Zkratka	Význam	Jednotka
„A tvar“ výrobku	Vzhledová plocha výrobku	
ANOVA	Analýza rozptylu	
ASA	Acrylonitril Styren Akrylát	
„B tvar“ výrobku	Nevzhledová plocha výrobku	
DS	Dýzová strana stroje	
ETFE	Ethen - Tetrafluorethen	
Feeder	Odvíjecí zařízení na IMD fólii	
FIM	Film Insert Molding (Technologie zastříkování insertů ve formě tenké fólie)	
Flakes	Drobné částičky samostatné tisknuté vrstvy	
IMD	In Mold Decoration (Technologie zastříkování fólie transferového typu)	
IML	In Mold Labeling (Technologie zastříkování insertů ve formě tenké fólie)	
Insert	Tenká fólie vkládaná do vstřikovací formy	
MFR	Melt Flow Rate – index toku taveniny (hmotnostní) g/10min	g/10min
MVR	Melt Volume Flow Rate – index toku taveniny (objemový) cm ³ /10min	cm ³ /10min
OS	Odjížděcí strana stroje	
PC	Polykarbonát	
PS	Polystyrén	
PC/ABS	Blend Polykarbonát/ Akrylonitrilbutadienstyren	
PET	Polyethylen tereftalát	
PMMA	Polymethylmethakrylát	
SEM	Rastrovací elektronový mikroskop (Scanning Electron Microscope)	

1 Úvod

Přestože sahá historie syntetických plastů pouze do začátku 20. století, tak od svého vynalezení a první aplikace, prošly tyto materiály výraznou evolucí. Po absolvování několika stádií této evoluce a nasazení plastů do prakticky všech komodit jsou nyní hledány aplikace, kdy použití plastu přinese kromě splnění standardních požadavků i zvýšenou přidanou hodnotu výrobku. V poslední době tedy není kladen důraz pouze na funkčnost plastových výrobků při zachování různých vlastností, ale např. i na vysoce jakostní vzhled výrobku [8], [9].

I při aplikaci drahých a speciálních materiálů v kombinaci se standardními technologiemi, (vstřikování, vytlačování aj.) jsou vzhledové vlastnosti výchozích plastových výrobků značně omezeny (např. dezén) a je třeba přistupovat k nasazení speciálních technologií pro jejich zušlechťování. Takovéto zušlechťování povrchů plastů pak může plnit pouze estetický účel, nebo poskytnout i vyšší funkcionalitu [3], [1].

Jelikož jsou některé technologie zušlechťování plastových povrchů velmi nákladné a zároveň jsou na výrobky kladeny čím dále vyšší nároky, tak se neustále vyvíjejí nové technologie, které dosahují vysokou jakost povrchu, a zároveň jsou vysoce produktivní.

Jednou z takovýchto technologií je i technologie IMD (transferový typ – dále jen IMD), která zajišťuje dekorování dílů přímo ve vstřikovací formě při vlastním vstřikování a prakticky bez pracných předcházejících operací. Ve standardní variantě je technologie vhodná pouze pro tvarově nenáročné a rovinné díly, jako jsou kryty mobilních telefonů, či kryty notebooků [15].

Z výše uvedeného důvodu došlo dvěma hlavními výrobci IMD fólií k vyvinutí „hlubokotažných“ IMD fólií, které díky své vyšší flexibilitě umožňují zařazení „předtvarování fólie“ přímo v nástroji a tím pádem výrobu i tvarově složitějších dílů [41], [45].

Obecně je zejména z důvodu malého rozšíření a patentové ochrany o technologii IMD s předtvarováním velmi malé povědomí a též odborná literatura se touto technologií prakticky nezabývá.

Případnému rozšíření mezi výrobci dílů v plastikářském průmyslu brání i fakt, že vzhledem k tomu, že technologie je velmi nová, tak ani nástrojárny nemají s konstrukcí IMD nástrojů dostatečné zkušenosti a ani technické zázemí na jejich zkoušení. Možností pro potenciální zájemce z řad zpracovatelů plastů, je pak velmi



často jen stavba prototypových nástrojů za účelem validace vyrobitelnosti tvaru.

I v těchto případech zde samozřejmě zůstává jistá míra nejistoty dobrého výsledku, dále značné náklady vynaložené na stavbu prototypového nástroje, a v neposlední řadě hraje roli též časový aspekt.

Alternativně lze samozřejmě volit pro dekoraci výrobků ve vstřikovací formě některou ze srovnatelných a více známých technologií (např. IML), to však přináší zvýšení procesních kroků a nárůst ceny výrobků.

Pro případného zájemce o vědecký výzkum v oblasti IMD je naopak složité dostat vzorky fólií k těmto účelům (možnou příčinou jsou obavy výrobce fólií z odhalení přesné kompozice fólie či srovnání vlastností s konkurencí), zajistit potřebné nákladné vybavení, nebo výzkumu též brání značná omezení v publikovatelnosti tohoto tématu kvůli smlouvám o utajení s výrobcí fólií.

Mou snahou je, aby tato technologie byla dostatečně teoreticky popsána, vstoupila v povědomí a byl shromážděn soubor poznatků, který by stanovil hranice této technologie a případně rozšířil její možnosti či praktické aplikace.

Zároveň bych byl rád, kdyby se zvýšil i zájem vědecké společnosti o toto téma, kde je stále velmi vysoký počet témat k řešení a mnoho nových potenciálů, kam lze směřovat výzkum v oblasti této technologie.

Pevně věřím, že tato disertační práce, která se přímo zabývá technologií IMD s předtvarováním, tomuto alespoň částečně přispěje.

2 Rešerše současného stavu problematiky

Na základě důkladné literární rešerše knih i vědeckých článků v dostupných databázích bylo zjištěno, že se v současné době v odborné literatuře nevyskytuje popis komplexní problematiky předtvarování tenké fólie, s následným přenosem dekorační vrstvy na výrobek, v průběhu vstřikování. Byly nalezeny pouze 2 články, které okrajově zmiňují možnost předtvarování transferové IMD fólie před zastříknutím (viz [13] a [17]), avšak žádný z nich se nezabývá studiem deformace, jejího průběhu, či efekty na kvalitu výrobků v procesu IMD s předtvarováním. Z výše uvedeného důvodu bylo v literární rešerši třeba čerpat především z publikovaných výsledků vědecké činnosti v oblasti technologií s podobnými prvky a principy. Mezi tyto lze například uvést: standardní IMD (bez předtvarování), IML, technologie tvarování, či technologie vstřikování. Je třeba ovšem zmínit, že vzhledem k odlišnosti technologie IMD s předtvarováním od výše zmíněných rešeršovaných technologií, je u mnoho faktů pouze předpokládána platnost i pro IMD. Výsledky literární rešerše jsou pak uvedeny v textu následujících kapitol včetně odkazů na jednotlivé zdroje.

3 Cíle disertační práce

V souvislosti s rešerší současného stavu problematiky ke zvolenému tématu byly určeny cíle disertační práce. Hlavním cílem disertační práce, je výzkum vlivu vybraných parametrů předtvarování fólie, na průběh její deformace, s přihlédnutím ke kvalitě hotových dílů.

Hlavní cíl je členěn do následujících dílčích cílů:

1. Na základě literární rešerše analogických procesů k technologii IMD s předtvarováním teoreticky popsat technologii IMD s předtvarováním včetně vlivů a jevů, které mohou ovlivňovat deformaci fólie a kvalitu dílů.
2. Provést výzkum průběhu deformace fólie za různých parametrů předtvarování na zvoleném IMD díle.
3. Na základě provedených výzkumných činností provést vyhodnocení vlivu parametrů předtvarování a dosažené deformace na kvalitu tvarově složitého velkoplošného dekorovaného dílu zhotoveného technologií IMD.

4 Technologie IMD

Technologie IMD (In Mould Decoration – Dekorování ve vstřikovací formě), kterou se tato disertační práce především zabývá, spočívá v dekorování dílů pomocí tištěného tenkého filmu, který se přenáší z nosné fólie na díl přímo během vstřikování uvnitř dutiny vstřikovací formy. Při otevírání formy se pak oddělí díl včetně dekoračního filmu od „nosné“ fólie. V některých literaturách (např. [20], nebo [27]) je tímto názvem nesprávně označována technologie FIM (Film Insert Molding), či IML (In Mold Labeling). Proto vzniklo několik zkratk, které upřesňují, že jde o dekorování pomocí filmu (tisknuté vrstvy), který se přenáší z nosné fólie. Jako příklad lze uvést IMD TR (transfer - přenos), IMD „roll to roll“ (fólie prochází skrz formu z jedné role na druhou) či IMD „endless foil“ (délka použité fólie je oproti vkládanému insertu téměř nekonečná).

Technologie se používá zejména na díly s vysoce jakostním povrchem a středními požadavky na odolnost povrchu dílu (např. interiérové automobilové díly, kryty mobilních telefonů). Pro exteriérové použití tyto díly nejsou často bez dalších úprav vhodné (je předurčeno vlastnostmi fólie a požadavky na plnění příslušných norem odolnosti). Lze dekorovat i relativně složité grafiky v několikabarevném provedení, či kombinaci s vakuově metalizovaným povrchem (chromované nápisy atd.). Interiérové díly určené pro automobilový průmysl jsou schopné plnit náročné testy (např. dle normy TL 226). Výrobce si veškeré podrobnosti složení IMD fólie pečlivě střeží, ale na Obr. 1 je zobrazena přibližná kompozice dle [49], kterou popisuje i Melhorn [17] :

1. PET nosič o tloušťce 30-75 μ m [17], který dle požadované aplikace může vykazovat různou tažnost.
2. Oddělovací vrstva (tzv. release layer) je vrstva, která po aktivaci teplem umožní oddělení tisknuté vrstvy na výrobku od pevně upnutého nosiče. Základním principem správného oddělení je to, že adheze tisknuté vrstvy k výrobku musí být vyšší, než k PET nosiči.
3. Průhledná ochranná vrstva zajišťující ochranu před poškrábáním a dalšími vnějšími vlivy (tzv. hardcoat), která může být i UV vytvrditelná (vyšší odolnost při zachování vysoké procesní tvárnosti).
4. Dekorační vrstva, která určuje výsledný vzhled fólie. Dle dekoru a kryvosti jednotlivých vrstev je tvořena obvykle několika tištěnými vrstvami.

5. Adhezní vrstva, která po aktivaci teplem zajistí adhezi mezi zbytkem tisknuté vrstvy a plastovým výrobkem.

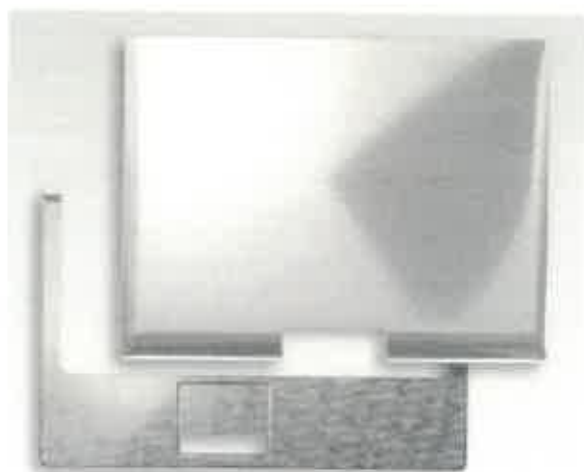


Obr. 1 Schéma složení IMD fólie [49]

Změnou použitého nosiče a složením tisknutých vrstev lze fólii přizpůsobit tvarové složitosti dílu a podle ní též zvolit variantu technologie. Technologii IMD rozdělujeme na tzv. standardní IMD a IMD s předtvarováním fólie.

4.1 Standardní technologie IMD

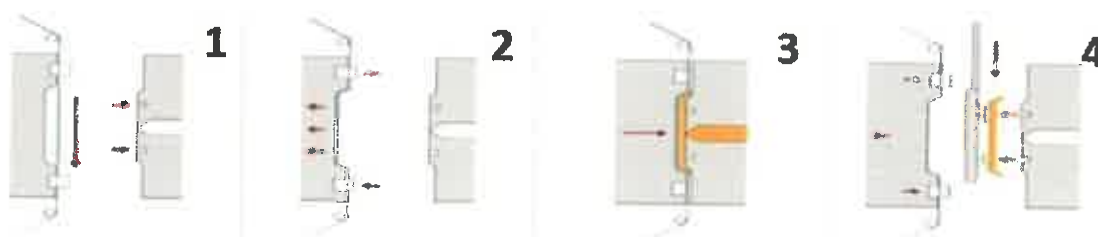
Standardní technologie IMD je vhodná pro díly rovinné povahy, kde rozdíl mezi nejvyšším a nejnižším místem dílu v „z“ ose bývá zpravidla do 5 mm [17]. Použití se tímto omezuje na výrobky, jako jsou kryty notebooků, tabletů a telefonů, nebo rovinné panely či lišty v automobilech či domácích spotřebičích (pro představu příklad znázorněn na Obr. 2).



Obr. 2 Typické díly vyráběné standardním IMD [41]

Základní princip technologie IMD popisuje Zhang-Li [34], nebo je uveden v [45] či v [17]. Princip IMD vychází z technologie vstřikování, s tím rozdílem, že na straně „A povrchu“ dílu prochází před lícem formy IMD fólie, která je do formy podávána automatickým odvíjecím zařízením, přičemž po každém zdvihu, kdy dojde během vstřikování k přenosu tištěných vrstev z nosné fólie na výrobek, je třeba odvinout fólii o jeden krok, který odpovídá délce dílu a nutné technologické přesahy. K omezení shrnutí fólie a minimalizace objemu vzduchu mezi fólií a lícem formy (kvůli riziku proražení fólie taveninou) je rovněž před vstřikováním fólie upnuta k formě a předepnuta pomocí vakua.

Jednotlivé kroky procesu jsou znázorněny na níže uvedeném obrázku (Obr. 3) a jejich sled je uveden pod obrázkem:

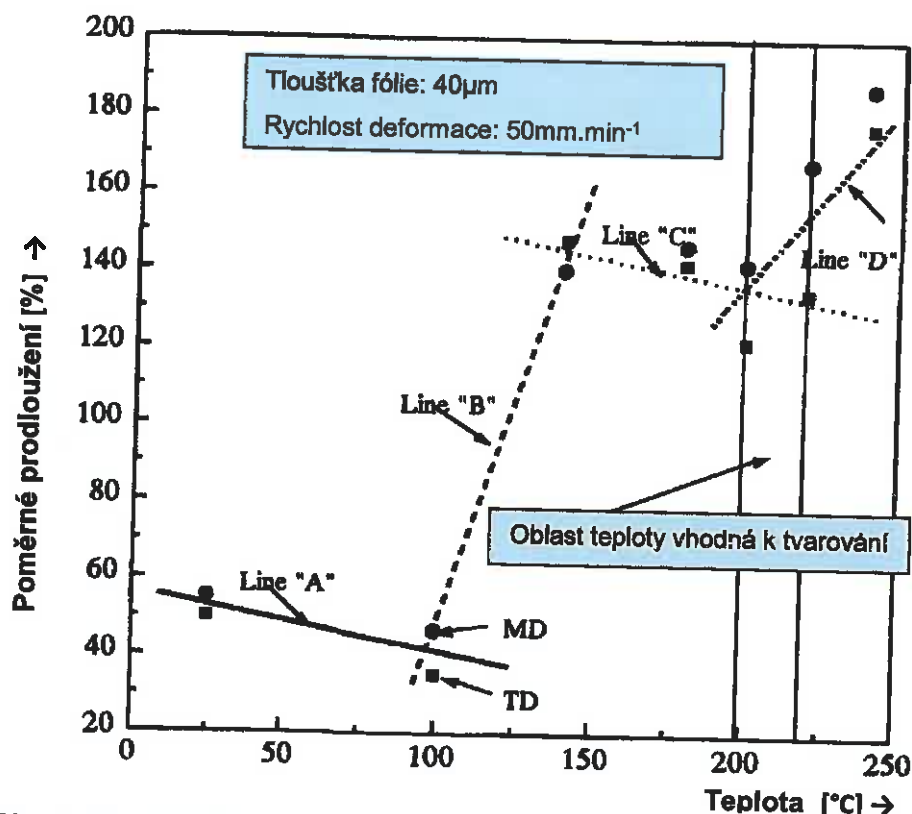


Obr. 3 Jednotlivé kroky IMD technologie [45], kde:

1. Zajištění vyhadzovačů se současným převinutím fólie
2. Zajištění upínacího rámečku a zapnutí vakua, které zajistí předepnutí fólie
3. Zavírání formy, vstřikování, dotlak, chlazení
4. Otevření formy (tím tedy i oddělení dekoračního filmu od nosné fólie), vyjetí vyhadzovačů a rámečku, který upíná IMD fólii, odebrání dílu

Vzhledem k omezeným deformačním schopnostem fólie za běžných teplot dochází při pouhém „předepnutí“ fólie vakuem k nedotvarování větších oblastí dílu, zejména menších radiusů, rohů, či koutů výrobku. Tyto oblasti je třeba dotvarovat postupem taveniny při vstřikování [17], což umožní jednak prohřátí fólie od taveniny a tím zvýšení tažnosti a navíc tlak taveniny, který je mnohokrát vyšší, než maximální dosažitelný tlak vakua. Wong 0 se zabýval tahovými vlastnostmi transferových IMD fólií na PET nosiči a zjistil, že dosažitelné poměrné prodloužení není přímo úměrné teplotě, jak jsem předpokládal, ale vykazuje různé chování při různých teplotách (viz Obr. 4). Vzhledem k teplotám, kterou má tavenina standardního materiálu pro technologii IMD při vstřikování (260-290°C pro PC/ABS s podílem cca 65% PC) je

dle jeho výzkumu dosažitelné prodloužení relativně velké. Na druhé straně jeho výzkum řeší pouze dosažitelné poměrné prodloužení zkušební fólie do jejího porušení v temperované komoře zkušebního zařízení a již neřeší optické vady, které mohou vznikat nadměrným protažením, nebo reálné tvarování pomocí taveniny, při kterém nemusí být fólie v momentě tvarování prohřáta na stejnou teplotu jako tavenina.



Obr. 4 Vliv dosažitelného poměrného prodloužení v závislosti na teplotě u IMD fólie s PET nosičem tl. 40µm

Z tohoto důvodu nelze na základě dostupných prací s jistotou předpovědět, kde je hraniční deformace, kterou lze dosáhnout vstřikem včetně okrajových podmínek. Wong 0 rovněž zkoumal, že dosažitelná deformace je ovlivněna její rychlostí. Vzhledem k faktu, že tavenina teče „cestou nejmenšího odporu“ a tvar výrobku není vždy symetrický, tak nelze zaručit, že rychlost taveniny ve všech nedotvarovaných místech je vždy stejná. Nejen z výše uvedeného důvodu je technologie vhodná spíše pro menší hloubky výrobku, kde je dotvarování vstřikem minimální. Řešení, jak dosáhnout mírných 3D tvarů u standardní IMD je popsáno v [28], kde je doporučeno použít v uvažovaném tvaru co největší radiusy a pozvolné přechody k zamezení

nadměrné lokální deformace fólie vstřikem. Hraniční hodnota deformace ani rádiusů pro tento případ však není zmíněna.

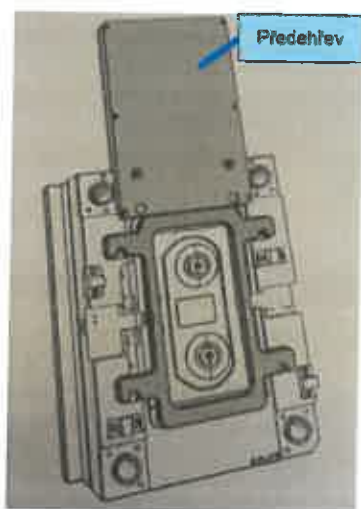
4.2 Technologie IMD s předtvarováním

Tato technologie je vhodná pro tvarově složitější výrobky, které již nelze vyrobit standardní technologií IMD. V literatuře však není stanovena jasná hranice, kdy již nelze použít standardní technologii IMD, proto se často řeší empiricky. Ačkoliv jde o velmi novou technologii, tak jsou již na trhu výrobky, které tuto technologii aplikují. Příkladem lze uvést ozdobnou lištu palubních desek automobilů (viz Obr. 5).



Obr. 5 Příklad výrobku s aplikací IMD s předtvarováním

Popis předehřevu fólie pouze okrajově uvádí Melhorn [17], který ukazuje příklad měděné desky umístěné nad tvárnici jako součást vstřikovací formy, přičemž během celého předchozího cyklu je fólie předehřívána (viz Obr. 6).



Obr. 6 Koncept fixního předehřevu pro IMD díly (upraveno dle [17])

Jsou vyzdvihnuty výhody v úspoře délky výrobního cyklu, ale nevýhody v omezení délky dílu (dáno vzdáleností mezi odvíjecím zařízením a nástrojem) a zchladnutí fólie před tvarováním (během převíjení a upnutí rámečkem). Degradace fólie ani její smrštění není řešeno, pravděpodobně je kompenzováno snížením teploty zdroje, což však vede k nízkému prohřátí fólie.

Pokud vycházíme z předpokladu popsaného v kap 4.1, že fólie je předepnuta pomocí vakua, pak dle [45] je možné pro zvýšení flexibility zařadit mobilní předehřev fólie před jejím „předepnutím“ vakuem, což považuji za lepší způsob předtvarování, neboť kromě nepatrného prodloužení cyklu dojde k vyřešení výše popsaných nedostatků dle [17] a poskytnutí mnohem širších možností předehřevu.

Vzhledem k požadované specifické rychlosti tvarování fólie taveninou, (s přihlédnutím k práci Wonga 0) je rovněž předpokládáno, že při aplikaci předehřevu a následnému tvarování vakuem před vstřikováním, lze dosáhnout vyšší kontrolovatelnosti procesu, než při samotném tvarování taveninou.

Vzhledem ke konstrukci vstřikovacích nástrojů, lze toto předtvarování téměř výhradně aplikovat principem podobným principu negativního tvarování. Vzhledem k faktu, že vakuové kanálky nelze z důvodu proznačení na vzhledové ploše umístit do „A tvaru“ výrobku, může pak být předtvarování fólie v hlubších místech či místech s menším rádiusem a jiných detailech nedokonalé a musí být opět stejně jako u standardní IMD dokončeno pohybem taveniny při vstřikování.

V souvislosti s tvarem výrobku je tedy třeba volit i konstrukci vstřikovacího nástroje, který plní funkci nejen vstřikovacího, ale i tvarovacího nástroje a soustředit se zejména na uspořádání prostoru pod fólií (hloubka – vzdál. mezi fólií a daným místem „A tvaru“, natočení, umístění vakuových kanálků a vlastní šířka prostoru, kde se může fólie tvarovat atd.). Toto není v literatuře pro IMD zmíněno a je třeba vycházet ze znalostí z tvarování plastů s omezením v možném umístění vakuových kanálků.

V kontextu s jednotlivými kroky standardní IMD technologie uvedenými v kap 4.1 (popsané pod Obr. 3) tedy bude krok č. 2 odlišný o předehřev fólie, který způsobí tvarování fólie po zapnutí vakua. Jednotlivé fáze technologie IMD s předtvarováním jsou zobrazeny a popsány na Obr. 7.



Obr. 7 Jednotlivé kroky technologie IMD s předtvarováním (upraveno dle [45]) kde:

1. Zajetí vyhazovačů se současným převinutím fólie
2. Zajetí upínacího rámečku, předehřev fólie pomocí panelu umístěném na robotu (příp. jiném odjížděcím mechanismus), zapnutí vakua, které zajistí předtvarování upnuté fólie do tvárnice vložky.
3. Zavírání formy, vstřikování, dotlak, chlazení
4. Otevření formy (tím tedy i oddělení dekoračního filmu od nosné fólie), vyjetí vyhazovačů a rámečku, který upíná IMD fólii, odebrání dílu

Jelikož však není v literatuře popsána hranice deformace, kde standardní IMD fólie vykazuje vady tisknuté vrstvy, je třeba počítat s nasazením fólie, která má flexibilnější tisknutou vrstvu a nosič, umožňující dosažení vyšší deformace. Standardní IMD fólie lze pro tuto technologii použít pouze v omezené míře [45]. V době psaní této práce dodávali flexibilnější fólii pro předtvarování pouze výrobci na světě a to

a Kurz Stiftung Fürth (DE). Jednotlivé aspekty technologie IMD s předtvarováním jsou dále zmíněny v následujících kapitolách.

V textu následujících kapitol jsou popsány i předpokládané mechanismy vzniku některých vad, které vycházejí z rešerše, nebo z teoretických zákonitostí.

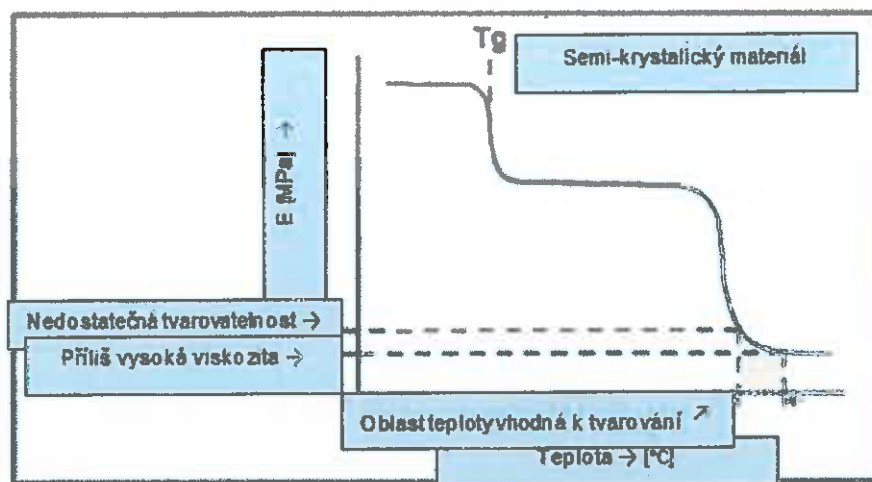
4.3 Teorie předtvarování IMD fólie

Na základě rešerše z oblasti tvarování a vstřikování plastů i teoretických znalostí, lze problematiku předtvarování IMD fólie popsat následovně:

Během předtvarování dojde k jednostrannému zahřátí fólie na teplotu vhodnou pro tvarování (viz Obr. 8) a po spuštění vakua dojde k postupnému tvarování fólie směrem k tvárnici, neboť na obou stranách fólie je rozdílný tlak tím i rozdílná síla působící na fólii a výslednice sil je tedy zřejmá.

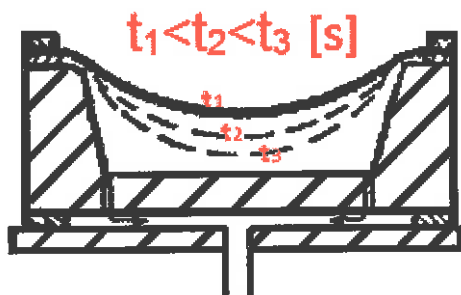
V případě technologie IMD je vycházeno z negativního principu tvarování s tím rozdílem, že vakuové kanálky nelze umisťovat do viditelných ploch výrobku, neboť by se proznačily. Ve snaze dokonale dotvarovat oblast „A tvaru“ výrobku, aniž by došlo k předčasnému utěsnění vakuové drážky postupující fólií, je třeba umístit

vakuovou drážku s kanálky vně dělicí roviny, v těsné blízkosti „A tvaru výrobku“.



Obr. 8 Rozsah teplot vhodných k tvarování semi-krystalického plastu (přeloženo dle [1])

Pro ukázkou je na níže uvedeném obrázku (viz Obr. 9) zobrazeno postupné negativní tvarování fólie v různém čase, které koresponduje s principem použitým u IMD.



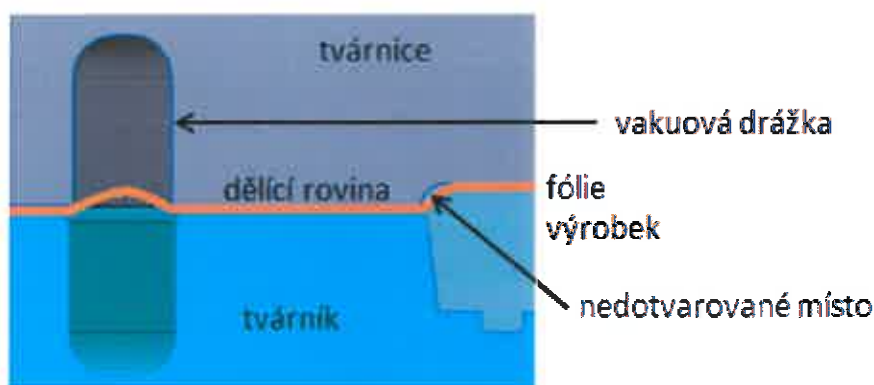
Obr. 9 Vliv času tvarování na průhyb fólie v případě negativního tvarování fólií (upr. dle 0)

Na výše uvedeném Obr. 9 lze rovněž vidět, že v průběhu „volného“ tvarování fólie zaujímá řez fólie přibližný tvar části kružnice, jejíž poloměr se s dosaženou hloubkou tahu zmenšuje a příkrost v oblasti mezi středem a krajem řezu tvarované fólie se rovněž zvyšuje. Tohoto lze s výhodou použít k tvarování fólie do příkřejších částí výrobku, pokud je vhodně zvolena vzdálenost roviny fólie od nejhlubšího místa a šířka oblasti, kde se fólie může volně tvarovat. Toto je však, kromě vlastního tvaru výrobku, velmi závislé na správném napolohování „A tvaru“ dílu vzhledem k rovině fólie, které nemůže být vzhledem k prvkům „B tvaru“ dílu libovolné, neboť odformování vzniklých podkosů je třeba např. pomocí šikmých vyhazovačů a nemusí

být vždy možné.

Přes výše popsanou konstrukci nástroje však zpravidla dochází k nedotvarování fólie do oblastí s menším rádiusem nebo pod menším úhlem stýkajících se ploch. Toto je postřehnutelné i po prohlédnutí předtvarované fólie před vlastním vstřikováním.

Velmi typickým příkladem je místo těsně u dělicí roviny, kde je fólie často (pokud končí díl malým rádiusem) nedotvarovaná okolo celého výrobku. Toto je názorně ukázáno na Obr. 10.



Obr. 10 Průběh fólie v okolí dělicí roviny s detailem nepředtvarovaného místa

Další názorný příklad je uveden na Obr. 11, kde je snímek z termokamery FLIR bezprostředně po tvarování a díky tomu, že nedotvarovaná fólie není tak intenzivně ochlazována povrchem tvárnice (sdílení tepla vedením), tak dosahuje vyšší teploty, než dokonale dotvarované oblasti (vyšší teplota je znázorněna tmavší barvou).



Obr. 11 Ukázka nedotvarovaných oblastí IMD fólie pomocí IR kamery

Vzhledem k výše popsanému, je tedy zřejmé, že pokud takovéto nedotvarované oblasti na díle vzniknou, dojde k jejich dotvarování postupem taveniny při vstřikování.

Je předpoklad, že vlivem horší kontrolovatelnosti tvarování pomocí taveniny, jsou tato místa velmi riziková a mohou zde vznikat různé vady, zejména proražení fólie taveninou. I z tohoto důvodu je důležité se soustředit na téma předtvarování fólie.

Žádná dostupná literatura se rozbořem předtvarování a problematikou nedotvarovaných oblastí u technologie IMD („transferový typ“) nezabývá, přitom je předpoklad, že má zásadní vliv na kvalitu dílů. Téma předtvarování IMD fólií a jeho vliv na kvalitu dílů je i z tohoto důvodu hlavním tématem této disertační práce. Tématem teorie předtvarování IMD fólie se hlouběji zabývá kapitola 4.4 z hlediska proměnných procesu.

4.4 Teoretické proměnné předtvarování IMD fólie

V předchozí kapitole 4.3, byly částečně probrány teoretické proměnné předtvarování IMD fólie, ale v kontextu s tématem disertační práce je potřeba tyto více popsat zejména s ohledem na uvažovaný koncept technologie IMD s předtvarováním. Kvůli značným nevýhodám již není koncept předeřevu popsán Melhornem [17] dále uvažován. Na základě literární rešerše a teoretického rozboru problematiky tvarování fólií a jejich zastříkování je předpokládáno, že následující parametry předtvarování mají zásadní vliv na kvalitu IMD dílů:

Parametry týkající se systému předeřevu:

- Koncept předeřevu (tepelný zdroj)
- Doba a intenzita předeřevu (včetně její regulace napříč dílem)
- Doba dochlazení fólie před vstříkváním

Parametr týkající se systému vakua:

- Velikost vakua

Detailnějšímu popisu těchto proměnných se věnují následující kapitoly (viz kap. 4.4.1 až kap. 4.4.4). K výše uvedeným bych rád okrajově zmínil teplotu formy, která má rovněž, dle rešerše v oblasti technologie tvarování, nezanedbatelný význam na předtvarování, ale vzhledem ke specifikům technologie IMD, kde příliš nízká teplota formy může znamenat nedostatečnou adhezi tisknuté vrstvy k tavenině, a vysoká pak vadu wash-out, se nastavení zpravidla omezuje na jedinou teplotu, případně velice úzké pole teplot, proto není vliv teploty temperace formy v kontextu s předtvarováním IMD dále popisován.

4.4.1 Koncept předeřevu

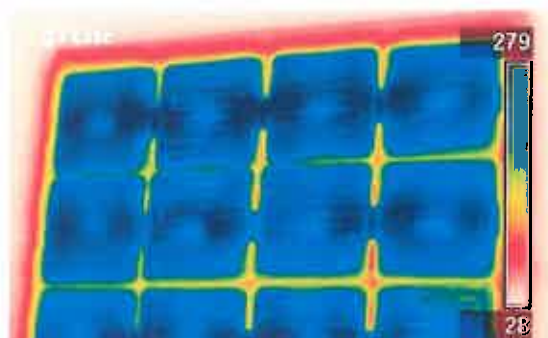
Jak již bylo zmíněno v kapitole 4, předeřevem fólie je dosaženo nejen snazší tvarovatelnosti fólie, ale zejména umožněno dosažení vyšší deformace, která je zapotřebí pro kopírování složitějších tvarů, neboť velikost deformace dosažitelné vstřikem je limitována.

Vzhledem k povaze ohřívání fólie a okolnostem procesu, jako je např. maximální čas předeřevu, či možná vzájemná poloha zdroje tepla a fólie, v podstatě dochází k omezení použitelných zdrojů tepla na sálavé. Zde lze opět hledat analogii s technologií tvarování fólií/tenkých desek, kde jsou jednotlivé zdroje tepla popsány v dostupné literatuře. Např. Schmidt [23] se věnoval porovnávání jednotlivých způsobů ohřevu polystyrénové fólie, kde do svého výzkumu zařadil jak dlouhovlnné keramické zářiče (vlnová délka 3-5 μm), které označil za nejpoužívanější, tak i trubicové zářiče s kratší vlnovou délkou (0,76-2 μm), které naopak na základě jeho experimentu vyšly jako energeticky efektivnější a rychlejší, rozdíl v homogenitě pole však nebyl hodnocen. Webster [31] se rovněž věnoval popisu jednotlivých zdrojů tepla pro technologii tvarování a zmiňoval ohřev pomocí keramických článků a IR trubic jako nejčastěji používaný a vzhledem k výhodám jednotlivých řešení i obecně za rovnocenný, což je potvrzeno i z rešerše dokumentace běžných tvarovacích strojů na tvarování fólií, používaných na předtvarování fólií u technologie IML (alternativou k IMD) [40], [44].

Oba zmíněné zdroje sálavého tepla mají tedy své kladné i záporné vlastnosti a v kapitole 4.4.1.1 - 4.4.1.2 jsou detailněji popsány. V dostupné literatuře jsou však téměř výhradně hodnoceny vlivy předeřevu na jednovrstvou fólii bez složitého potisku, oproti tisknutým vrstvám IMD fólie. Z tohoto důvodu nejsou dostupné informace zcela vyčerpávající pro předeřev tenké transferové IMD fólie.

4.4.1.1 Ohřev IMD fólie topným panelem z keramických článků

Při aplikaci ohřevu fólie pomocí keramických článků na technologii IMD, lze těžit z možnosti spolehlivé regulace jednotlivých pásem a nastavení teploty, která může být regulována vestavěnými termočlánky, neboť dle [31] a [37] dochází k slábnutí záření s časem provozu a je třeba ho kompenzovat. Rovněž homogenita teplotního pole je díky plošné povaze článků dobrá (viz Obr. 12). Pokud je třeba lokálně zvýšit teplotu, lze jednoduše navýšit teplotu pouze jednoho, či několika článků.

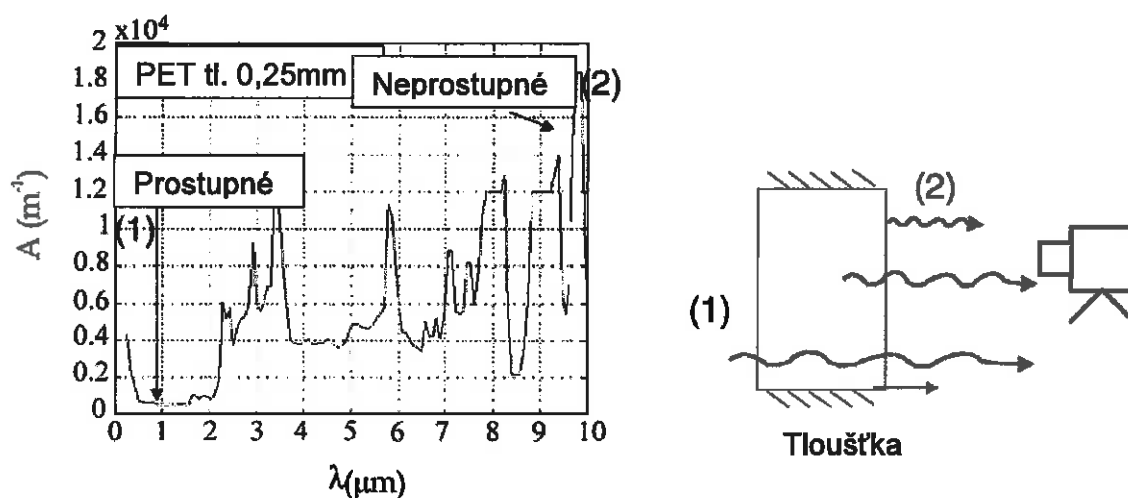


Obr. 12 Snímek homogenity topného panelu s keramickými články z termokamery FLIR

Vzhledem k relativně nižší teplotě tohoto zdroje je třeba k dostatečnému prohřátí fólie použít kratších vzdáleností mezi zdrojem a fólií a rovněž delších časů.

Na druhé straně je zde předpoklad, že při nižších teplotách zdroje sálavého tepla nebude docházet k nadměrnému tepelnému zatížení a s ním související degradaci tisknuté transferové vrstvy.

S přihlédnutím k relativně delší vlnové délce emitovaného záření ($3-5 \mu\text{m}$), je předpoklad, že dle níže uvedené absorpční charakteristiky PET (nosič IMD fólie – viz Obr. 13), bude docházet k menšímu prostupu záření, než u krátkovlnných zářičů. Na druhou stranu i přes malou tepelnou vodivost u PET (cca $0,27 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\text{K}^{-1}$) bude za použití delších časů část tepla pohlceného na straně fólie přilehlé tepelnému zdroji odvedeno na stranu odlehlou.



Obr. 13 Absorbční charakteristika PET pro různé vlnové délky záření (přeloženo dle [18])

Vzhledem k tepelné kapacitě keramiky je doba ohřevu článků na provozní teplotu až 15 min [37], proto nemůže být pro IMD nasazen tento zdroj tepla v cyklickém režimu.

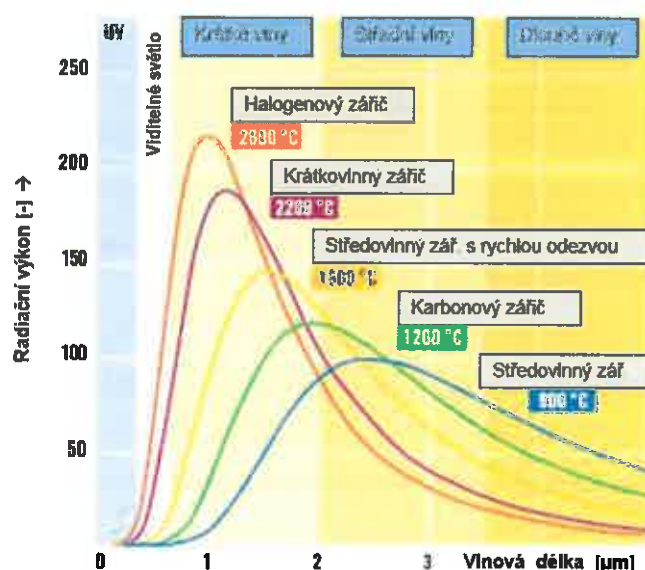
Neustálým zahřátím článků na provozní teplotu však může docházet k přehřívání „čistého prostředí“ kolem stroje, což má negativní vliv na proudění vzduchu s nečistotami, může docházet k ovlivňování vlastností fólie či degradaci polykarbonátových desek opláštění flowboxu. Vyšší hmotnost ohřevu může být obecně rovněž nevýhodou pro rychlé pohyby robota.

4.4.1.2 Ohřev IMD fólie topným panelem s IR trubicemi

V kontextu s předchozí kapitolou (viz kap.4.4.1.1) má toto uspořádání výhody v kratším čase předehřevu fólie, což je podpořeno i lepším prostupem vyzářeného tepla o kratší vlnové délce skrz fólii. Je zde teoretický předpoklad, že fólie může být lépe prohřátá v celém objemu, tedy bude mít lepší předpoklady k rovnoměrnějšímu tvarování [6]. Na druhé straně není prokázáno, zda vysoké teploty krátko až středně vlnných trubicových zářičů, (viz Obr. 14) nemohou i při kratších časech expozice poškodit transferovou vrstvu IMD fólie, přes kterou musí veškeré vyzářené teplo, určené k ohřevu fólie projít.

Ačkoliv Monteix [18] považuje teplotní pole IR zářiče s reflektorem za dostatečně homogenní, tak lze spatřovat nižší homogenitu pole, než u keramických článků.

Díky zpravidla rychlému náběhu zářičů, je lze, při typickém cyklu IMD kolem 70 s, provozovat v cyklickém režimu. Toto má výhodu, v menším zahřátí kabiny flowboxu a s tím souvisejícími vedlejšími účinky na proces popsány v předchozí kapitole.



Obr. 14 Vlnové délky jednotlivých IR zářičů - přeloženo dle [39]

Na druhé straně jistým omezením je skutečnost, že při běžném uspořádání není k dispozici zpětná vazba reálné intenzity zdroje, či teploty fólie. Dle Webstera [31] (uvedeno i v [39]) dochází, stejně jako u keramických článků, ke slábnutí záření během času používání zářiče. Toto slábnutí není nezanedbatelné a není snadné ho kompenzovat. Je možné trubice měnit preventivně a přesto pravidelně kontrolovat jejich slábnutí a kompenzovat prodloužením času předehřevu, což přináší zvýšení pracnosti i nákladů [30], nebo použít složitý a nákladný systém řízení, který daný nedostatek automaticky kompenzuje. Podobný systém popisuje např. Martinec [16], který se zabýval regulací předehřevu galvano formy pro technologii Slush, ohřívané pomocí IR trubicových zářičů a regulované dle teplot ve specifických bodech dané formy. Pro technologii IMD by však nebylo možné použít měření podle termočlánků, nýbrž např. podle pyrometrů snímajících povrch fólie.

Rovněž pokud by bylo třeba lokálně přizpůsobit míru prohřátí určitého místa fólie, pak i při použití většího množství malých zářičů, je to realizovatelné buď nepřesně bez zpětné vazby (např. úpravou intenzity či času předehřevu) nebo pomocí výše použitého zpětnovazebního řízení. Je však nutné podotknout, že ať již probíhá regulace změnou napětí, či zhasínáním zdroje, je doprovázena změnou vlnové délky záření. Zajímavostí je rovněž fakt, že tvar IR trubice může naprosto přesně sledovat např. konturu výrobku a tím optimalizovat předehřev rozdílným potřebám daného případu tvarování.

4.4.2 Intenzita a doba předehřevu

Materiál nosiče IMD fólie je zhotoven z materiálu PET (polyethylentereftalát) a vzhledem k poměru tlouštěk nosiče a tisknutých vrstev (cca 5:1) určuje zásadním způsobem deformační chování celé fólie. Deformační/mechanické vlastnosti jsou závislé na teplotě a u semikrystalického plastu dochází zejména k poklesu mechanických vlastností skokově na teplotě skelného přechodu T_g a teplotě tání T_m (závislé na stupni krystalinity). Rovněž dle Wonga [30], který zkoumal deformační vlastnosti IMD fólie, je dosažitelné poměrné prodloužení, při teplotách nad 200 °C, přímo úměrné teplotě fólie. Lze předpokládat, že fólie bude vykazovat vyšší míru kopírování povrchu tvárnice než méně prohřátá.

Téma „doba předehřevu“ je úzce spjato s „intenzitou zdroje“, neboť dostatečné předehřátí fólie lze dosáhnout jak delší dobou předehřevu při nižší intenzitě zdroje, tak kratší dobou expozice při intenzivnějším zdroji tepla [31]. Níže je uvedené

zjednodušené matematické vyjádření této skutečnosti. Potřebné teplo k ohřevu fólie získáme působením zdroje o výkonu P_R po dobu t . Pokud vycházíme ze Stefan-Boltzmannova zákona a zjednodušíme daný případ na tepelný zdroj s povahou dokonale černého tělesa, pak vyzářený výkon od sálavého zdroje je dán jedinou proměnnou a to teplotou (1).

$$P_R = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot T^4 \quad (1)$$

kde: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$ (Stefanova-Boltzmannova konstanta)

ε - emisivita předmětu (pro dokonale černé těleso $\varepsilon=1$)

T – Teplota [K]

S – plocha zářiče [m^2]

Dobou předehřevu je možno definovat jako dobu, při níž setrvá robot s topným panelem na provozní teplotě v definované vzdálenosti od fólie bez aktivace vakua. Z důvodu efektivity a kapacity výrobního zařízení je reálné výrobě usilováno o co nejkratší dobu předehřevu, na druhé straně příliš intenzivní zdroj, nutný k prohřátí fólie i za kratší dobu, může způsobit degradaci fólie/inkoustu, jiné nežádoucí jevy či jejich zárodky dříve, než dojde k prostupu tepla na stranu fólie od zdroje tepla odvrácenou. Zde je nutné znovu připomenout, že citlivá „transferová“ vrstva, jež se po zastříknutí stane součástí výrobku, je orientována směrem k tepelnému zdroji, proto může dojít velice snadno k jejímu poškození.

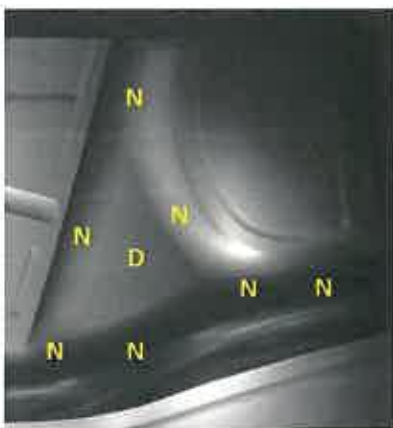
Při nízké intenzitě zdroje tepla dochází, kvůli dosažení stejného prohřátí, k prodloužení doby předehřevu a tím pádem i k prodloužení výrobního cyklu. Dle teoretických předpokladů sdílení tepla dojde ke snížení gradientu teplot ve směru tloušťky fólie a tím homogennějšímu rozložení teplot v celém objemu fólie. Dle Webstera [31] lze podobného efektu dosáhnout i při aplikaci krátké prodlevy mezi předehřevem. Naopak Shelby [24] tvrdí, že při IR ohřevu jednovrstvého materiálu PET je vhodné použít co nejvyšší teplotu zdroje s odpovídající nižší vlnovou délkou, neboť toto poskytuje co největší průnik záření do dílu a případné zkrácení výše popsané prodlevy. Opět vliv na tištěnou IMD vrstvu nebyl zkoumán a dané práce se zabývaly ohřevem mnohem silnějších polotovarů, proto se domnívám, že daná prodleva není pro IMD fólii vhodná, neboť by mohlo dojít vzhledem k extrémně nízké tloušťce fólie k jejímu přílišnému zchladnutí. Naopak předpokládám, že je vhodné s ohřevem v omezeném čase pokračovat i po aktivaci vakua, neboť může pomoci k lepšímu prohřátí míst, která by se nemusela v dostatečné míře dotvarovat vlivem

zchladnutí, či nedostatečného prohřátí. Negativní ovlivnění tištěné vrstvy je rovněž omezené, neboť proces tvarování je velmi rychlý a dotvarovaná fólie se již dotýká tvárnice, která z ní intenzivně odvádí teplo. Tuto dobu setrvání tepelného zdroje při aktivaci vakua lze označit jako dobu dohřevu a není třeba ji považovat za zásadní proměnnou.

Pokud je intenzita zdroje příliš nízká, tak jakkoliv delší dobou ohřevu nemusí dojít k dostatečnému ohřevu fólie a ta pak se nemusí být schopna dostatečně předtvarovat do tvárnice výrobku (nekopíruje tvar dokonale – viz Obr. 15).

Jak již je zmíněno v předchozích kapitolách, může takto nepředtvarovaná fólie způsobit při vstřikování proražení fólie taveninou, což má za následek nejen optickou vadu na výrobku, ale i zpravidla přetržení nosiče při otevírání formy (výrobek zůstává na pevné straně nástroje a fólie je upnuta na pohyblivé) a zejména znečištění formy drobnými částicemi přenášečí vrstvy inkoustů (tzv. flakes).

Jelikož je v uvažovaném konceptu předehřevu pomocí keramických článků, vzdálenost topného panelu od fólie fixní (v automatickém cyklu stroje), tak vlastní intenzita předehřevu je tedy dána pouze teplotou keramických zářičů.



Obr. 15 Značně nedotvarovaná fólie vlivem nízkého prohřátí fólie, kde „N“ vyjadřuje nedotvarovanou oblast a „D“ dotvarovanou oblast

Pokud je předpokládáno jednoduché zapojení IR trubic bez regulace, vyzařované množství tepla je pak po čase stanoveném náběhovou křivkou zahřátí vláknů téměř konstantní [39]. Množství energie, které je fólie v této konfiguraci předehřevu schopna absorbovat je pak ovlivněno jedinou proměnnou a to časem předehřevu. Tento lze definovat stejně jako při použití keramických článků, ale je třeba přihlídnout k tomu, že IR trubice pracují cyklicky a jsou před každým předtvarováním

zapnuty a po předtvarování vypnuty. Dle náběhové křivky použitých zářičů trvá vždy několik sekund, než dojde k zahřátí vlákna na 100%. V této náběhové fázi dochází ke změně vlnové délky zářiče a docházelo by k ohřevu spíše povrchu fólie (Obr. 13). Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, s ohledem na tvar výrobku a v kontextu se zastříkováním může být v různých místech vhodné, přizpůsobit úroveň prohřátí fólie. Pokud jde o individuální dobu předehtěvu, tak vzhledem k setrvačnosti topných elementů by ji bylo v případě keramických elementů prakticky nemožné regulovat (pokud by nebyl daný element fyzicky vzdálen, otočen, zastíněn atd..). Nastavit rozdílnou intenzitu, pro různá místa předehtěvané fólie, však již možné je. Jako hlavní výhoda regulace intenzity předehtěvu napříč předehtěvanou fólií se předpokládá, že v rovinnějších oblastech dílu, lze nastavit intenzitu topných elementů na nižší úroveň a dojde k menšímu tepelnému zatížení fólie, či eliminaci jiných vad. Je zde tedy předpoklad, že snížení intenzity ohřevu fólie v místě, kde její potřebná celková deformace je nižší, bude mít pozitivní vliv na kvalitu dílů. Opačným směrem lze naopak posílit předehtěv v nejvíce exponovaných místech, kde by např. hrozilo proražení fólie postupující taveninou při nedostatečné úrovni předtvarování.

4.4.3 Doba dochlazení fólie

Na základě literární rešerše a teoretických předpokladů je předpokládáno, že fólie má snahu před čelem taveniny tvořit zvlnění, což může způsobit až její přeložení v podobě výrazné optické vady. Z výše uvedeného důvodu byla vyslovena hypotéza, že v kontextu s výsledky výzkumu Shia-Chung Chena [26], nedostatečně dochlazená fólie může vykazovat nižší tuhost, než fólie, která je v celém objemu v rovnováze s teplotou tvárnice. Nižší tuhost fólie by pak mohla podporovat výše uvedený jev. Naopak při dostatečně dochlazené fólii je předpoklad, že sklon k této vadě bude nižší.

Je rovněž třeba podotknout, že ačkoliv procesní parametr „doba dochlazení fólie“ lze nastavit pomocí prostředků předtvarování, tak nijak neovlivňuje vlastní proces předtvarování fólie, nýbrž pouze mění okrajové podmínky zastříkování fólie. Přesto tento parametr na základě literární rešerše považuji za velmi významný a zařadil jsem ho k proměnným procesu předtvarování fólie.

4.4.4 Velikost vakua

V kontextu s kapitolou 4.2, je u technologie IMD s předtvarováním použito k předtvarování fólie stejného principu, jako u negativního podtlakového tvarování, kde tvarovací síla je vyvozena vakuem. Tím pádem se předpokládá, že pro technologii IMD lze použít stejných zákonitostí na výpočet tlakových poměrů, jako u technologie tvarování. Pokud bychom předpokládali tlak okolí cca 0,1 MPa a minimální dosažitelný absolutní tlak vakua 0 MPa, pak dosažitelný tvarovací tlak je rovněž maximálně 0,1 Mpa. Tento záleží nejen na nadmořské výšce, ale rovněž na parametrech zdroje vakua.

Jako zdroj vakua u technologie IMD s předtvarováním je dle poznatků z technologie tvarování, volena stejná kombinace vývěvy a zásobníku vakua, kde není možné hloubku vakua regulovat.

Tlak na počátku tvarování se pak dá vypočítat podle Daltonova zákona:

$$P_{fz} \cdot (V_f + V_o + V_z) = p_1 \cdot (V_f + V_o) + p_2 \cdot V_z \quad (2)$$

tedy

$$P_{fz} = \frac{p_1 \cdot (V_f + V_o) + p_2 \cdot V_z}{(V_f + V_o + V_z)} \quad (3)$$

kde: P_{fz} – tlak na začátku tvarování

V_f – objem dutiny formy

V_o – objem potrubí mezi vakuovým ventilem a dutinou formy

V_z – objem zásobníku vakua a přilehlé hadice až k vakuovému ventilu

p_1 – tlak vzduchu v dutině formy před otevřením ventilu (barometrický tlak)

p_2 – tlak vzduchu v zásobníku vakua před otevřením ventilu

Vzhledem k tomu, že zásobník nemá neomezeně velkou kapacitu a že vývěva při daném tlaku nemá dostatečný výkon ke kompenzaci úbytku vakua během procesu tvarování, tak při předtvarování fólie dochází k poklesu podtlaku ve vakuovém zásobníku. Při uvážení poměru dob, po kterou probíhá tvarování a po kterou probíhá evakuace na původní hodnotu vakua v zásobníku, lze toto evakuování v průběhu tvarování zanedbat. Tvarovací tlak se tedy v průběhu tvarování snižuje, což je nevýhodné, neboť na konci tvarování se zpravidla dotvarovávají tvarové detaily a zároveň úroveň prohřátí fólie/desky je již snížena.

Tlak na konci tvarování pak lze vypočítat na základě Boylova zákona:

$$P_{fz} \cdot (V_f + V_0 + V_z) = P_{fk} \cdot (V_0 + V_z) \quad (4)$$

kde: P_{fk} – tlak na konci tvarování

P_{fz} – tlak na začátku tvarování

V_f – objem dutiny formy

V_0 – objem potrubí mezi vakuovým ventilem a dutinou formy

V_z – objem zásobníku vakua a přilehlé hadice až k vakuovému ventilu

Pokles tlaku během tvarování tedy závisí zejména na velikosti zásobníku vakua, objemu dutiny formy (prostoru uzavřeného mezi nástrojem a fólií) a objemu rozvodů vakua před i za vakuovým ventilem. Pokud bereme, že objem uzavřený v nástroji pod fólií včetně objemu všech kanálů a hadiček je pro stejný nástroj konstantní a atmosférický tlak a dosažené vakuum v zásobníku rovněž, pak je jedinou možnou proměnnou velikost zásobníku vakua. S rostoucí velikostí zásobníku vakua bude tedy pokles tlaku menší a tím průměrná hodnota tvarovacího tlaku a též rychlost tvarování vyšší [8], neboť i rychlost proudění vzduchu v potrubí je závislá na velikosti daného tlakového spádu.

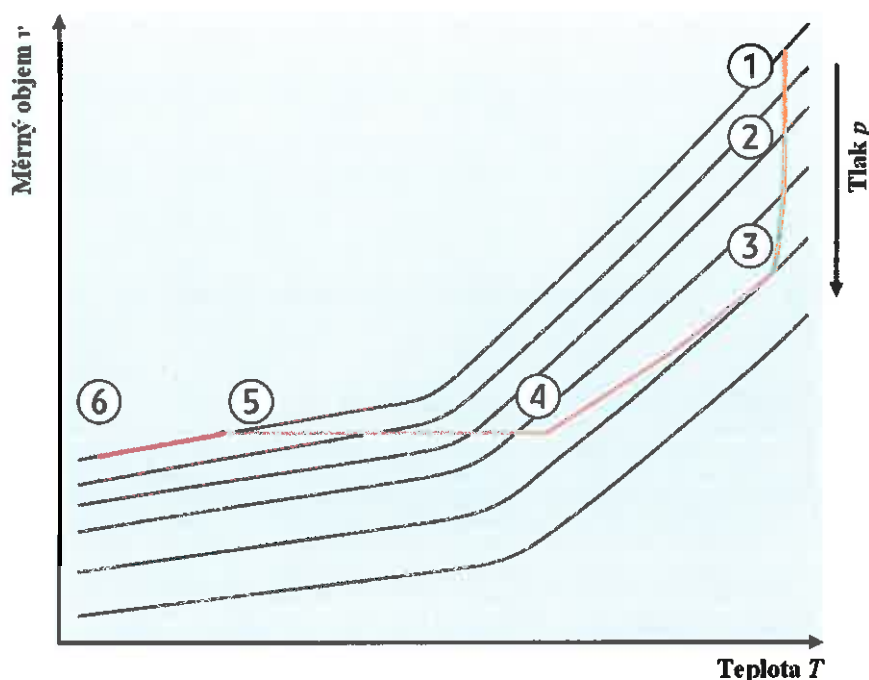
Na základě zákonitostí z teorie tvarování fólií je předpokládáno, že větší zásobník vakua, který způsobí menší pokles tvarovací síly v průběhu tvarování a tím pádem i rychlejší tvarování bude i pro předtvarování u technologie IMD výhodnější. Na druhou stranu není v dostupné literatuře tento vliv hodnocen s ohledem na kvalitu IMD dílů.

4.5 Teorie zastříkávání předtvarované IMD fólie

Vlastní vstřikování IMD dílů principiálně vychází z technologie vstřikování, kde předpokládám, že její základní princip je čtenářům této práce známý. Jde o velice složitý fyzikální proces, na němž se podílí stroj, nástroj, ale i vstřikovaný materiál. Pouze ve stručnosti uvádím popis vstřikovacího cyklu pomocí p-v-T diagramu, který považuji pro daný účel nejvhodnější (viz Obr. 16).

Cyklus vstřikování začíná izobarickým ohřevem plastu do stavu taveniny (spojnice bodů 6-1). Spojnice bodů 1-3 charakterizuje plnění dílu, což je doprovázeno nárůstem tlaku v dutině nástroje, kde do bodu 2 probíhá naplnění dutiny nástroje za téměř izotermických podmínek a za tímto bodem může přecházet plnění do kompresní fáze. Tato navazuje na dotlak, který se je charakterizován spojnici mezi body 3 a 4, při

kterém dochází ke kompenzaci smrštění ochlazované taveniny, přičemž v bodě 4 dojde k zatuhnutí oblasti vtoku. Mezi bodem 4 a 5 jde o izochorické chladnutí taveniny, kdy v bodě 5 je již dosaženo tlaku okolního prostředí. Do bodu č. 6 pak pokračuje chladnutí výrobku na teplotu okolí.



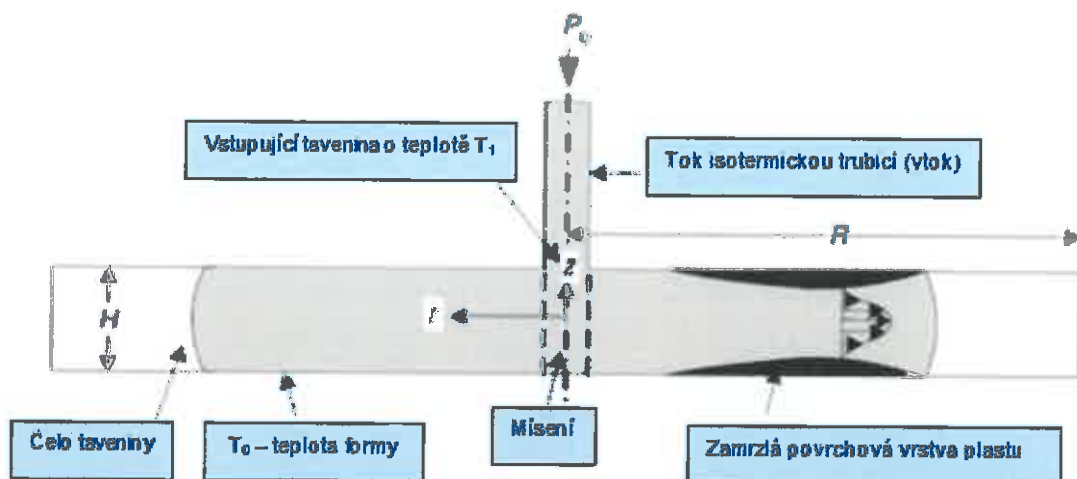
Obr. 16 Vstřikovací cyklus v p-v-T diagramu pro amorfní termoplast [21]

Přítomnost IMD fólie mezi taveninou a tvárnici však do jisté míry ovlivňuje celý proces v několika ohledech:

1.) Snížení odvodu tepla z taveniny na straně fólie

Velice důležité je si uvědomit fakt, že i slabá vrstva IMD fólie v řádu desítek mikrometrů, s nízkým součinitelem teplotní vodivosti působí jako tepelný izolátor a může ovlivňovat vstřikování změnami vlastnostmi odvodu tepla. Tímto se zabýval například Shia-Chung Chen [27], který důkladně popsal jev pro IML fólii o tloušťce 0,175 mm. Tato je sice proti běžné IMD fólii přibližně 3x silnější, ale výsledky jeho výzkumu jsou dle [4] v menší míře platné i pro IMD.

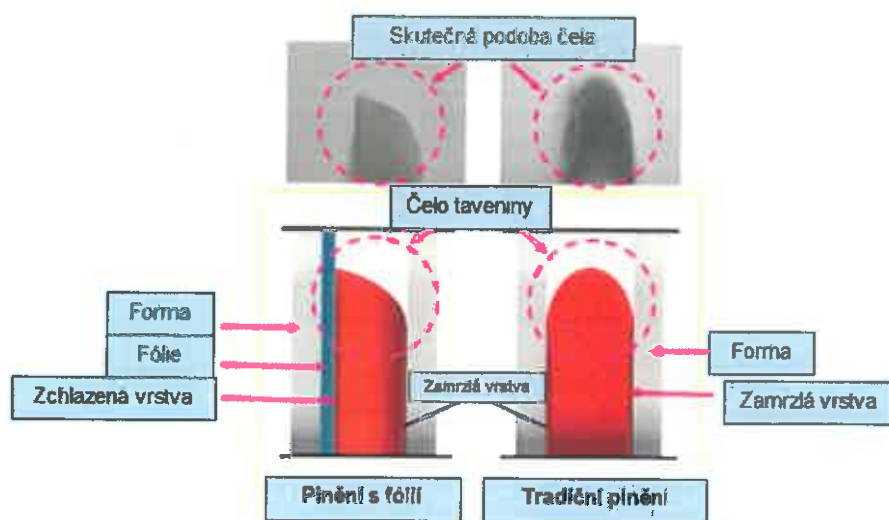
V případě klasického plnění formy, se snažíme o postupné plnění dutiny vstřikovacího nástroje laminárním tokem, kde dochází k zakřivení čela taveniny v důsledku poklesu rychlosti plnění směrem od středu dutiny formy ke stěnám. Důvodem je to, že u stěn tavenina rychleji chladne a tím pádem postupně roste viskozita (viz Obr. 17).



Obr. 17 Řez vstřikovacího nástroje pro plastový výrobek rotačního tvaru ukazující proces plnění dutiny včetně rychlostního profilu uvnitř taveniny (přeloženo dle [29]) kde: H je výška výrobku, R je jeho poloměr, P_0 je tlak vstupující taveniny

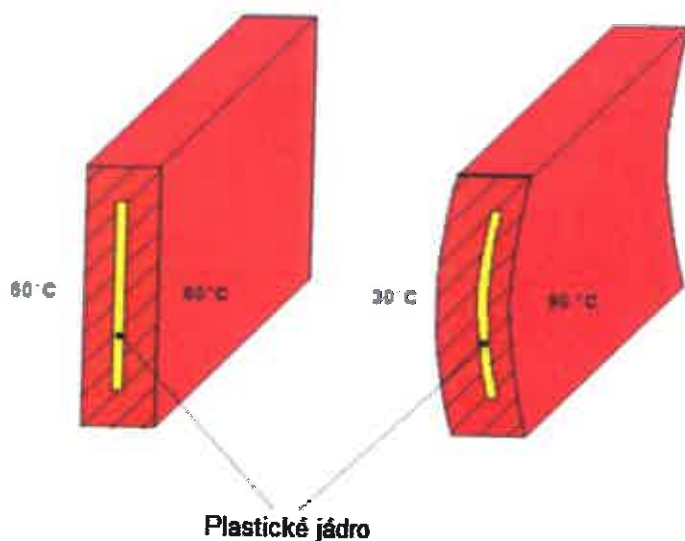
Díky tomuto faktu a při vstřikování dalšího materiálu je tedy viskozita ve středu dutiny nejnižší a teplota taveniny nejvyšší, což umožňuje proudění materiálu dále do výrobku a tato oblast též tuhne naposledy.

Při plnění dutiny formy, kde je zastříkována fólie, však bylo zjištěno, že oproti klasickému vstřikování (např. dle Tadmora [29]), dochází ke změně výše popsanému tvaru čela taveniny. Toto je způsobeno právě změněným odvodem tepla a tento zjištěný tvar je uvedený na Obr. 18. Je zde předpoklad, že může mít negativní vliv na vznik vlnění fólie před čelem taveniny.



Obr. 18 Rozdíl ve tvaru čela taveniny při klasickém vstřikování a zastříkování fólie – př. dle [26]

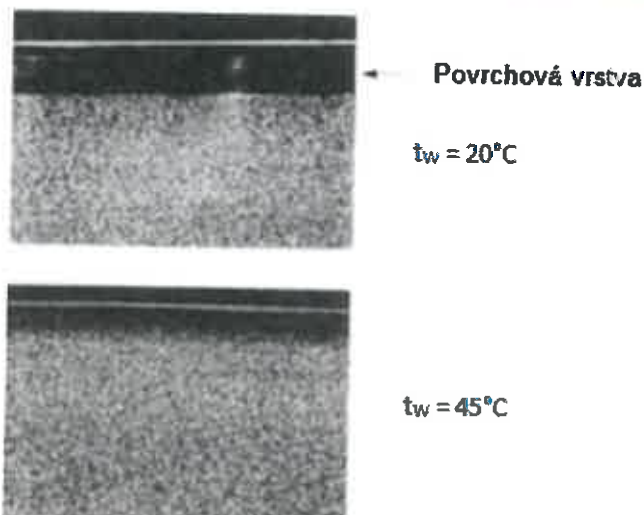
Snížení odvodu tepla z taveniny na straně fólie má i jiné efekty a to zejména vliv na smrštění a deformace výrobku. Deformace při nehomogenním odvodu tepla ze vstřikovací formy je popsána např. v [35] a zobrazena na Obr. 19.



Obr. 19 Porovnání vlivu symetrického (vlevo) a nesymetrického (vpravo) odvodu tepla na deformaci výrobku [35]

Většina materiálů vhodných pro zastříkování fólií je amorfni, kde se může předpokládat vliv na orientaci makromolekul, či pnutí (např. dle [26]). Pro příklad semikrystalických materiálů nebyl v literatuře nalezen výzkum zabývající se změnou struktury materiálu v těsné blízkosti fólie, v souvislosti s jejím izolačním efektem, ale předpokládám, že je dosaženo podobného efektu jako u prostého zvýšení teploty formy. Např. Zoellner [35] v takovémto případě popisuje zvýšení krystalinity i zmenšení velikosti povrchové vrstvy s potlačenou krystalizací (viz Obr. 20).

Dle [26], lze vyrovnání odvodu tepla při zastříkování fólie částečně vyřešit přizpůsobením teploty temperace odpovídající poloviny nástroje. Konkrétní hodnoty korekce pro transferovou fólii o tloušťce nosiče 50 μm však nejsou uvedeny.

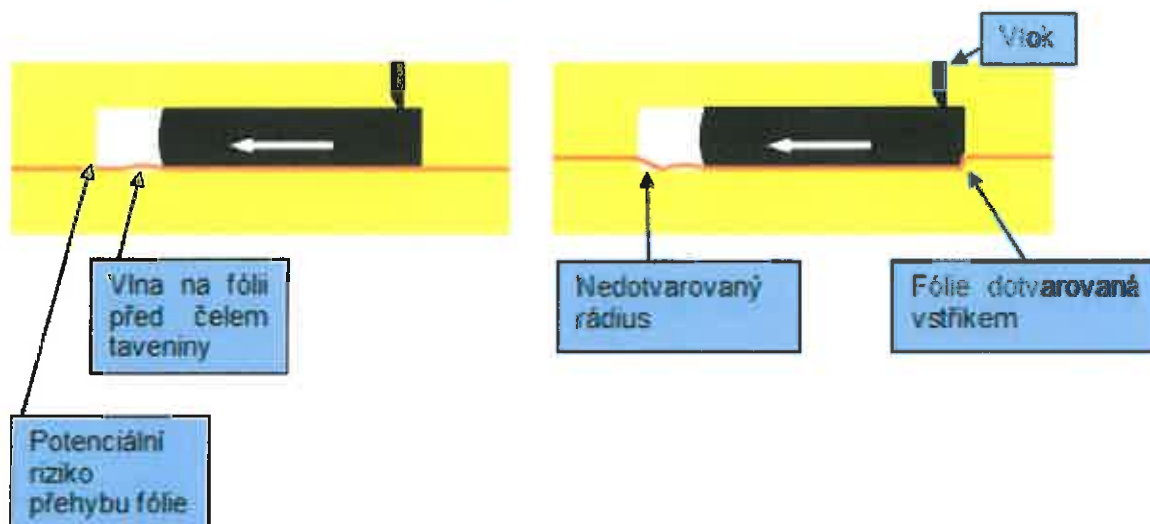


Obr. 20 Změna struktury semikrystalického materiálu při různé teplotě temperace formy [35]

2.) Vliv reologie taveniny na fólii

V souvislosti s již popsanou možností vzniku oblastí, s nedokonale předtvarovanou IMD fólií, je třeba využít postupu taveniny k jejímu dotvarování, což může vyžadovat specifickou rychlost a směr taveniny vzhledem k nedotvarované oblasti. Hranice maximální možné deformace pomocí taveniny, ani její doporučený směr však není v literatuře uveden, proto je třeba řešit empiricky.

Vedlejším efektem přítomnosti fólie při stěně dutiny formy je možnost jejího posunu, či zvlnění díky proudící tavenině. Větší míra zvlnění fólie může vést k přehybu fólie s nežádoucím optickým projevem na povrchu výrobku. Shia Chung [26] zmiňuje přehyb IML fólie jako vedlejší efekt změknutí fólie od tepla předaného taveninou a dle Brauna [1] lze jev eliminovat úpravou toku v nástroji. Z tohoto důvodu je vyslovena hypotéza, že v malé míře, ne zcela dotvarovaná fólie v radiusu, který je kolmo na směr toku taveniny by mohla působit pozitivně, jako místo, kde se přebytečná fólie nakumulovaná ve zvlněném povrchu před čelem taveniny použije k vykopírování delší dráhy, která by odpovídala povrchu tvárnice. Tento předpoklad je znázorněn na níže uvedeném obrázku Obr. 21. Rovněž Melhorn [17] doporučuje zakončit díl radiusem k vyrovnání vlnění.



Obr. 21 Výklad vlnění fólie před čelem taveniny - příklad řešení tvárnice jako přímé (vlevo) a zakončené radiem (vpravo)

Lze se tedy domnívat, že výslednou deformaci na hotovém IMD díle tedy tvoří níže uvedené složky, které se projevují jinak v dokonale dotvarovaných oblastech a jinak v oblastech nedotvarovaných.

V případě nedotvarovaných oblastí se projevují tyto složky:

- Vlastní předtvarování (úroveň deformace dosažená tvarováním fólie pomocí vakua)
- Dotvarování tlakem taveniny při vstřikování, jehož efekt může být ovlivněn výslednicí protažení fólie vlivem vlnění a smrštění vlivem tvarové paměti, která teoreticky působí proti němu. (fólie se má díky vnitřnímu pnutí způsobenému orientací makromolekul snahu vrátit do původního tvaru 0)

V případě dokonale dotvarovaných oblastí je pak předpoklad, že odpadá složka dotvarování pomocí tlaku taveniny, neboť fólie již dokonale kopíruje povrch tvárnice. Dalším z jevů, který je způsoben tím, že přítomná IMD fólie podléhá vlivům proudící taveniny, je možnost smývání citlivých tištěných vrstev IMD fólie proudem taveniny, což vede k optické vadě zvané wash-out efekt.

Toto má příčinu v jejich nadměrném smykovovém namáhání proudící taveninou za spolupůsobení jejího tepla. Na modelovém příkladu postupu laminárně proudící taveniny rovinnou deskou podél fólie je riziko jejího poškození nízké (při běžných vstřikovacích rychlostech). Pokud však dojde ke změně směru taveniny, kde výslednice kinetické energie taveniny směřuje směrem k fólii, či ke skokové změně rychlosti plnění (např. změnou průřezu), pak je riziko poškození dekoru značné,

neboť fólie je schopna takovému namáhání odolávat pouze omezenou dobu. Z tohoto důvodu je třeba tento jev zohlednit již při návrhu výrobku a pro plnění dutiny formy použít nálitky, které omezí lokální namáhání fólie u ústí vtoku, či použít vyšší počet vtoků, který omezí množství taveniny proteklé přes rizikové místo. V odborné literatuře jsou publikované i opatření v podobě úpravy technologických parametrů vstřikování. Tímto fenoménem se ve svém výzkumu zabýval např. Liu [15], který zjistil, že teplota taveniny a teplota temperace formy výrazně ovlivňuje tento jev a jejich snížení působí pozitivně. Dle Melhorna [17] má rovněž na tento jev vliv velikosti vstřikovací rychlosti, kde snížení přinese opět pozitivní efekt.

3.) Zajištění adheze IMD fólie

Pro správnou adhezi dekorační vrstvy, je třeba vzájemná kompatibilita adhezní vrstvy fólie se základním vstřikovaným materiálem. Ačkoliv je pro technologii IMD často používaný blend PC/ABS s obsahem cca 65% PC, velmi často se prosazuje i samotné ABS. Z hlediska adheze jsou vhodné i jiné materiály, které zajistí dobré spojení adhezní vrstvou tištěné vrstvy. Mezi tyto patří dle vyjádření předních výrobců IMD fólií zejména PC/ASA, PC/PET, PC/PMMA a ASA [41], [45]. Dle [28] je možné použít i např. SAN či PS. Použití nepolárních plastů (např. PP), pro zastřikování IMD fólie nebylo v době psaní disertační práce, u komerčně dostupných produktů možné, ale pro IML jsou již tyto k dispozici [36].

Použití správného materiálu není jedinou podmínkou pro požadovanou adhezi, neboť ke spojení přispívá zejména teplo a tlak taveniny. Pokud je teplota temperace formy příliš nízká, nebo příliš pomalé vstřikování, pak nedojde k dodání potřebného množství tepla adhezní vrstvě a tím pádem nevznikne dostatečné spojení taveniny a tisknuté vrstvy. Rovněž je třeba vyloučit z procesu veškeré mastnoty, nebo zamezit vývinu plynů (např. z vlhkosti, degradace, nadouvadla), které rovněž oslabují/zamezují adhezi.

4.) Vysoká jakost povrchu IMD výrobků s minimální vyrovnávací schopností dekorační vrstvy

Zastřikování tenké dekorační vrstvy IMD fólie je doprovázeno extrémní viditelností vzniklých vad i nepřesností nástroje na většině dekorů.

Kromě vad, specifických pro technologii IMD dochází i ke zvýraznění běžných vad z procesu vstřikování.

Mezi nejběžnější vady vstřikování, které se proznačují přes IMD fólii lze zahrnout:

- Stříbření
- Propadliny
- Studené spoje

Z hlediska nastavení dotlaku u technologie IMD je vhodné aplikovat vyšší dotlak za účelem omezení proznačení žeber a jiných prvků z nevzhledové strany. Toto nastavení však může být doprovázeno vznikem zástříků, při jejichž odstraňování může docházet k poškození okraje dekorace dílu, rovněž je třeba s tímto nastavením počítat při volbě smrštění při konstrukci nástroje.

S tímto tématem bezprostředně souvisí i viditelnost veškerých nečistot, které se dostanou do prostoru mezi líc formy a fólii, kde nerovnosti vzniklé nečistotami povrchu i v řádu jednotek mikrometrů jsou viditelné. Prevence spočívá v aplikaci „čistého prostředí“ v okolí stroje.

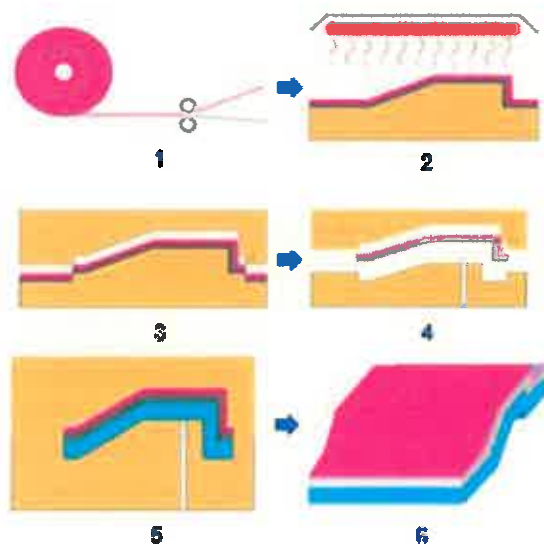
4.6 Technologie IML

Vzhledem k existenci minimálního množství literárních zmínek o technologii IMD bylo mnoho důležitých poznatků v literární rešerši čerpáno z publikovaných výsledků výzkumů k technologii IML. Z tohoto důvodu považuji za vhodné alespoň okrajově popsat její princip a zdůraznit některé odlišnosti od IMD.

Technologie IML (In Mold Labeling), někdy též nazývána jako FIM (Film Insert Molding), nebo též velice často nesprávně IMD (vzhledem k zažitému názvosloví největších výrobců transferových fólií) [41], [45]. Jde o vysoce produktivní technologii, při které dochází k dekoraci povrchu vstřikovaného plastového výrobku přímo v dutině vstřikovací formy pomocí vkládané fólie. Tato byla v předchozích procesech natisknuta, předtvarována a poté ostřížena na potřebný rozměr, který pokrývá odpovídající část dutiny formy (v případě potřeby lze dekorovat pouze část výrobku). Vložená fólie je pak zastříknuta taveninou plastu a po zastříknutí zůstává součástí plastového výrobku, nevyužívá tedy transferového principu jako technologie IMD. Schematicky jsou jednotlivé fáze technologie IML znázorněny na následujícím obrázku (viz Obr. 22).

Mezi nejdůležitější rozdíly oproti technologii IMD patří zejména možnost zcela oddělit vlastní tvarování fólie od jejího zastříkování, což přináší vyšší variabilitu procesu a rovněž fakt, že prakticky veškeré deformace je dosaženo již v procesu tvarování a tím pádem při zastříkování primárně nedochází k další deformaci. Na rozdíl

od IMD, kde je aktuálně dostupná pouze PET fólie, lze pro IML vybírat různé základní fólie (např. ABS, PC, PET, ale po úpravě i PP [36]) o různých tloušťkách (zpravidla 0,2-0,8mm) [36] a potištěné rozdílnou technologií tisku (např. sítotisk, hlubotisk, ale dnes již i digitální tisk). S uvedenou vyšší tloušťkou IML fólie souvisí i jiné chování při zastříkování, než u IMD. Izolační efekt fólie je daleko silnější [26] a naopak působení taveniny na fólii je slabší, neboť silnější fólie vykazuje vyšší tuhost. Oproti IMD s předtvarováním sice při správném předtvarování a založení odpadá možnost proražení fólie, ale naopak vzniká riziko podstříknutí fólie, či posuv fólie, která kryje pouze část dílu. Z tohoto důvodu se při konstrukci nástroje konstruuje vtokový systém velice obezřetně, neboť při dobrém řízení toku taveniny a vstřikování do správných míst lze tyto vlivy minimalizovat. Mezi důležitá pravidla lze zařadit vstřikování kolmo na fólii přes náliček, které zajistí jak její přitlačení k dutině formy, tak omezení smykového namáhání povrchu. Vyšší počet kaskádově řízených vtoků pak opět snižuje smykové namáhání fólie a směr toku taveniny by měl být vždy z míst s fólií do míst bez fólie.



Obr. 22 Jednotlivé fáze technologie IML [32] kde jsou:

1. Výchozí produkt - natištěná fólie
2. Vakuové tvarování fólie
3. Ostříh přebytných okrajů fólie
4. Vložení fólie do formy
5. Zastříknutí vložené fólie
6. Hotový IML díl

Absence transferové vrstvy neomezuje místo tisku na jedinou stranu fólie, ale např. tiskem na zadní stranu fólie lze zvýšit ochranu tisku před vnějšími vlivy, či naopak tiskem na přední stranu fólie pak ochranu před smytím taveninou. Kombinací tisku na obě strany fólie a její vyšší tloušťky pak lze docílit dekoru s 3D efekty. Obecně lze však říci, že absencí oddělovací vrstvy u technologie IML je i při kontaktu taveniny s potiskem docíleno jeho vyšší odolnosti, než u technologie IMD.

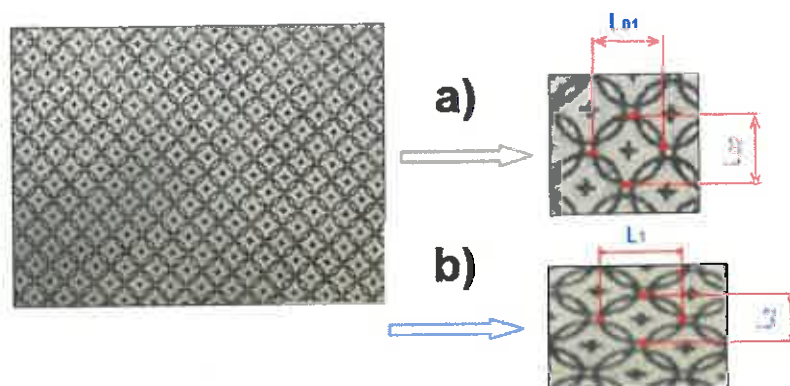
Z hlediska samotného tvarování fólie je k dispozici více variant technologie tvarování, včetně vysokotlakého tvarování (např. Niebling princip), které s vhodnou konstrukcí nástroje mohou dosáhnout vytvarování i velice složitých tvarů ve vysoké přesnosti [44]. Důležitým aspektem při tvarování je, aby nedošlo k poškození potisku a zároveň bylo dosaženo vysoké úrovně přesnosti výlisku (zde hrají roli odpružení a smrštění fólie [17], [27]), která je stěžejní pro přesné založení do vstřikovací formy. Kromě přesného tvarování je kladen důraz i na přesný ostříh, (alternativně laserování či frézování) přesné robotické založení a v neposlední řadě dostatečnou fixaci fólie ve formě. Právě fixace fólie ve formě není jednoduchá a je výhodné ji zohlednit již při konstrukci tvaru výrobku, kde lze zajistit, že fólie drží ve formě pomocí tření s vybranými tvarovými prvky. Pokud to není možné, používají se posuvné elementy v nástroji, které se po vložení fólie do formy vysunou, aby zafixovaly její pozici, a naopak po zavření formy se zasunou zpět, aby neovlivňovaly výsledný tvar výrobku [36]. Na slabší fólie lze též použít elektrostatický náboj. Vakuum se používá pouze v případě, kde nehrozí proznačení kanálků, či štěrbin do vzhledového povrchu dílu.

Lze konstatovat, že přes mnoho podobností mezi technologiemi IMD s předtvarováním a IML je zejména rozdělením procesu předtvarování a vstřikování do samostatných procesů, či jiným charakterem fólie, tento proces v mnoha ohledech odlišný a je třeba věnovat těmto odlišnostem pozornost. Dle Melhorna [17] lze u technologie IML dosáhnout dekorace složitějších tvarů, ale vlivem vyššího počtu operací při výrobě IML dílů vychází dle Reicharta [13] tyto díly draže, než pokud by byly vyrobené technologií IMD s předtvarováním.

4.7 Rešerše metod pro hodnocení deformace tenké fólie

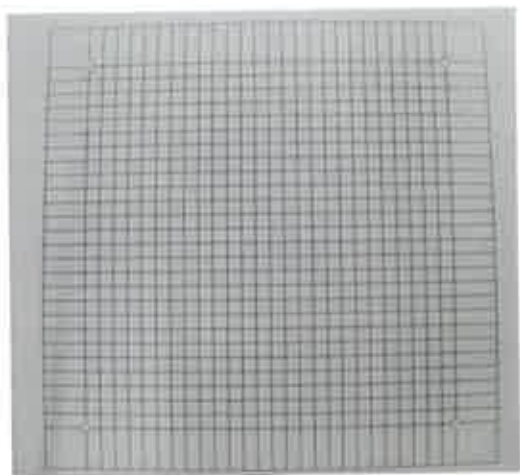
Mnohé operace zpracování plastů, či kovů souvisí s deformací výchozího materiálu v nový tvar. Zatímco ve výrobní praxi se často setkáváme s hodnocením deformace v kontextu s požadovaným tvarem výrobku, tak ve vědecké praxi se setkáváme s mnohými případy, kde je třeba hodnotit deformaci fólií, tenkých desek, či plechů

v kontextu s průběhem samotného procesu. Vzhledem k charakteristikám procesu technologie IMD popsaných v kapitole 4 je předpokládáno, že hlavní deformace fólie probíhá ve dvou krocích: při předtvarování a během vlastního vstřikování. Jelikož se žádná literatura studiem deformací u transferové IMD přímo nezabývá, je třeba čerpat právě z dostupných metod využívaných u technologií tvarování plastů, či tváření kovů, které však probíhají pouze v jednom kroku. V souvislosti se studiem deformací plechů existuje mnoho prací. Např. Doubek [2] popisuje, že pro studium deformací lze na zkoumaný plech nanést síť s tvarovými elementy různých velikostí i tvarů, přičemž prováděl experimentální měření, kde byla použita deformační síť s překrývajícími se kruhovými elementy a křížky o velikosti kruhového elementu $L_0 = 2 \text{ mm}$ (viz. Obr. 23a). Během tváření se dané elementy přetvořily na elipsy s rozměry os L_1 (hlavní osa), L_2 (vedlejší osa) viz Obr. 23b, z čehož lze vypočítat poměrnou deformaci. Rozměry L_1 a L_2 , stanovoval pomocí upraveného dílenského mikroskopu připojeného k PC.



Obr. 23 Příklad rastru používaného pro hodnocení deformací u plechů [2], kde:
a) před deformací, b) po deformaci

V souvislosti s IML se studiem deformací za pomoci deformační sítě zabývá například Phillips [19], [20], nebo Shia-Chung Chen [27], který tiskl na fólii o tloušťce 0,125 mm síť se čtvercovými elementy o délce stěny 5 mm viz Obr. 24.



Obr. 24 Příklad rastru použitého pro hodnocení deformací IML fólie ve výzkumu Shia-Chung Chena [27]

Jako metodu tisku vybral sítotisk za použití inkoustů značky Proell, které se běžně používají k tištění dekorů na IML fólie [46]. Po tvarování hodnotil poměrnou deformaci velikosti rastru (5) i tloušťky fólie.

$$\delta_L = \frac{L_f - L_i}{L_i} \cdot 100\% \quad (5)$$

kde: L_f je délka hrany elementu po tvarování
 L_i je délka hrany elementu před tvarováním

U technologie IML je zásadní rozdíl v tom, že díky tvarování mimo vstřikovací formu, dochází k vyšší variabilitě procesu a prakticky veškerá deformace je již dosažena při tvarování. Na základě literární rešerše nebyla nalezena práce, která by hodnotila deformace před a po zastříknutí u IML, ale například Phillips [19] se zabýval odpružením fólií po tvarování, což by mohlo znamenat jistou míru dotvarování během vstřikování, ale rovněž mohlo být toto odpružení eliminováno zavřením nástroje, či v praxi řešeno tzv. předdeformací tvaru, který se právě po odpružení dostane do požadovaného tvaru. Jelikož se předpokládá, že u IMD s předtvarováním, je zde deformace většinou dvoustupňová (nastává během tvarování i vstřikování), je zde pro hodnocení třeba, aby rastr byl viditelný z obou stran fólie, aby bylo možno sledovat nejen celkovou deformaci fólie, ale i určit její podíl připadající na jednotlivé kroky.

Pro obě technologie IMD i IML platí, že tištěná deformační síť by měla v co nejmenší míře ovlivňovat vlastnosti fólie, tedy vyvarovat se metod jako laserování atd.

Velikost rastru je třeba volit co největší, aby se minimalizovala chyba měření, ale na druhé straně dostatečně malá, aby se zkoumaný jev vyskytoval na ploše větší, než je jeden element, jinak by opět docházelo ke zkreslení výsledků.

V současné době se otevírají možnosti studia pomocí fotogrammetrie, kde lze sledovat reálný průběh deformace v celé ploše zároveň. Sobotka [25] se věnoval snímání plechového vzorku, při tahové zkoušce pomocí systému ARAMIS. V souvislosti s polymerními materiály byla nalezena pouze práce Schiemana 0, který sledoval deformace ETFE fólií pomocí fotogrammetrie. Aplikace pro IMD by byla velice náročná, neboť průběh deformace během vstřikování je ukryt ve vstřikovací formě a v případě studia deformace během tvarování by přehřev zastiňoval použité kamery. Jako aplikovatelné se jeví pouze použití 3D scanneru ve fázi po tvarování a po vstřikování.

5 Výzkum v oblasti technologie IMD

V souvislosti s literární rešerší a cíli této práce byl sestaven experiment pro výzkum v oblasti technologie IMD. Potřeby výroby zkušebních dílů plynou z prováděných analýz, popsanych v následujících kapitolách. Je třeba podotknout, že vlivem dostupnosti IMD folie byla volena nejnižší nutná velikost výběru a použité parametry v maximálním rozpětí tak, aby v žádném z nastavení nedocházelo k 100% tvorbě vadných výrobků.

5.1 Charakteristika materiálu

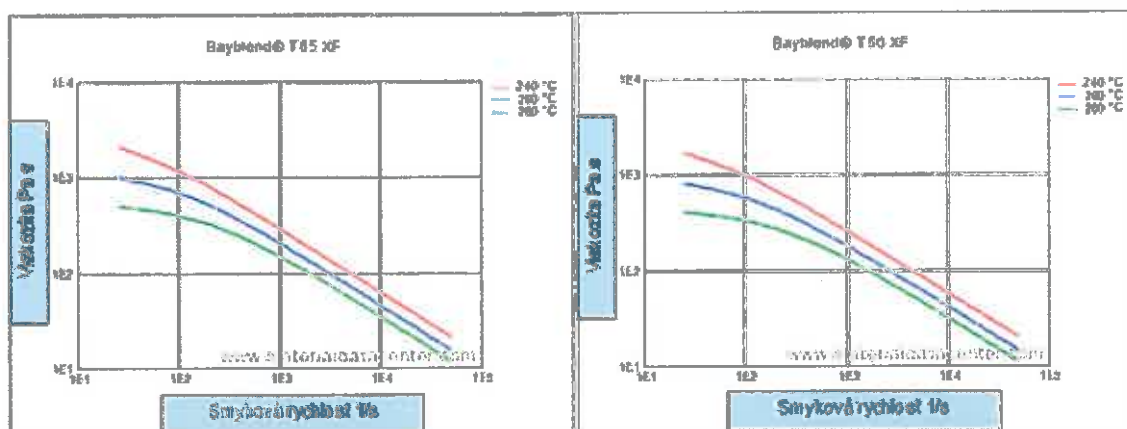
5.1.1 Materiál pro vstřikování zkušebních těles

Volba správného materiálu je v dnešní době nelehkým úkolem konstruktéra s ohledem na mechanické vlastnosti dílu a požadavky na splnění náročných testů, které jsou po výrobcích vyžadovány. Pro případ experimentu popsaného v této práci bylo kromě těchto konstrukčních aspektů třeba uvažovat i požadavky technologie samotné.

V kapitole 4.5 jsou uvedeny materiály, které lze na IMD použít z hlediska adheze, ale při snaze přiblížit se podmínkám reálné výroby bylo třeba přihlídnout i k tepelné stabilitě a tekutosti materiálu, proto byl vybrán materiál PC/ABS.

Pomalejším tokem dochází k chladnutí taveniny a tím poklesu až ztrátě adheze. Tekutost je u PC/ABS zásadním způsobem předurčena poměrem PC a ABS.

Materiály s vyšším obsahem PC mají zpravidla nižší hodnoty tekutosti a materiály s vyšším obsahem ABS mají nižší teplotní stabilitu. Pro názornost je na níže uvedeném obrázku (viz Obr. 25) uvedena závislost viskozity na smykovém namáhání, pro materiály PC/ABS s různým podílem PC.



Obr. 25 Porovnání viskozity PC/ABS s 65%PC (Bayblend T65XF) a s 50% PC (B. T50XF) [43]

Ačkoliv se z grafické závislosti rozdíly nejeví velké, může to být rozhodující u nástrojů se složitějším horkým rozvodem, kde u stroje s nižším maximálním vstřikovacím tlakem nemusíme být schopni dosáhnout vstřikovací rychlosti, kterou technologie IMD vyžaduje.

Na druhou stranu teplota měknutí dle Vicata (ISO 306 – 50 N, 120 °C/h) je pro T50XF (50%PC) 115 °C a pro T65XF (65%PC) 120 °C, což může být rozhodující např. při aplikaci na palubní desku automobilu, kde je mnoha výrobci požadováno i tzv. tepelné ustavení výrobku za podmínek 500 h/120 °C.

Konkrétně tyto podmínky nejlépe plnil materiál Bayblend T65XF od společnosti BAYER Material Science, který i při obsahu PC kolem 65% vyniká velice dobrými hodnotami tekutosti a vykazuje dostatečnou teplotní odolnost. Z hlediska barevného odstínu je třeba přihlídnout k faktu, že IMD fólie obvykle vykazuje určitou míru průsvitnosti a proto je třeba respektovat odstín granulátu, pro který je daný dekor určen, tedy v případě dekoru použitého v této práci jde o odstín „Satin Schwarz“. V případě hodnocení deformací byl kvůli viditelnosti rastru, (více v kap. 6.1) zvolen totožný materiál v odstínu „Candy Weiss“. Vzhledem k probarvení použitého materiálu je tedy příprava materiálu omezená na sušení (4 h/100 °C). Materiálové hodnoty použitého materiálu Bayblend T65XF jsou uvedeny v příloze 2.

5.1.2 IMD fólie pro výrobu zkušebních těles

Jak je již popsáno v předchozích kapitolách, pro IMD se používá tzv. „transferová fólie“. Tato se skládá z nosiče fólie a natisknuté vrstvy, jež se přenáší na výrobek v průběhu vstřikování.

Pro experiment byla zvolena fólie IMD s nosičem o tloušťce 50 μm (určená pro tvarově složitější výrobky vyráběné s předtvarováním) a jako alternativa pro porovnání naměřených dat byla vybrána fólie Kurz IMD o stejné tloušťce 50 μm , která je rovněž určena pro tvarově složitější výrobky. V době počátku experimentálních měření (3/2013) nebyla na světovém trhu žádná další alternativa vhodná pro tvarově složité výrobky.

Po mnoha optimalizačních smyčkách musela být z experimentu vyřazena fólie zn. Kurz, neboť se nepodařilo nalézt parametry, při kterých by bylo možné dokonale dekorovat vybraný zkušební tvar (stabilně bez výroby 100% NOK výrobků). Toto bylo dáno pravděpodobně její nižší flexibilitou.

Pro největší objektivitu experimentu byl vybrán dekor fólie ve vysokém lesku (Black Piano), který je díky svému vysokému lesku, obecně považován za nejproblematictější a obvykle vyazuje v sériové výrobě nejvyšší zmetkovitost. Toto platí i po vyloučení vlivu nečistot z prostředí, které jsou na tomto dekoru nejviditelnější a se zkoumanou problematikou nemají přímou souvislost [45].

Přesnou tloušťku tisknuté vrstvy výrobce neuvádí, ale dle základní specifikace IMD fólie se pohybuje v rozmezí 8–11 μm .

Vzhledem k tvaru výrobku, nástroje a zejména k velikosti upínacího rámečku, byla zvolena šířka fólie 280 mm. Posun fólie na jeden zdvih rovněž koresponduje s nástrojem a byl zvolen 940 mm.

5.2 Vstřikovací nástroj

Vzhledem ke specifiku dané technologie IMD bylo přikročeno k mnoha úpravám a nestandardnímu vybavení nástroje proti nástroji, který by vyráběl totožný výrobek s geometrickým dezénem místo IMD fólie.

Vzhledem ke složitosti dílu bylo rozhodnuto koncipovat formu pouze jako jednonásobnou, neboť pro potřeby experimentálního měření přináší jednonásobná forma vyšší objektivitu.

Tvárník nástroje je umístěn na pevné straně a zde jsou rovněž díly vyjímány

z vyhazovačů. Vzhledem k podkosům u držáků klipů bylo přistoupeno k odformování těchto částí pomocí šikmých vyhazovačů, zbytek dílu vč. vtokových náliťků je odformován pomocí přímých vyhazovačů. Ovládání vyhazovací desky je provedeno pomocí hydraulických válců.

Nejvíce změn oproti tradičnímu vstřikovacímu nástroji je provedeno na tvárniciové tj. na odjížděcí straně (viz Obr. 26). Zde musely být vyfrézovány zářezy na vedení fólie a rámeček, který fólii upíná a tím i utěsňuje. Tento upínací rámeček je výrazně větší, než je velikost dílu, neboť je potřeba s ohledem na odformovací směr a geometrii dílu přiblížit a předtvarovat fólii k „A tvaru“ výrobku (včetně příkrých ploch). Správnému předtvarování pomáhají i tzv. náběhy vně dělicí roviny, které směřují fólii do požadované hloubky. V případě vzniku překladů fólie a jiných vad nesmí vznikat ani v oblasti „A tvaru“ dílu, ani v oblasti dělicí roviny, neboť by se projevíly i na vstřikovaném díle, naopak za dělicí rovinou již tento jev nevadí a je tedy třeba tomu přizpůsobit velikost náběhů. Tento rámeček je rovněž ovládán ks hydraulických válců.



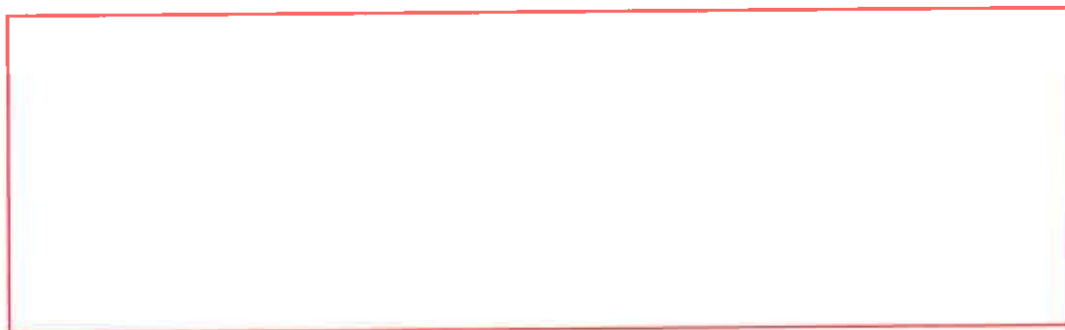
Obr. 26 Pohled na odjížděcí stranu použitého IMD nástroje

S předtvarováním, které je obdobou negativního vakuového tvarování a je detailněji popsáno v kapitolách 4.2 - 4.4, souvisí i přítomnost vakuové drážky o rozměrech ($\text{Š} \times \text{H} - x \text{ mm}$), která distribuuje vakuum nutné pro předtvarování fólie. Je umístěna téměř kolem celé dělicí roviny (až na oblast vtoků). Vakuum je k této drážce

přivedeno drobnými otvory o průměru $\dots$ mm, které jsou umístěny ve směru otevírání nástroje, z druhé strany tvárnice vložky jsou otvory pomocí vyfrézované drážky opět spojeny a vakuum přivedeno k ústím na které navazují vrtané kanály v přiléhající (a spolu zatěsněné) desce, které vedou vakuum ven z formy.

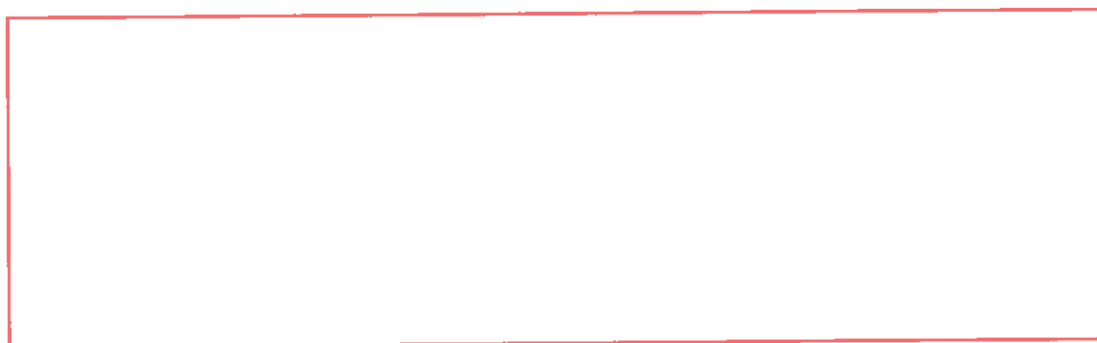
Jelikož nelze vyústění vakuových kanálků umístit do „A tvaru“ výrobku, a tím pádem je třeba je umístit co nejblíže, byla aplikována výrazně užší dělicí rovina oproti běžnému vstřikovacímu nástroji (cca $\dots$ mm). Z tohoto důvodu jsou na přenesení uzavírací síly stroje velmi důležité tlakové příložky, které kvůli fólii nemohly být umístěny po celém obvodu nástroje, ale pouze po stranách nástroje v počtu celkem $\dots$ ks.

Pro větší přehlednost popisovaných konstrukčních odlišností od běžného nástroje, je na Obr. 27 zobrazena tvárnice vložka.



Obr. 27 Konstrukční detaily tvárnice vložky

Na tvárnice straně (v tomto případě pevná strana stroje) pak hlavní úpravy spočívaly v respektování tvaru odjížděcí strany nástroje (tj. např. zhotovení přibližně negativu náběhů jako na tvárnici viz Obr. 28).



Obr. 28 Pohled na tvárnice stranu nástroje (zrcadleno z důvodu snadného porovnání s tvárnice vložkou)

Temperování nástroje je realizováno pomocí temperačních okruhů na straně tvárnice a na straně tvárníku. Polovina z tvárníkových okruhů je určena pouze na chlazení oblasti pod vtoky (pomocí chladících věží), za účelem použití studenější vody (cca 16°C), aby bylo omezeno vymývání inkoustu z fólie.

Rovněž horký rozvod byl přizpůsoben potřebám fólie a je instalován větší počet trysek s jehlovými uzávěry, konkrétně . Mezi uzavíratelnými tryskami a výrobkem je tavenina dopravována tzv. studenými kanály o lichoběžníkovém průřezu a ústí pomocí tunelového vtoku do žebírka, které je součástí výrobku.

5.3 Vstřikovací stroj a jeho dovybavení pro technologii IMD

Výrobní zařízení pro technologii IMD se skládá ze vstřikovacího stroje se standardními periferiemi jako je manipulační robot, temperační zařízení či periferie pro přípravu materiálu. Nad rámec těchto je však vstřikovací stroj třeba dovybavit periferiemi umožňujícími výrobu IMD dílů v automatickém cyklu. Ve snaze, co nejvíce se přiblížit reálné výrobě, jde zejména o následující zařízení:

- Odvíjecí zařízení na IMD fólii
- Systém na ohřev fólie
- Vakuový systém na předtvarování fólie
- UV pec na vytvrzování povrchu dílů
- Čisté prostředí v oblasti stroje

Výše uvedená zařízení umožňují provoz v automatickém cyklu a jsou stručně popsána v následujících podkapitolách. Vlastní vstřikovací stroje určené pro IMD se neliší od běžných, ale z hlediska parametrů se vyžadují vyšší uzavírací síly (kvůli vyšším dotlakům na eliminaci propadlin) a relativně menší vstřikovací jednotky na omezení degradace materiálu v komoře, která by způsobila viditelné optické vady (IMD má rovněž delší cyklus). Standardní periferie mohou být beze změny zachovány, ale u manipulačního robota je třeba zohlednit vyšší hmotnost panelu na předehřev fólie a možnost opláštění okolí stroje „čistým prostředím“. Pro účely vstřikování dílů na provedení experimentu této práce byl vybrán vstřikovací stroj Engel ES 2550/500HL s manipulačním robotem Kuka KR150. Stručný přehled základních technických parametrů tohoto vstřikovacího stroje je uveden v příloze 1.

5.3.1 Odvíjecí zařízení na IMD fólii

Odvíjecí zařízení zajišťuje odvin fólie o definovaný krok při otevřené formě a vyjetém upínacím rámečku. Bylo použito odvíjecí zařízení (tzv. feeder) Kurz IMD – W (TWIN) (viz Obr. 29), jež je uchyceno na upínací desku odjížděcí strany stroje a skládá se z horní a spodní části.

Horní část zařízení obsahuje zejména válec pro IMD fólii, který je opatřen třecí brzdou s nastavitelným brzdným účinkem.

Spodní část zařízení je opatřena zejména hnacím válcem s krokovým motorem a válcem na odpadní fólii.



Obr. 29 Odvíjecí zařízení Kurz [41]

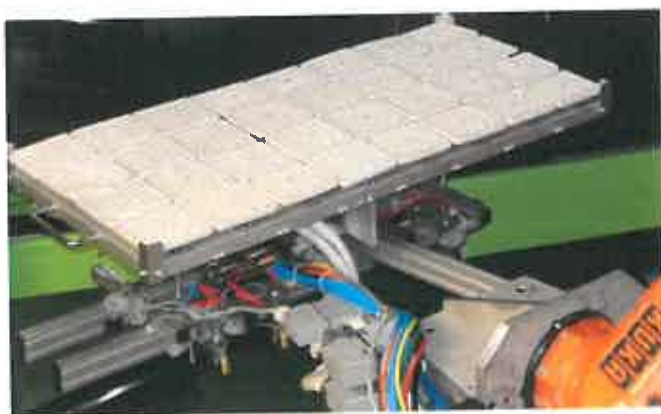
5.3.2 Systém na ohřev fólie

Na základě teoretických předpokladů shrnutých v kap. 4.4.1, byl jako výchozí typ ohřevu zvolen ohřev pomocí keramických článků. Variantně byl pro porovnání, na vybraná měření, zvolen ohřev pomocí IR trubic. Obě zařízení jsou detailněji popsány níže a pro ohřev jsou instalována na použitého robota Kuka KR 150.

Ohřev pomocí keramických článků

Pro účel ohřevu IMD fólie byl zkonstruován systém ohřevu s topným panelem

z keramických článků. Dle velikosti dílu byla zvolena jeho velikost 1000*400 mm, což odpovídá počtu 32 keramických článků. Tyto jsou o rozměru 122*122 mm od spol. Ceramicx, mají jmenovité napětí 230 V a příkon 400 W. Vlnová délka tepelného záření je 2-10 μm (dle teploty) [37]. Detail zařízení je uveden na Obr. 30. V každé řadě je umístěn zářič s termočlánkem typu K a vždy horizontálně v rámci jedné řady (4 zářiče) je tato informace zpracována a zářič regulován pomocí regulátoru topných zón Synventive LEC 12 (regulace teploty do 400°C).



Obr. 30 Topný panel s keramickými články

Před vlastním měřením ještě vždy probíhala kontrola teploty všech topných elementů, neboť ty bez termočlánku neumožňují zpětnou vazbu své funkčnosti.

Topný panel s karbonovými trubicemi

Za účelem nalezení ideálních podmínek předehřevu a pro srovnání se zářičem s keramickými topnými články byl rovněž použit topný panel s karbonovými trubicemi se zlatým reflektorem od firmy Heraeus. Vzhledem k velikosti dílu byla zvolena nejbližší typizovaná velikost (5 trubic 34*14 mm s rozestupem 60 mm a aktivní délkou ohřevu 850 mm - viz Obr. 31). Regulace zařízení probíhala pouze dle času, bez zpětnovazebního řízení.



Obr. 31 IR zářič s karbonovými trubicemi

5.3.3 Vakuový systém

Vzhledem k velikosti odsávaného prostoru pod fólií (cca 3 dm³) a možnosti vyvinout co nejhlubší vakuum v průběhu předtvarování se zachováním rozumné velikosti zásobníku vakua [8], byla zvolena následující kombinace zařízení:

- Vakuová pumpa Busch RA 0025 F 503 TA EX s maximálním sacím výkonem 25 m³/hod a dosažitelnou hodnotou vakua 0,1 mBar
- Vakuový zásobník o objemu 150dm³

Vzhledem k minimalizaci odsávaného objemu a tím i k minimalizaci poklesu úrovně vakua v zásobníku během předtvarování fólie, byl solenoidní ventil umístěn co nejbližší k nástroji. Díky tomuto je pak třeba uvažovat, že zásoba vakua k dispozici je kromě velikosti zásobníku zvýšená o objem vakuové hadice až k ventilu (cca 3 dm³).

5.3.4 UV pec na vytvrzování dílů

Jelikož byla při experimentu použita IMD fólie, která používá tzv. „post cure“ systém tedy vytvrzení svrchního laku až po zpracování, bylo třeba pro objektivnost experimentu dovybavit vstřikovací stroj vhodnou UV pecí (některé vady se mohou zvýraznit po aplikaci UV záření vč. doprovodného tepelného projevu). Byla zvolena UV pec SSR Engineering IMD 2 - 407 DR, která zároveň slouží jako pásový dopravník u stroje a je vybavena rtuťovou trubicí o délce 400 mm a maximálním výkonu 9000 W.

5.3.5 Čisté prostředí v oblasti stroje

Jak je již popsáno v teoretické části, pro výrobu IMD dílů je nezbytné čisté prostředí v oblasti stroje, neboť i velmi malá smítka, která se dostanou mezi fólii a leštěný povrch tvárnice jsou proznačeny na hotovém výrobku.

Jelikož byla snaha provést experiment v podmínkách podobných reálné výrobě, bylo zajištěno lokální „čisté prostředí“ v okolí stroje. Tohoto bylo docíleno kombinací opláštění stroje (vč. oblasti kolem robota – pomocí PC desek) a dosažení mírného přetlaku pomocí vhánění filtrovaného vzduchu (ISO 4, 4x1200 m³/hod), který redukuje možnost, aby do prostoru kolem stroje (zejména nástroje) vlétla samovolně smítka z prostoru haly (tzv. flowbox). Vháněný vzduch pak opouští prostor stroje nedokonalým zatěsněním všech otvorů.

V souvislosti s čistotou prostředí byla v blízkosti feederu navíc aplikována antistatická tyč Lontech EP-SH-N, aby eliminovala statický náboj vznikající při odvíjení fólie a tím zamezila ulpění nečistot, které byly do „čistého prostředí“ vneseny např. s výměnou formy, nebo odlupem drobných částí tisknuté vrstvy z IMD fólie.

5.4 Nastavení výchozích technologických parametrů na stroji při vstřikování zkušebních dílů

Vzhledem k množství nastavitelných parametrů a malému povědomí o technologii IMD není jednoduché nastavit procesní parametry. Hsieh [14], který zkoumal nastavení z hlediska množství procesních parametrů, u podobné technologie IML, dospěl k faktu, že existuje 2⁷⁰ možných nastavení procesu.

Bylo zvažováno použití faktoriálního testu za účelem usnadnění nalezení významných parametrů, ale jelikož se rozhodl nehodnotit vliv vstřikovacích parametrů a chtěl jednodušeji popsat probíhající jevy, tak byla tato možnost zamítnuta.

5.4.1 Určení výchozích vstřikovacích parametrů

Zpočátku bylo třeba určit vstřikovací parametry, které by u dílů vykazovaly stabilní zmetkovitost napříč spektrem různých hodnot přehřevu.

Nejprve bylo přistoupeno ke vstřikování bez fólie, kde bylo odladěno nastavení kaskád za konstantní vstřikovací rychlosti. Byl použit i simulační nástroj Mold Flow, který sice neumožňuje v potřebné míře simulovat zastřikování fólie, ale je dostatečný k simulaci toku bez fólie (viz Obr. 32) a počátečním vodítkem k hledání vhodných

vstřikovacích parametřů.



Obr. 32 Ukázka zkusmého plnění od druhého vtoku v programu Moldflow

Rovněž byly nastaveny ostatní parametry, které lze odladit i bez použití fólie, např. dotlak, čas chlazení, parametry plastikace a další (aby byly vyloučeny vady vzniklé ze vstřikování). Po nasazení fólie byly odlaďovány zejména rychlosti vstřiku ve specifických místech výrobku a snížena teplota tvárnice (na omezení asymetrického odvodu tepla).

Pro minimalizaci zmetkovitosti, bylo toto provedeno pro různou sekvenci spínání kaskád a zejména pro různé vtoky, které byly otevřeny jako první a následně bylo rozborem zmetkovitosti a rozměrovou kontrolou dílů určeno, který způsob plnění výrobku je ideální. Na základě vstřikování těchto pilotních IMD dílů bylo zjištěno, že rozhodující vstřikovací parametry pro kvalitu dílů jsou právě směr vstřikování, vstřikovací rychlost, ale i teplota temperace formy, kterou šlo měnit pouze v omezeném rozsahu, neboť příliš nízká teplota tvárnice způsobovala zejména nedostatečné prohřátí adhezni vrstvy fólie a tím i nepřilnutí dekorační vrstvy fólie k výrobku. S jejím zvýšením se pak zvyšovala četnost zejména vady „přehyb fólie“. Použité technologické parametry vstřikování, které mají předpoklad poskytovat nejnižší zmetkovitosti při výchozích nastavení parametrů předtvarování, jsou shrnuty v Tab. 1.

Tab. 1 Nastavení výchozích vstřikovacích parametrů na stroji ES 2550/500HL

Veličina	Hodnota											Jednotka
Teplota pevné strany	40											°C
Teplota odjiždějící strany/pod vtoky	35/16											°C
Teplota válce (od trysky zleva)	275	275	275	255	225							°C
Teplota horkého rozvodu	270											°C
Vstřikovací dráhy	95	90,5	72	65	54	48	38	29	19	0		mm
Vstřikovací rychlost	28	28	20	20	25	10	8	11	5	10		mm.s ⁻¹
Výše dotlaku	100	100	100	100	90	80	70	60	50	50		Bar
Čas dotlaku	0/1,3	2,6	3,9	5,2	6,5	7,8	9,1	10	12	13		s
Rychlost plastikace/zpětný tlak	50/15											ot.min ⁻¹ /Bar
Dráha plastikace/přepnutí na dotlak	95/25											mm
Polštář (cca)	19											mm
Otevření kaskád (1-6 zleva dílu)	120	72	62	50	42	30						mm
Zavření kaskád kaskád (1-6 zleva d.)	0	0	0	0	0	0						mm
Doba chlazení	15											s
Doba cyklu	72											s

5.4.2 Určení výchozího konceptu a parametrů předtvarování

Zejména na základě teoretických předpokladů, zkusmého vstřikování, ale i vlastních zkušeností byly určeny parametry, které jsou brány jako výchozí, tedy takové, co mají předpoklad vykazovat pro daný typ výrobku nejnižší podíl vadných kusů. Pro přehlednost jsou tyto hodnoty uvedeny v níže zobrazené tabulce (viz Tab. 2).

Tab. 2 Výchozí hodnoty parametrů předtvarování

Veličina	Hodnota
Typ předehřevu	keramický
Teplota předehřevu na všech zónách	280°C
Čas předehřevu	6s
Doba dochlazení fólie před zavřením formy	0s
Velikost zásobníku vakua	150 dm ³

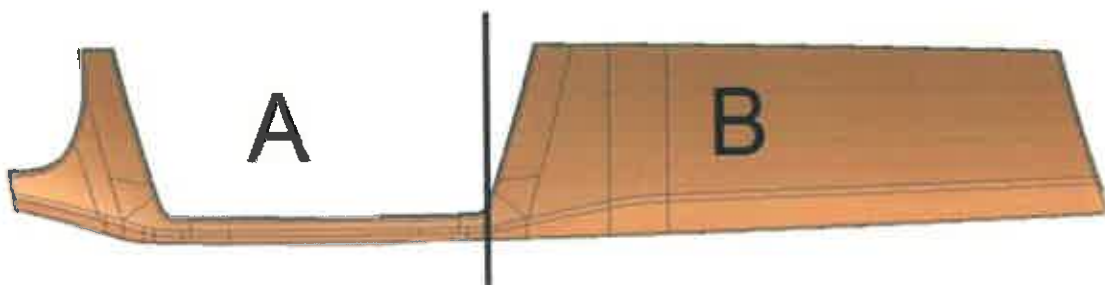
Nastavení parametrů předtvarování pro hodnocení jednotlivých vlivů je pak uvedeno v následujících kapitolách 5.5 - 5.6 a krajní hodnoty a kroky byly vždy vybrány tak, aby ani v krajních hodnotách intervalu parametrů nedocházelo k tvorbě 100% zmetků. Na druhou stranu bylo rozpětí zvoleno co nejširší, aby případné rozdíly byly měřitelné, či je bylo možno statisticky vyhodnotit.

Pokud bude v kvalitativní analýze dílů zjištěno, že více dílčích nastavení parametrů předeřevu oproti výchozímu (referenčnímu) nastavení povede k nižšímu výskytu vadných výrobků, pak budou tato nastavení zkombinována a validováno, zda výsledný efekt na kvalitu dílů bude patrný i u kombinace těchto nastavení.

5.5 Volba parametrů pro výzkum vlivu kombinace intenzity a doby předeřevu

Vzhledem k teoretickým předpokladům popsaným v kapitole 4.4.2 je prohřátí fólie dáno především intenzitou zářiče a délkou jeho působení. Výchozí nastavení předeřevu je uvedeno v 5.4 a ke zhodnocení vlivu parametrů intenzity a doby předeřevu jsou dle zkusebního vstříkování (na určení rozsahu parametrů) zvoleny parametry předeřevu uvedené v Tab. 3, které spočívaly ve vychýlení hodnot z referenčních ve 2 krocích pro ohřev fólie panelem s keramickými články, jejichž teplota byla pro dané měření po celém panelu konstantní.

Jak již bylo v teoretické části popsáno, je zde předpoklad, že snížení teploty ohřevu fólie v místě, kde dosahovaná členitost dílu je nižší, může mít pozitivní vliv na kvalitu dílů. Aby mohla být tato hypotéza potvrzena, byl díl podélně rozdělen na dvě části (viz Obr. 33) reprezentující „členitější“ (zóna A) a „rovinnější“ oblast (zóna B). Vzájemná poloha zářiče a upnuté fólie je volena tak, aby bylo technicky možné teploty pro jednotlivé zóny regulovat zvlášť.



Obr. 33 Rozdělení dílu na oblasti s různými oblastmi předeřevu (zóna A a zóna B)

Ke snížení teploty v rovinnější oblasti došlo ve stejných krocích jako u hodnocení vlivu teploty předeřevu konstantnímu v obou zónách. Pro porovnání a potvrzení výše vyřčeného předpokladu, byla teplota i v jednom kroku zvýšena, hodnoty opět uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3 Tabulka nastavení parametrů teploty a doby předehřevu při hodnocení jejich vlivu při použití keramických zářičů, kde modře jsou vyznačeny výchozí (referenční) hodnoty

Konfigurace č.	Teplota předehřevu zóny A [°C]	Teplota předehřevu zóny B [°C]	Doba předehřevu [s]	Měněný parametr
1	220	220	6	Teplota předehřevu v zónách A+B
2	250	250	6	
0 (Referenční)	280	280	6	
3	310	310	6	
4	340	340	6	
5	280	280	3	Čas předehřevu
6	280	280	4,5	
0 (Referenční)	280	280	6	
7	280	280	7,5	
8	280	280	9	
9	280	220	6	Teploty předehřevu v zóně B
10	280	250	6	
0 (Referenční)	280	280	6	
11	280	310	6	

Ačkoliv byl pro ohřev fólie variantně použit i předehřev pomocí karbonových IR trubic, tak vzhledem k absenci zpětnovazebného řízení byla výroba dílů při zkusmém vstřikování velice nestabilní. Jelikož je kvůli konceptu regulace a teplotám zdrojů tepla velmi těžké porovnávat výše uvedené ohřevy a zároveň byla dle zkusmého vstřikování obtížná výroba dobrých dílů s IR trubicemi, tak se cíl daných měření omezil spíše na vyhodnocení vhodnosti tohoto ohřevu pro technologii IMD s předtvarováním. Použitelný rozsah byl pouze cca 1s se středem intervalu v hodnotě 2s, která byl zvolena jako výchozí. Nastaveny byly kromě výchozí hodnoty obě hranice zjištěného intervalu (1,5s a 2,5s).

5.6 Volba parametrů pro výzkum vlivu velikosti vakua

Při stanovení parametrů pro výzkum vlivu velikosti vakua na průběh deformací i kvalitu dílů bylo opět přihlédnuto k teoretickým předpokladům zmíněným zejména v kapitole 4.4.4. Pokud vycházíme že předpokladu uvedeném v [8], že rychlost tvarování fólie by měla být co nejvyšší, pak z hlediska konstrukce zařízení, které neumožňuje regulaci tlaku (ten je limitován dosažitelným tlakem vývěvy), je zmenšení nádoby zásobníku vakua nejsnazší možností, jak potvrdit platnost tohoto předpokladu i pro IMD (jeho zvětšení by muselo být enormní, aby byl snadno

zaznamatelný trend změny hodnocených parametrů).

Zmenšení velikosti zásobníku způsobí výrazně vyšší pokles podtlaku vakua v průběhu tvarování a tím dojde k nižší rychlosti proudění vzduchu z prostoru pod fólií. Ve výsledku bude doba potřebná k tvarování fólie delší a tím pádem nižší průměrná rychlost tvarování.

Vzhledem ke konstrukci vakuového systému a dostupným prostředkům, bylo rozhodnuto o porovnání výchozí konfigurace (zásobník o objemu 150 dm³) a konfigurace bez tohoto zásobníku, kdy lze za velikost zásoby vakua považovat pouze objem vakua v hadici mezi vývěvou a vakuovým ventilem, což zaujímá přibližný objem 3 dm³ (s touto hodnotou je třeba navíc počítat i při použití zásobníku). Z hlediska technologických parametrů vstřikování a parametrů předehřevu byly použity tzv. výchozí parametry popsané v kapitole 5.4.1.

5.7 Volba parametrů pro výzkum vlivu doby dochlazení fólie

Pokud vycházíme z již dříve zmíněného předpokladu, že fólie má snahu se před čelem taveniny vlnit a případně se až přeložit, což je dle rešeršované literatury podpořeno jejím prohřátím, pak je rovněž předpokládáno, že pokud bude fólie dostatečně zchlazená, bude mít vyšší tuhost a tím pádem bude méně náchylná k zvlnění. Vzhledem k měření průběhu teploty fólie pomocí termokamery Flir (viz Obr. 34 až Obr. 36), bezprostředně po vytvarování fólie, byla zvolena doba dochlazení v čase 5s, který zaručuje ne zcela vychlazenou fólii a 10s, kde teplota fólie je již na úrovni teploty tvárnice. Pro přehlednost jsou parametry uvedeny níže v Tab. 4.

Tab. 4 Nastavení parametrů dochlazení fólie, kde modrá značí výchozí hodnoty

měření č.	teplota předehřevu [°C]	délka předehřevu [s]	doba dochlazení [s]
0 - (Referenční)	280	6	0
1	280	6	5
2	280	6	10

Ke všem těmto časům je v reálném procesu třeba přičíst čas potřebný k zavření formy, ale vzhledem k tomu, že jde pouze o srovnání vlivů na kvalitu výrobků a tento čas je kratší, než 5s, tak není dále uvažován.



Obr. 34 Snímek rozložení teplot na natvarované fólii bezprostředně po tvarování



Obr. 35 Snímek rozložení teplot na natvarované fólii 5s po tvarování



Obr. 36 Snímek rozložení teplot na natvarované fólii 10s po tvarování
(fólie dokonale vychlazená)

6 Proces měření

Tato kapitola a odpovídající podkapitoly pojednávají o postupu měření při provádění experimentů v této disertační práci, průběhu samotných experimentů i jejich vyhodnocení.

Při vlastním provádění experimentů byly minimalizovány náhodné vlivy, které by mohly ovlivnit výsledky měření.

Vstřikování dílů probíhalo vždy v sekvenci s minimálním časovým rozestupem a s vyřazením prvních 2 kusů z měření (po odstříkání formy 5 kusů). Počty hodnocených kusů jsou uvedeny v příslušných podkapitolách pro daná měření.

6.1 Vytvoření metodiky pro studium deformací fólie na IMD dílech

S odkazem na kapitolu 4.7, se v dostupné literatuře nevyskytuje zmínka o práci, kde by byla hodnocena deformace fólie na transferových IMD dílech (ani u standardní IMD, ani u IMD s předtvarováním). Na základě literární rešerše byly popsány způsoby hodnocení deformace u podobných technologií, ale vzhledem ke specifčnosti technologie IMD s předtvarováním (zejména „dvoustupňová“ deformace a transferový způsob dekorace), nelze tyto rovněž použít a je třeba přistoupit k tvorbě vlastní metodiky. Tato je popsána v následujících kapitolách 6.1.1 až 6.1.3, kde hlavním bodem dané metodiky je jednak vývoj metody tvorby rastru na danou IMD fólii, ale též způsob, jak za pomoci tohoto rastru hodnotit deformaci v obou stupních, které u IMD probíhají. Toto je zajištěno rastrem, který je viditelný jak po tvarování (před vstřikem), tak i na hotovém výrobku po vstřikování. Hodnocením změny jeho velikosti pak lze získat velikost deformace, která vznikla v procesním kroku předtvarování i v kroku zastřikování. Průběh deformací odpovídá níže uvedené rovnici (6)

$$\varepsilon_{\text{celk}} = \varepsilon_T + \varepsilon_V \quad (6)$$

6.1.1 Vývoj metody tvorby rastru na IMD fólii

Za účelem studia deformací po celém povrchu zkoumaného výrobku bylo třeba vyvinout speciální fólii s geometrickým rastrem, jehož deformaci by bylo možné měřit v obou fázích deformace u IMD s předtvarováním, tedy viditelný z obou stran IMD fólie.

Tisk zkušební IMD fólie s rastrem originálním způsobem (hlubotisk) od výrobce, který dodal i fólie pro experiment této práce, a ve stejném základním dekoru (Piano Black) je teoreticky možný, ale toto řešení by skýtalo nevýhodu, že natištěný rastr by byl vidět pouze po zastříknutí (např. bílá barva na černé) a nebylo by potenciálně možné studovat deformaci těsně po předtvarování, tedy před zastříknutím, neboť zmíněný dekor má velice malou průsvitnost, proto byl tento způsob pro potřeby této práce odmítnut. Sekundárně by tento princip znamenal náklady na výrobu tiskového válce a nesériový proces, což by přineslo neúměrně vysoké náklady na tisk této fólie.

Bylo hledáno řešení na oba výše popsané problémy, zejména viditelnost z obou stran. Bylo tedy nutné natisknout rastr náhradní technologií. Vzhledem k struktuře fólie (popsané v kapitole 4) je zřejmé, že nelze tento tisk provést z vnější strany jako u rešeršovaných výzkumů z oblasti IML (ze strany nosiče u IMD), ale ze strany tisknutých vrstev. Aby byl rastr viditelný i před vstřikováním, bylo třeba zvolit co nejsvětlejší barvu tisku, která by byla s černým dekorem kontrastní. Aby byl rastr viditelný i po zastříknutí, bylo předpokládáno, že půjde využít následujícího jevu, jehož funkčnost byla vyzkoušena ruční aplikací lihových barev před zastříknutím fólie: Při tisku na speciální adhezní vrstvu, která po aktivaci teplem (během vstřikování) způsobí adhezi mezi dalšími vrstvami a taveninou, dojde k jejímu překrytí a tím k horší adhezi tisknutých vrstev k základnímu materiálu. Vzhledem k tloušťce natisknutých soudržných vrstev kolem cca 10 μm lze pak tyto oblasti se zhoršenou adhezí mechanicky odstranit.

Na základě rešerše bylo prověřováno několik metod i inkoustů, kterými by potenciálně šlo tisknout na IMD fólii, ale rovněž bylo třeba zajistit dostupnost dané technologie a minimální ovlivnění jejich vlastností. Jako nejvýhodnější byly vybrány metody digitálního tisku a sítotisku, kde obě metody jsou dnes snadno dostupné a umožňují použití široké škály barev/inkoustů. Přesto jsem si byl u sítotisku vědom negativa zejména v podobě nemožnosti „nekonečného tisku“, který by zaručil souvislý rastr po celé fólii (tedy potřeba přesného pozicování fólie, aby byl souvislý rastr přes celý díl).

Právě z hlediska volby inkoustů bylo třeba zohlednit specifika technologie IMD, kde kromě výše zmíněného minimálního ovlivnění mechanických vlastností fólie, je třeba nepoškodit funkční vrstvy IMD fólie a mít k dispozici vysokou flexibilitu dotištěné vrstvy. V případě sítotisku byla vybrána barva Proell Mirror ink FSI, která je vhodná pro tisk na PET, je odolná při ohřevu, tvarování i zastříkování plastů a vzhledem

ke světle stříbrné barvě poskytuje dostatečný kontrast s černým klavírním lakem na IMD fólii (Piano Black). Z inkoustů vhodných pro digitální tisk byly vybrány, ekosolventní ROLAND Eco-Sol Max Ink a bezrozpouštědlový Signs Europa VXB.

V dostupné literatuře není tisk na transferovou vrstvu IMD fólie popsán. Ačkoliv použití UV inkoustu u digitálního tisku by přineslo výhodu v možnosti tisku bílé barvy (pro lepší viditelnost), tak zde byly předpoklady, že dojde k částečnému vytvrzení svrchní vrstvy IMD fólie a tím k ovlivnění vlastností fólie. Z tohoto důvodu nebyl digitální tisk s UV inkousty realizován.

Po zkušmém tisku bylo zjištěno, že tisk zhotovený sítotiskem s inkoustem na solventní bázi způsobil, pravděpodobně díky rozpouštědlům, viditelné poškození tisknutých vrstev IMD fólie v těsném okolí tisku. Vzorek s inkoustem na bezrozpouštědlové bázi se rovněž ukázal jako nevhodný z důvodu slabší adheze. Z výše uvedených důvodů byla vybrána technologie digitálního tisku s použitím ekosolventních inkoustů, který po zkušmém tisku nevykazoval viditelné nedostatky. Z dostupných prostředků byla vybrána tiskárna Roland XC 540 s ekosolventními inkousty ROLAND Eco-Sol Max Ink (viz Obr. 37).



Obr. 37 Digitální tiskárna Roland XC 540 při zkušmém tisku rastru na IMD fólii

Potisk ekosolventními inkousty běžně zaručuje velmi dobrou odolnost tisku, což by mělo zaručit i výdrž při velmi náročném namáhání při procesu vstřikování. Další výhodou použitého zařízení je zcela automatický tisk, který vzhledem k tisknutému množství IMD fólie snižuje časovou náročnost a minimalizuje vnesení nečistot do

fólie, či její poškození (např. mastnoty vnesené manipulací). Po zastříknutí prvních zkusmých tisku fólie bylo provedeno porovnání viditelnosti natisknutého rastru před a po vstřikování (viz Obr. 38). Viditelnost rastru před tvarováním byla při správném nasvícení dostatečná, ačkoliv natisknutá žlutá barva na černém podkladu se nejevila jako žlutá, ale jako „zmatnění povrchu“, které však mělo naprosto zřetelné linie.

Po zastříknutí bylo zřejmé, že při použití ekosolventních inkoustů, nebyl výše uvedený předpoklad, o narušení adheze, v dostatečné míře potvrzen. Při testu adheze lepicí páskou, která je ke zkoumanému povrchu nalepena a následně odtržena kolmým směrem, nedošlo kromě oblasti na spodním okraji dílu, k odtržení fólie v místech natisknutého rastru. Viditelnosti natisknutého rastru bylo nakonec dosaženo jemným zbroušením svrchních vrstev IMD filmu na povrchu výrobku, pomocí brusného papíru (hrubost 800), ale vzhledem k malé tloušťce natištěného rastru je zde riziko probroušení a rovněž je tato metoda velmi zdoluhavá a svou pracností pro výběr o velikosti dle požadavků plánovaného experimentu je prakticky neaplikovatelná v této disertační práci (obrázek viditelnosti rastru uveden na Obr. 38 vpravo).

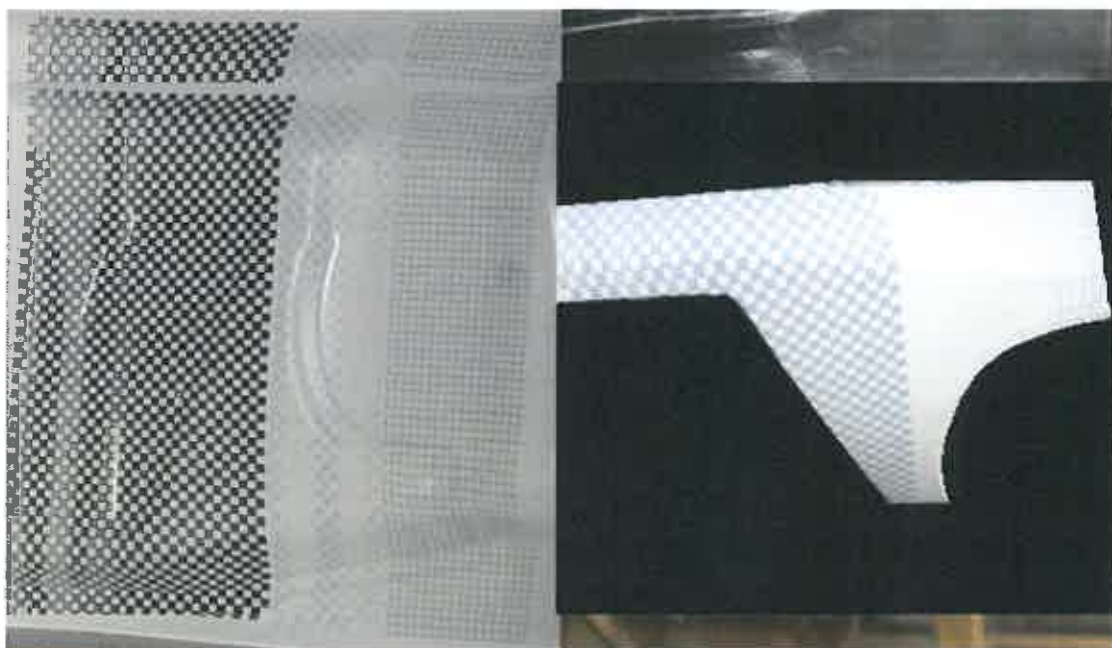


Obr. 38 Ukázky černé IMD fólie s natištěným rastrem před zastříknutím (vlevo) a po zastříknutí (vpravo - po odbroušení svrchních vrstev fólie)

Z výše popsaných důvodů byly hledány alternativy ke zkoušeným metodám tisku. Jelikož byl u digitálního tisku s ekosolventními inkousty prokázán nejen

bezproblémový tisk, ale též výdrž během náročného procesu vstřikování, tak bylo výhodné pokračovat v této metodě, ale zároveň zajistit viditelnost rastru po vstřikování. U bílé IMD fólie je vzhledem k nižší kryvosti pigmentu, dosaženo její částečné průsvitnosti a předpokládal jsem, že při tisku tmavého rastru, bude tento skrz tenkou transferovou vrstvu viditelný i po vstřikování (za použití světlého základního materiálu).

Po zkusmém tisku a předtvarování bylo dle předpokladu dosaženo vynikající viditelnosti rastru a rovněž po zastříknutí této IMD fólie bylo zjištěno, že průsvitnost bílého podkladu je dostatečná k tomu, aby byl tištěný rastr dostatečně viditelný i po zastříknutí (viz Obr. 39).



Obr. 39 Ukázky bílé IMD fólie s natištěným rastrem před zastříknutím (vlevo) a po zastříknutí (vpravo – bez dodatečných úprav)

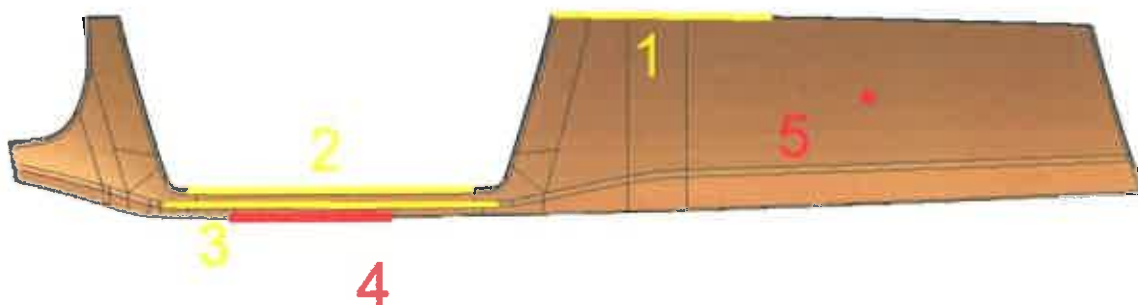
Na základě těchto výsledků tedy byla zvolena varianta tisku na bílou fólii. Tato fólie sice použitým pigmentem není zcela totožná s fólií používanou při hodnocení vad v rámci této práce, ale dle prohlášení výrobce došlo u obou fólií k použití stejného nosiče a ke stejné kompozici tisknutých vrstev. Nejpatrnější rozdíl je tak v absorpci tepelného záření bílým a černým povrchem. Toto bylo, pro lepší porovnatelnost dílů s rastrem a černých dílů, při měření zohledněno a korigováno zvýšením teploty předehřevu o 25 °C, což vzešlo jako výsledek porovnávání šíře nedotvarované

oblasti mezi černou a bílou fólií. Tato korekce byla automaticky zahrnuta do výroby všech vzorků s tištěným rastrem a již není dále zmiňována.

Z důvodu minimálního ovlivnění deformačních vlastností fólie tisknutou vrstvou byl vybrán slabý rastr, (mřížkového tvaru) který je podobný rastru dle výzkumu Shia Chung Chena [27], avšak vzhledem k velikosti zkoumaných nedotvarovaných oblastí, s délkou strany elementu pouze 3mm.

6.1.2 Vytvoření metodiky hodnocení předtvarované fólie před zastříknutím

Pro studium deformace fólie před vstřikováním, byla vybrána místa či zóny, která vykazovala při zkusmém kvalitativním hodnocení větší množství vad, či byla jinak specifická (viz Obr. 40). Šlo o 3 místa v nedotvarovaných oblastech a 2 v dotvarovaných, kde šlo o nejhlubší místo na díle (avšak rovinné) a o nejpříkřejší místo na díle (s nižší hloubkou). Tato místa pak dále sloužila k hodnocení deformací, posuvů i ke kvalitativnímu vyhodnocení. Přičemž počet dílů opatřených rastrem, zhotovených na jedny parametry, byl vždy 7.



Obr. 40 Oblasti určené k měření deformace elementů

Kde: zóna 1-3 jsou nedotvarované oblasti

zóna 4 je dotvarovaná oblast s nejvyšší příkrostití

zóna 5 je dotvarovaná oblast s nejvyšší hloubkou

Vlastní měření velikostí elementů rastru ve směru x a y probíhalo pomocí tenkých flexibilních měrek, kde byly laserem vygravírované rysky pro různé hodnoty vzdálenosti (typické hodnoty měřitelné v dané aplikaci s krokem 0,1mm – průběh gravírování viz Obr. 41).

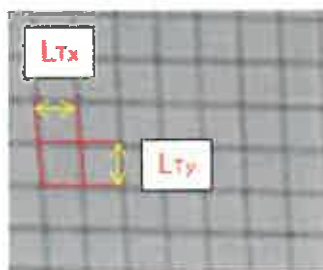


Obr. 41 Gravírování flexibilních měrek laserem VÚTS LM05/05X.W

Porovnáváním rysek s rastrem předtvarované fólie byla vybrána hodnota, která nejvíce odpovídala skutečné velikosti elementu. Poloha hodnocených elementů v nedotvarovaných oblastech byla vybírána tak, aby se vždy celá plocha elementu nacházela v dané oblasti. Pokud byla nedotvarovaná oblast natolik široká, že se v hlavním směru deformace vyskytovaly alespoň 2 elementy, pak byla kvůli zvýšení přesnosti počítána střední hodnota velikosti elementu z měření dvou elementů. Ukázka měření elementu je na Obr. 42. Naměřené hodnoty byly jednak zaznamenány pro vyhodnocení deformace během vstříku (v kontextu s následující kapitolou 6.1.3), tak bylo možné vypočítat deformaci způsobenou pouze předtvarováním ε_T (dle 7).

$$\varepsilon_T = \frac{L_T - L_P}{L_P} \quad (7)$$

kde: L_T - Velikost rastru po tvarování ve směru x či y [mm]
 L_P - Velikost natištěného rastru (před tvarováním ve směru x či y) [mm]



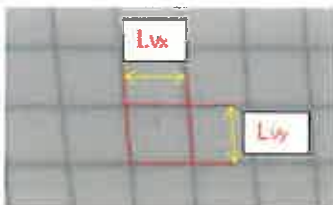
Obr. 42 Ukázka měření velikosti elementu na předtvarované fólii

V kapitole 4 je uveden předpoklad, že vlivem toku taveniny dochází k vlnění a následnému posuvu fólie. Pro účel studia těchto posuvů fólie byly vybrány oblasti okolí zóny č.1 a zóny č.3 dle Obr. 40, které charakterizují místo obecné

(pod nedotvarovanou oblastí) a místo v nedotvarované oblasti. Jelikož probíhalo měření těchto posuvů jak na předtvarované fólii, tak na hotovém díle, je pro snazší pochopení principu měření uveden ucelený popis až v následující kapitole (viz kap 6.1.3). Měření probíhalo na stejných vzorcích jako hodnocení deformace.

6.1.3 Návrh hodnocení vzorků s rastrem po zastříknutí

Vyhodnocení deformace elementů a jejich posuvu po zastříknutí probíhalo již na hotových dílech. V souvislosti s předchozí kapitolou 6.1.2 byly vyhodnoceny velikosti elementů, které byly hodnoceny před vstřikováním (uvedeno v předchozí kapitole viz Obr. 40). Měření probíhala opět pomocí měrek popsaných v předchozí kapitole. Kromě velikostí elementů v nedotvarovaných oblastech 1-3 jsou hodnoceny znovu elementy 2 zón z plně dotvarovaných oblastí. U měřených elementů byly hodnoceny zvláště jejich x a y rozměry (viz Obr. 43), aby bylo možné porovnávat poměrnou deformaci v obou směrech. Kvůli zjednodušení nebyl vliv rotace elementů uvažován.



Obr. 43 Měření velikostí rastru na hotových dílech

Z hodnot velikosti elementů na hotových IMD dílech a velikosti natištěného rastru je vypočtena dosažená celková poměrná deformace $\varepsilon_{\text{Celk}}$ ve směru x a y dle (8).

$$\varepsilon_{\text{Celk}(x,y)} = \frac{L_V - L_P}{L_P} \quad (8)$$

Kde: L_P – velikost hrany rastru ve směru x, či y po tisku (před tvarováním) [mm]
 L_V – velikost hrany rastru ve směru x, či y po vstřikování [mm]

Pro snadné porovnání jednotlivých deformací dosažených v procesu IMD a platnost rovnice $\varepsilon_{\text{Celk}} = \varepsilon_T + \varepsilon_V$ byla velikost poměrné deformace dosažené vstřikem vztažena rovněž k počáteční velikosti natištěného rastru na IMD fólii a vypočítána dle (9).

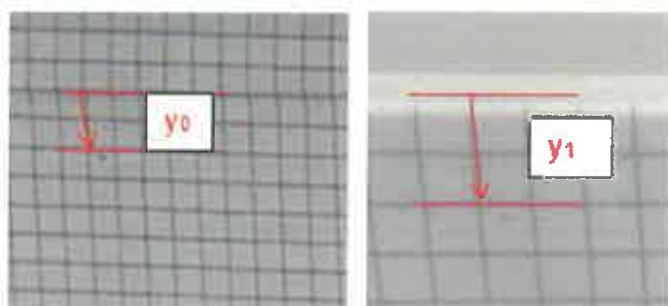
$$\varepsilon_{V(x,y)} = \frac{L_V - L_T}{L_P} \quad (9)$$

Kde: L_V – velikost hrany rastru ve směru x, či y po vstřikování [mm]

L_T – velikost hrany rastru ve směru x, či y po tvarování (před vstřikováním) [mm]

V kontextu s předchozí kapitolou 6.1.2, byly vyhodnoceny posuvy elementů v dokonale dotvarované oblasti (před nedotvarovanou oblastí č. 1) a posuv elementů v konkrétním místě nedotvarované oblasti č. 3 (oproti dotvarovaným oblastem). Toto dle předpokladu vypovídá o tom, jaké hodnoty nabývá výslednice posuvu zvlněné fólie před čelem taveniny a tvarové paměti.

Posuv byl hodnocen vždy ve směru osy souřadného systému, která je nejbližší směru toku, tedy u bodu č. 1 v ose y a u bodu č. 3 v ose x. Vzhledem k povaze dílu byla u bodu č. 1 vybrána hrana nejbližšího elementu pod nedotvarovanou oblastí, která se však již 100% dotýká povrchu tvárnice (je dotvarovaná). U bodu č. 3 hodnocen posuv vůči dotvarované části na zastříknutém díle. U bodu č. 1 pak došlo k hodnocení posuvu na základě rozdílu vzdálenosti hrany elementu od kraje dílu před a po zastříknutí. Měření bylo prováděno pomocí posuvného měřítka s přesností 0,01. V případě hodnocení posuvu v bodě č. 3 bylo použito flexibilních měrek s delšími rovnoběžkami, které umožňují měření lokálního posuvu vůči plně dotvarovaným oblastem. Pro názornost je na obr. Obr. 44 uvedena vizualizace tohoto měření (v oblasti č. 1 deformační analýzy) nejdříve na pouze předtvarované a poté zastříknuté fólii s rastrem.



Obr. 44 Ukázka měření posuvů fólie u nedotvarované oblasti č.1

Posuv v oblasti č. 1 poté dostaneme dosazením do jednoduché rovnice níže:

$$\Delta_{\text{pos1}} = y_0 - y_1 \quad (10)$$

Kde: y_0 – vzdálenost mezi hranou dělicí roviny a linií rastru v definovaném bodě po natvarování, ale před vstřikem [mm]

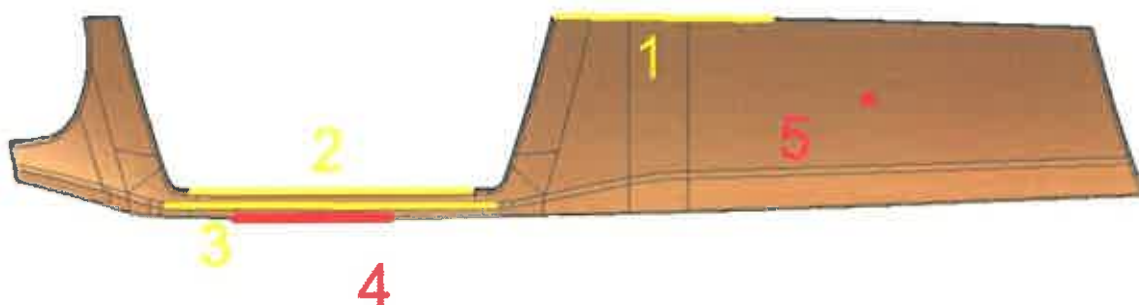
y_1 – vzdálenost mezi hranou dělicí roviny a linií rastru v definovaném bodě po vstřiku [mm]

V případě nedotvarované oblasti č. 3 je pak díky měření pouze na hotovém díle posuv rovný hodnotě x , což je vzdálenost ve směru x mezi dotvarovanou a nedotvarovanou částí rastru ($\Delta l_{pos3} = x$).

6.2 Způsob provedení kvalitativní analýzy

Jako podpůrný prostředek studia jevů probíhajících v procesu IMD s předtvarováním a jejich vlivu na kvalitu dílů, byly vyrobené IMD díly hodnoceny i pomocí kvalitativní analýzy.

Pro prvotní hodnocení kvality dílů byla vybrána místa, která jsou svým umístěním specifická, (např. určitá příkrost, či míra nedotvarování) či byl předpoklad, že mohou mít souvislost s probíhajícími jevy. Díly byly takto prvotně hodnoceny ve 14 zónách, ale v souvislosti s řešeným tématem a účelem kvalitativní analýzy, byly pro další vyhodnocení vybrány nejdůležitější oblasti, které byly rovněž zvoleny pro hodnocení deformace. Tyto jsou zopakovány na Obr. 45.



Obr. 45 Zóny výrobku na určení výskytu vad v kvalitativní analýze

Kde: zóny 1-3 jsou nedotvarované oblasti

zóna 4 je dotvarovaná oblast s nejvyšší příkrostití

zóna 5 je dotvarovaná oblast s nejvyšší hloubkou

Pro provedení kvalitativní analýzy dílů je z hlediska dostatečné vypovídající schopnosti vystříknuto vždy 10 dílů na stejné parametry. Přičemž vzorků vystříknutých na výchozí/referenční parametry bylo 100. Pro jejich kvalitativní vyhodnocení byly vytipované vady, které se dle dostupné literatury, teoretických předpokladů i zkušeností mohou u tohoto typu výrobků vyskytnout, a zároveň je předpoklad, že jsou závislé na parametrech předtvarování fólie. Zcela vyřazeny a tudíž nezahrnuty do kvalitativní analýzy jsou vady, které nemají se způsobem

předtvarování evidentní souvislost (např. vady způsobené nečistotami, tiskovými vadami, vady z nesprávného převíjení fólie, vady z degradovaného materiálu – stříbření atd.). Po zkušmém vstřikování při určování parametrů předtvarování bylo zjištěno, že i některé předpokládané vady se vyskytují velmi okrajově a z hlediska zjednodušení vyhodnocení byly zařazeny do kategorie „ostatní vady“. Vlastní vady, které jsou v kvalitativní analýze hodnoceny, jsou uvedeny níže a jejich stručný popis je dle dostupných informací uveden v jednotlivých kapitolách teoretické části (ucelený popis vad se v dostupné literatuře nenachází):

- Přehyb fólie
- Mikrotrhliny
- Prasklina/průraz fólie
- Ostatní vady

Kromě určení místa výskytu vady bylo třeba kvantifikovat dané vady. Vzhledem ke snaze se přiblížit vyhodnocení kvality v reálné výrobě, byly vady rozděleny na vady, které by způsobily odmítnutí výrobku a na ty, které by přes svoji přítomnost byly akceptovatelné. Pro každý dílčí výzkum určitého vlivu je hodnocen zvláště podíl vadných dílů NOKx a dále tzv. „ukazatel množství vad na díle“ SCx. Pro účely zjištění SCx je pro dílčí výzkumy zhotovena tabulka přítomnosti vad, ve které vyhodnocení pro jeden určitý díl tvoří vždy jeden řádek. Díly vyrobené se stejnými parametry se opakují i v následujících řádcích (dle počtu vyrobených kusů s tímto nastavením). Seznam hodnocených vad zopakovaný pro každou zónu výrobku pak tvoří sloupce této tabulky. V případě výskytu určité vady v určité zóně je uvedena hodnota „1“ v řádku daného dílu. V rámci jedné parametrů byl pro každou vadu (přípustné nepřipustné dohromady) v každé zóně určen jejich podíl vzhledem k velikosti hodnoceného vzorku (jedny parametry předtvarování). Tyto podíly byly v rámci všech vad ve všech zónách pro jedny parametry sečteny a vyjadřují hodnotu, která umožňuje porovnávat množství vad mezi jednotlivými parametry a v této práci byla nazvána jako ukazatel množství vad na díle (SCx). Pro názornost uvádím níže vzorec pro jeho výpočet (11)

$$SC_x = \sum_{\text{zóny výrobku}} \sum_{\text{jednotlivé vady}} \frac{\text{počet hodnocených vad}}{\text{počet hodnocených vzorků}} \quad (11)$$

Pokud by každý výrobek ve výběru (nezáleží na velikosti výběru, neboť se uvažují podíly zastoupení ve výběru) vykazoval v každé zóně všechny hodnocené vady, pak by tento ukazatel nabyl hodnoty 20. (OK (1) x 5zón x 4 hodnocené vady).

Zdrojová i vypočtená data pak byla dále statisticky zpracována či filtrována dle jednotlivých požadavků vyhodnocení.

6.3 Návrh statistického vyhodnocení naměřených dat

6.3.1 Statistické vyhodnocení deformační analýzy

U statistického vyhodnocení výsledků z deformační analýzy (jak celkové deformace, tak poměrné deformace dosažené vstříkem) bylo použito lineární regrese $y = ax + b$, kdy se statisticky testovalo, zda platí hypotéza H_0 , kde parametr $a = 0$ oproti hypotéze H_1 $a \neq 0$. Dále výsledky byly graficky zhodnoceny pomocí krabicových grafů, kdy z každé skupiny měření se stanovila minimální hodnota, 25 % kvantil, medián, 75 % kvantil a maximální hodnoty.

Přestože vstupní data obsahovala často více než dva vstupní soubory, nebylo využito pro hodnocení shody středních hodnot metody ANOVA, a to především z důvodu, že vstupní soubory nejsou zcela disjunktní skupiny, ale jsou fyzikálně spjatý například teplotou předehřevu.

Předpokládejme, že změnou sledovaného parametru (např. teplota předehřevu) se úměrně změní i relativní četnost vadných výrobků. Pro prokázání této změny budou data zmetkovitosti proložena přímkou $y = ax + b$ a následně otestováno, zda parametr a je různý od nuly. V případě že ano, byla nalezena závislost mezi měněným parametrem a zmetkovitostí, v opačném případě tato závislost nalezena nebyla.

Při hledání regresní funkce ve tvaru $y = ax + b$ je třeba minimalizovat součet čtverců reziduí, minimalizujeme tedy funkcionál:

$$\varphi = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - Y_i)^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b - ax_i)^2 \quad (12)$$

Minimalizaci provedeme derivováním funkcionálu φ podle proměnných a a b . Přičemž derivace se položí rovny 0 a z výsledků se odvodí odhady parametrů a a b pomocí vzorců:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} - b \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \bar{y} - b\bar{x} \quad (13)$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - \frac{\sum_{i=1}^n y_i \sum_{i=1}^n x_i}{n}}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n}} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) y_i}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (14)$$

Pro testování významnosti parametru a lze využít výběrovou statistiku $T = \frac{a - \alpha}{s_a}$, kde a představuje vypočtenou hodnotu parametru lineární regrese, α testovanou hodnotu – v tomto případě je rovno 0. s_a je směrodatná odchylka odhadu parametru a , která se vypočte dle (15):

$$s_a = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - b - ax_i)^2}{n - (k+1)}} \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (15)$$

Kde: n je počet měření a k počet odhadovaných parametrů, a a b jsou zjištěné hodnoty lineárního modelu, x_i vstupní hodnoty parametru a y_i relativní četnost.

Lze dokázat, že testová statistika $T = \frac{a - \alpha}{s_a} = \frac{a - \alpha}{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - b - ax_i)^2}{n - (k+1)}} \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}}$ má Studentovo

rozdělení s $(n - k - 1)$ stupni volnosti. Pomocí testu se řeší hypotéza na hladině významnosti α :

H_0 Parametr a lineárního regresního modelu je roven 0 a je možné ho zanedbat.

H_1 Parametr a lineárního regresního modelu není roven 0 a není možné ho zanedbat.

Protože je naměřeno malé množství vzorků, bude u každého měněného parametru vypočten i 95% konfidenční interval relativní četnosti dle vzorce:

$(p - z_{1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}; p + z_{1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}})$, kde $z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ představuje kvantilovou funkci normovaného normálního rozdělení.

6.3.2 Statistické vyhodnocení kvalitativní analýzy

Při měření na jednotlivých vzorcích zaznamenáváme výsledky OK/NOK ve tvaru 0 / 1, kde 1 představuje stav, kdy došlo ke vzniku nepřijatelného výrobku. Dále je hodnocen průměrný výskyt jedné vady v jedné oblasti, kde není kvantifikováno, zda v této jedné oblasti byla určitá vada pouze jednou, nebo vícekrát, ale ukazatel podá přibližný náhled na celkovou jakost výrobku, tedy nejen, zda může být v případě reálné výroby zákazníkem akceptován, či nikoliv.

Z naměřených dat lze porovnávat pouze relativní četnost stavu 1 v určitých skupinách, přičemž skupiny představují určitou změnu technologických podmínek (například teplota, doba ohřevu apod.) oproti referenčnímu měření.

K vyhodnocení výsledků jsou navrženy následující testy:

- a) Test homogenity dvou binomických rozdělení.
- b) Lineární regrese (navazuje na výsledky z bodu 1).

a) Test homogenity dvou binomických rozdělení lze použít, jestliže se zjišťuje shoda relativních četností dvou výběrů, kde výsledky jsou ve tvaru 0/1. V případě této práce je k dispozici více vzorků vzniklých při odlišných technologických parametrech (například teplota předehřevu je 220, 250, 310 a 340 °C), u sledovaných parametrů dochází k postupné změně a výsledky shody relativní četnosti se porovnávají s referenční hodnotou (například 280 °C). Dále lze předpokládat, že změna parametru od referenční hodnoty buď nebude mít vliv na zvýšení relativní četnosti zmetkovitosti, nebo vliv bude úměrně závislý na změně parametru a nejvíce se projeví při některé krajní hodnotě parametru. Nutné předpoklady testu jsou, že počet měření v každé ze skupin je alespoň $n > \frac{9}{p_1(1-p_1)}$, tj. při očekávaném procentu výskytu vadných dílů 30 % představuje vstupní soubor 42 vzorků. Jsem si vědom, že počet naměřených vzorků v jednotlivých skupinách je menší (z důvodu dostupnosti fólie), než je předpoklad testu. Na druhou stranu, počet referenčních vzorků byl 100 a pokud se měření z jednotlivých skupin sloučí do skupin viz níže, je počet měření blízký požadavku testu:

- parametr je nižší než referenční
- referenční parametr
- parametr je vyšší než referenční

Tvar testové statistiky pak uvádí (16) níže:

$$T = \frac{(p_1 - p_2)}{\sqrt{\frac{p_1(1-p_1)}{n_1} + \frac{p_2(1-p_2)}{n_2}}} \quad (16)$$

Tato má v případě platnosti nulové hypotézy přibližně normované normální rozdělení s parametry střední hodnoty $\mu = 0$ a směrodatné odchylky $\sigma = 1$. Hypotézu shody relativních četností H_0 nezamítáme na hladině významnosti 5 %, jestliže výsledná testová statistika je v mezích $(-1,96; 1,96)$. V opačném případě nastává hypotéza H_1 , tj. dochází ke změně relativních četností mezi výběry.

b) Je vysloven předpoklad, že změnou sledovaného parametru (např. teplota předehřevu) se úměrně změní i relativní četnost vadných výrobků. Pro prokázání této

změny budou data zmetkovitosti proložena přímkou $y = ax + b$ a následně otestováno, zda parametr a je různý od nuly. V případě že ano, byla nalezena závislost mezi měněným parametrem a zmetkovitostí, v opačném případě tato závislost nalezena nebyla.

Při hledání regresní funkce ve tvaru $y = ax + b$ byl použit stejný postup jako v předchozí kapitole (viz 6.3.1).

6.4 Vyhodnocení zkoumaných vlivů předtvarování IMD fólie

Procesem experimentálního měření popsaného dle kapitol 6.1 a 6.2, byla získána data, která byla dále zpracována a jsou vyhodnocena v následujících kapitolách. Na základě experimentálního měření a testů zastříkávání bylo zjištěno, že vytvořená nová metodika hodnocení deformací během IMD procesu a tvorby rastru na IMD fólii (popsána v kapitole 6.1) je pro tento účel aplikovatelná, neboť i při tisku rastru na adhezní vrstvu směrem od taveniny, nedošlo na žádném z dílů k smývání inkoustu rastru, aniž by byla smytá i vlastní transferová vrstva fólie. U všech vzorků byla též zachována vynikající čitelnost/měřitelnost rastru před i po zastříknutí fólie.

Dle popisu v kapitole 6.1 byly měřeny velikosti elementů před a po vstříkávání ve vybraných oblastech charakterizujících 3 nedotvarované oblasti, k tomuto dále plně dotvarované rovinné místo s největší hloubkou (vzdálenost od výchozí polohy fólie) a plně dotvarované místo s největší příkrostití vůči rovině fólie. Ve dvou ze třech zmíněných nedotvarovaných oblastí pak byly hodnoceny posuvy rastru v hlavním směru toku taveniny. Ve stejných místech, jako byly měřeny deformace elementů rastru, byla hodnocena kvalita dílů, charakterizována přítomností vytipovaných vad. Ačkoliv byla tato kvalitativní analýza vybrána pouze jako podpůrný nástroj, tak výrazně přispěla k pochopení jevů v komplexním procesu IMD s předtvarováním, k určení bodů pro deformační analýzu, ale i k zjištění souvislosti mezi zkoumanými vlivy, dosaženou deformací a přítomností vad. Její princip je popsán v kapitole 6.2 a návrh statistického vyhodnocení pak v kapitole 6.3. Výsledky tohoto statistického vyhodnocení nebyly v porovnání se samotnými hodnotami výskytu vad (NOK_x a SC_x) jednoznačné, což bylo pravděpodobně způsobeno nízkým počtem nereferenčních vzorků (počty voleny s ohledem na dostupné množství fólie). Z výše uvedeného důvodu bylo přistoupeno ke slučování parametrů do skupin a následnému společnému vyhodnocení. Toto již umožňovalo statisticky prokázat zkoumané souvislosti u závislosti hlavních

proměnných, času a teploty předehřevu. Na druhou stranu bych rád podotkl, že ačkoliv nebyly některé souvislosti statisticky prokázány, tak samotné hodnoty ukazatelů NOK_x a SC_x dostatečně korespondovaly se skutečností a považuji je za dostatečně relevantní k tomuto výzkumu, kde údaje o četnostech jednotlivých vad napomáhají pochopení jevů probíhajících u technologie IMD s předtvarováním.

6.4.1 Vyhodnocení celkové deformace elementů IMD fólie pro veškeré proměnné veličiny

Ačkoliv byl v předložené disertační práci hodnocen vliv teploty a doby ohřevu, doby dochlazení a síly vakua zvlášť, tak v kontextu s výsledky dosažené celkové deformace, je toto vyhodnocení provedeno pro dané proměnné veličiny souhrnně.

Po změření velikosti elementů rastru na všech hodnocených dílech bylo zjištěno, že v ose x dílu, (pro referenci nejdelší rozměr dílu je v ose x, nejkratší v ose z) nedochází až na „nedotvarované“ oblasti k zásadnějšímu odchýlení od natištěné velikosti rastru. Toto je pravděpodobně způsobeno tím, že pokud bychom na díle provedli řez v rovině xz, pak v jakékoliv hodnotě souřadnice y (v rámci dílu) nepřekonává fólie výrazné změny souřadnice v ose z (příkrost je též velmi malá). Tyto překonává až mimo díl (viz Obr. 46 – příkré oblasti v levém a pravém okraji tvárnice vložky - žlutě), kde byla dodatečným měřením zjištěna vyšší míra deformace.

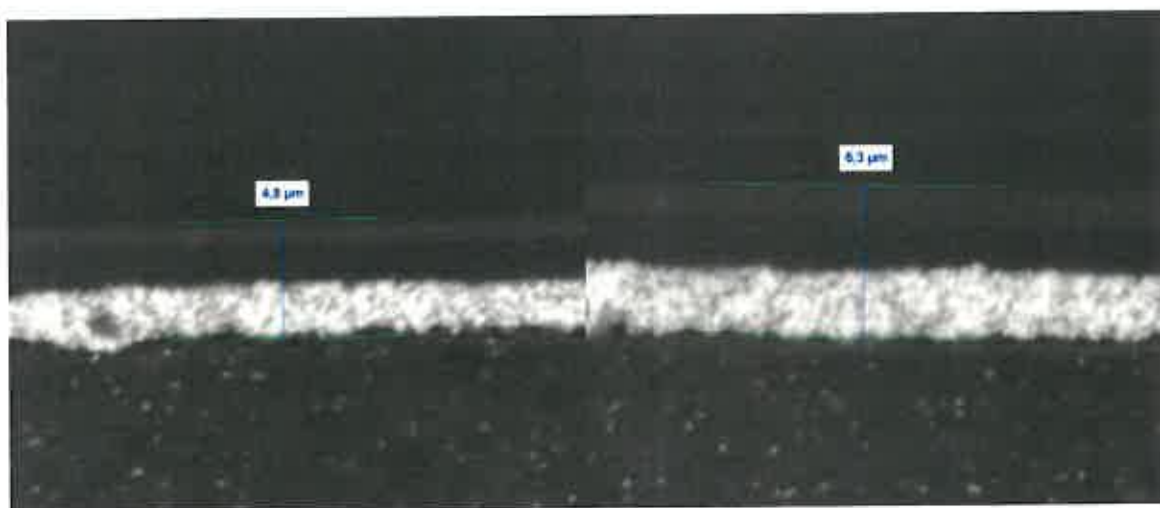


Obr. 46 Řez zkušebního tělesa v rovině xz na ukázkou jeho rovinnosti, kde červeně je vyznačen průmět oblastí dílu v daném řezu a žlutě oblastí s vyšší příkrostití

Naopak ve směru y byly zaznamenány změny, kde napříč různými příčnými řezy dílu byly naměřeny různé velikosti elementu rastru.

Je zajímavé, že změna velikosti rastru ve směru y nebyla na úkor změny ve směru x, kde velikost zůstala bez měřitelné změny. Na základě měření tloušťky nosiče fólie po vstříkování (pomocí mikrometru s přesností 0,001 mm) bylo zjištěno, že nárůst rozměrů ve směru y je proporcionálně kompenzován snížením tloušťky fólie. Jsem si

vědom, že při měření tloušťky fólie tímto způsobem může docházet k chybě vlivem velikosti dířku 6,4 mm (větší než velikost elementu rastru), či nepřesnému napolohování měřidla v neoznačené fólii, proto jsem přistoupil k potvrzení této teorie, pomocí studia změny tloušťky tisknuté vrstvy pod elektronovým mikroskopem (SEM - Aspek eXpress). Na níže uvedeném obrázku (Obr. 47) je možné vidět naměřené tloušťky tisknuté vrstvy v místech, kde byla naměřena velikost rastru 3,6 mm a 4,7 mm, což přibližně koresponduje s naměřenými tloušťkami 4,8 μm a 6,3 μm .



Obr. 47 SEM snímky tloušťky tištěné vrstvy

Důvodem tohoto chování je jednak pevné upnutí fólie rámečkem, kde povrch tvárnice, do které se musí fólie natvarovat je větší, než povrch fólie upnuté v rámečku, tedy při předpokladu platnosti zákona zachování objemu, musí být veškerý nárůst plochy kompenzován snížením tloušťky viz (17).

$$V = S \cdot t = \text{konst.} \quad (17)$$

kde: V – objem fólie pod plochou vybraného elementu [mm³]
 S – plocha vybraného elementu [mm²]
 t – tloušťka fólie pod plochou vybraného elementu [mm]

Při konkretizaci na oblast nedotvarovaného rádiusu (ať již ke konci tvarování nebo během vstřiku) jde o oblast, kde je třeba provést deformaci zpravidla v jednom směru a v okolí této oblasti je již fólie díky své tloušťce zchlazena, proto je třeba prodloužení v požadovaném směru opět kompenzovat snížením tloušťky fólie.

V oblastech, kde fólie před vstřikem nebyla dokonale vytvarovaná, byly nalezeny

vyšší stupně deformace fólie, což je v souladu s předpoklady vyslovenými v kapitole 4 a částečně koresponduje i s Melhornem [17]. Při hodnocení vlivu celkové deformace fólie po zastříknutí IMD fólie, v závislosti na změně parametrů zařazených do různých skupin (vliv teploty předehřevu, vliv času předehřevu atd.) bylo použito statistické vyhodnocení včetně krabicových grafů. Body a parametry, pro které byla potvrzena či zamítnuta hypotéza H_0/H_1 (závislost či nezávislost jednotlivých parametrů na výslednou deformaci), jsou uvedeny v níže uvedené Tab. 5.

Tab. 5 Výsledky statistického vyhodnocení závislosti parametrů předehřevu na $\varepsilon_{\text{celk}}$

Potvrzení závislosti celkové deformace $\varepsilon_{\text{celk}}$ na vybraných proměnných pro body charakterizující 3 specifické oblasti					$H_1: a \neq 0$ (závislé)	$H_0: a = 0$ (nezávislé)
Proměnné předehřevu	Oblasti	Nedotvarované oblasti			Dotvarované oblasti	
	Body	1	2	3	Nejpříkřejší	Rovinný
Teplota předehřevu		H_0	H_0	H_1	H_0	H_0
Čas předehřevu (keramické články)		H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Teplota v rovinných obl. Dílu (zóna B)		H_0	H_0	H_0	H_0	H_0
Velikost zásobníku vakua		H_0	H_0	H_1	H_0	H_0

Ve výše uvedené tabulce je rovněž možno vidět, že pro většinu hodnot platí hypotéza H_0 , tedy, že data nejsou na zkoumaných parametrech závislá. I v místech, kde platí H_1 , lze při rozboru velikosti parametru „a“, krabicových grafů a faktu, že H_1 je přijata maximálně pro jeden měřený bod v rámci stejných parametrů, předpokládat, že celková poměrná deformace jednotlivých elementů fólie na hotovém IMD díle není závislá na parametrech předtvarování.

Důvody, proč nebyly naměřeny statisticky významné rozdíly v deformacích daných elementů za různých technologických podmínek předehřevu, by mohly být následující: V případě oblastí, které jsou zcela dotvarované a zároveň dostatečně vzdálené od nedotvarovaných je tato závislost zřejmá, neboť se předpokládá, že k dalšímu tvarování taveninou již nedochází a v průběhu tvarování dochází k rovnoměrnému protahování fólie až do kontaktu se stěnou tvárnice, kdy tenká fólie prakticky okamžitě přestane být dostatečně tvárná a tvarování se účastní zbylá část fólie. Jelikož je fólie velice tenká a tvar poměrně mělký (např. v porovnání s tvarováním kalíšku), tak toto platí na velkou část plochy a případné závěry, které popsal např. Shia-Chung Chen [27], že při vyšších úrovních prohnutí fólie, se více

projevuje její posuv, se nepotvrdily. Samozřejmě vyšší prohřátí fólie má pozitivní vliv na rychlost tvarování. Při nižším prohřátí fólie rychle klesá tvárnost a tvarování pokračuje do momentu (nazveme ho v kontextu množství dokonale dotvarované fólie v řezu tvarované oblasti, místem „X“), kdy síla vakua již není dostatečná k provedení další deformace (deformační odpor fólie se zvyšuje kromě snižující se teploty i s dosaženou deformací – např. dle Phillipse [19]), toto koresponduje i s vysvětlením dle Krebse [9]. Pokud si představíme tuto situaci v místě, kde se setkávají dvě plochy pod menším úhlem se zakončením rádiem, (případ tzv. nedotvarovaných oblastí) a zároveň fólie byla prohřata na nejnižší úroveň, je zbytek fólie od místa „X“, dotvarován pouze vstříkem při následné operaci. Pokud je však plasticita fólie dostatečná, tak tvarování stejného „volného konce fólie“ od místa „X“ pokračuje a rovněž fólie pomalu postupuje po stěně formy ve formě „dokonale dotvarované“. Průměrná deformace volného konce fólie, kterou je třeba dosáhnout k vykopírování tvárnice od místa „X“ je v obou případech přibližně stejná, ovšem lokálně se může lišit např. díky směru a rychlosti taveniny, která může na fólii působit jiným směrem než vakuum, nebo se mohou projevit další faktory, jako je vlnění fólie před čelem taveniny, nebo její tvarová paměť. Rovněž velikost elementů a přesnost měření jejich velikosti mohou být důvody konstantnosti celkové deformace dosažené napříč různými parametry předehřevu (lokální výchylky v deformaci mohou být potlačeny). K výše popsanému je třeba přičíst i vliv rychlosti tvarování na dosažitelnou deformaci, který je dle Wonga 0, závislý na rozsahu aplikovaných rychlostí deformace.

Pro doplnění výsledků statistického vyhodnocení jsou v následující tabulce (viz Tab. 6) uvedeny střední hodnoty deformace plochy elementu dosažené v jednotlivých místech ze všech provedených měření včetně jejich výběrových směrodatných odchylek.

Tab. 6 Střední hodnoty $\bar{\epsilon}_{\text{celk}}$ ve směru y pro sledované body

Oblast dílu	Nedotvarované oblasti			Dotvarované oblasti	
				Nejpříkřejší	Rovinný, Hluboký
Body měření	1	2	3	5	6
$\bar{\epsilon}_{\text{celk y}}$	0,15	0,53	0,47	0,21	0,09
s	0,02	0,02	0,03	0,04	0,03

Z přiložené tabulky lze vidět, že u nedotvarovaných oblastí 2 a 3 je výsledná deformace výrazně vyšší, než u dokonale dotvarovaných oblastí. Toto má logické opodstatnění, neboť prakticky veškerá deformace fólie v plně předtvarovaných oblastech vzniká na začátku tvarovacího procesu, kdy fólie nemusí být ještě tolik deformována, aby dané místo vykopírovala, kdežto u nedotvarovaných oblastí, které se tvarují na jeho konci, již zbývá k dispozici menší množství fólie, které má vykopírovat určitý povrch tvárnice, což vede k větším požadavkům na tvarovací sílu [8] na konci tvarování a proto se často provede až pomocí působení taveniny, která má větší tlak, než vakuum. Důvodem nižší celkové deformace v bodě č. 1 je její tvar a případný vliv posuvu rastru.

Rovněž je možné z uvedených hodnot spatřit, že u oblasti, která sice leží ve větší hloubce (vzdálenosti od výchozí roviny fólie), ale povrch je rovinný, je celková deformace menší než u mělkých avšak více příkrých povrchů. Konkrétně šlo o porovnání příkré plochy se sklonem 74° vůči fólii a plochy o sklonu 0° . Po zjištění této skutečnosti došlo na několika dílech, ke kontrolním měřením velikosti rastru oblastí s různou příkrostití (avšak o stejné vzdálenosti od výchozí polohy fólie) a byla nalezena téměř lineární závislost příkrostití na dosažené celkové deformaci. Podobnou závislost potvrdil Kommoji pro technologii tvarování [7] pro vyšší tloušťky filmu a pozitivní tvarování, nebo též Kumar [10], ale pouze pro větší hloubky, rovněž zkoumal jiný maximální sklon ($81-87^\circ$). Z tohoto důvodu je možné potvrdit, že u dotvarovaných oblastí, se vrůstající příkrostití tvaru roste celková dosažená deformace i u dílů vyrobených technologií IMD s předtvarováním.

Kommoji [7] rovněž popsal závislost, kde se vzrůstající hloubkou tvarování klesá tloušťka stěny, tedy tím i vzrůstá plošná deformace. Odkazovaná práce se nezabývala zastříkovaním natvarovaných fólií, ale pouze jejich tvarováním na pozitivní formě, ale pro plně dotvarované oblasti, se předpokládají podobné výsledky. Za účelem potvrzení výše popsaného byly provedeny dodatečné měření velikosti rastru v dotvarovaných rovinných oblastech, které mají proměnnou hloubku oproti rovině fólie. Jelikož byla střední hodnota dosažené deformace v nejhlubším místě pouze cca 10%, tak se nepředpokládala silná závislost deformace na hloubce, ale přesto došlo k potvrzení jistého trendu a tím i platnosti výsledků zmiňovaného výzkumu z oblasti technologie tvarování pro IMD s předtvarováním.

Je zajímavé, že pro směr x nebyla zjištěna stejná závislost jako pro směr y, což je též v rozporu s výsledky řešených prací. Vysvětlení spočívá pravděpodobně ve

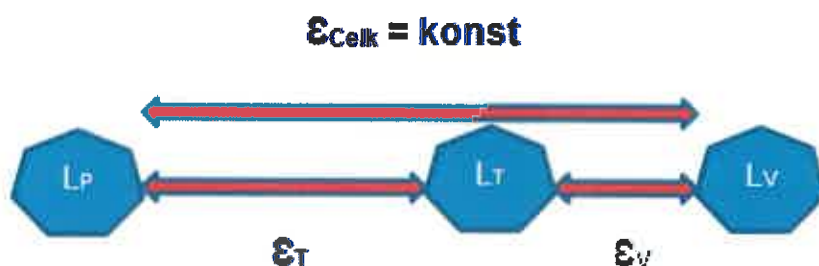
faktu, že oblast tvarování fólie je výrazně delší oproti šířce, dále mimo hodnocená místa jsou velmi příkré oblasti, které svojí vyšší deformací snižují průměrnou deformaci v rovinnějších hodnocených oblastech. Kombinace výše popsaného způsobilo tak malé deformace ve směru x , že již nebylo možné rozpoznat trend. Zde je tedy důležité zdůraznit, že platnost níže uvedené závislosti se bude pravděpodobně lišit podle tvaru tvárnice vložky, jejíž povrch má fólie vykopírovat.

6.4.2 Vyhodnocení vlivu kombinace intenzity a doby předehřevu

Jak již bylo popsáno v kapitole 5.5, tak v případě použití IR zářičů s karbonovými trubicemi bez zpětnovazebního řízení, byla sledována značná nestabilita procesu. Jelikož se nepovedlo vyrobit potřebný soubor vzorků v dostatečné kvalitě, ze kterých by bylo možné provést kvalitativní, či deformační analýzu, tak ani dostupné vzorky nebyly do celkového vyhodnocení zahrnuty. Z výše popsaných důvodů se toto uspořádání ohřevu jeví, pro tento typ IMD dílů jako nevhodné.

Kromě chybějící zpětné vazby působil negativně i relativně vyšší výkon, trubic, který vyžadoval nižší časy předehřevu a s tím spojené nepřesnosti. Avšak kvůli jiným pozitivním vlastnostem, dle literární rešerše, jako je menší zahřívání „čistého prostředí“ stroje, nižší spotřeba el. energie a kratší čas cyklu, doporučuji další výzkum s tímto typem ohřevu, avšak se zpětnovazebnou regulací.

Jak již bylo popsáno v předchozích kapitolách, tak u technologie IMD s předtvarováním probíhá deformace ve 2 stupních, tedy během tvarování a během vstřikování. Jelikož bylo v této práci zjištěno, že celková deformace fólie (ϵ_{Celk}) je napříč zkoumanými parametry předtvarování konstantní, tak součet deformace dosažené při tvarování (ϵ_T) a deformace dosažené při vstřiku (ϵ_V) je rovněž konstantní. Pokud tedy vlivem parametrů předtvarování bude v určitém místě dosažená nižší deformace tvarováním, tak o to vyšší pak musí být dosažena během vstřikování (graficky znázorněno na Obr. 48). Toto obecné pravidlo předpokládá zanedbání vlivu posuvu elementů či efekt tvarové paměti fólie.



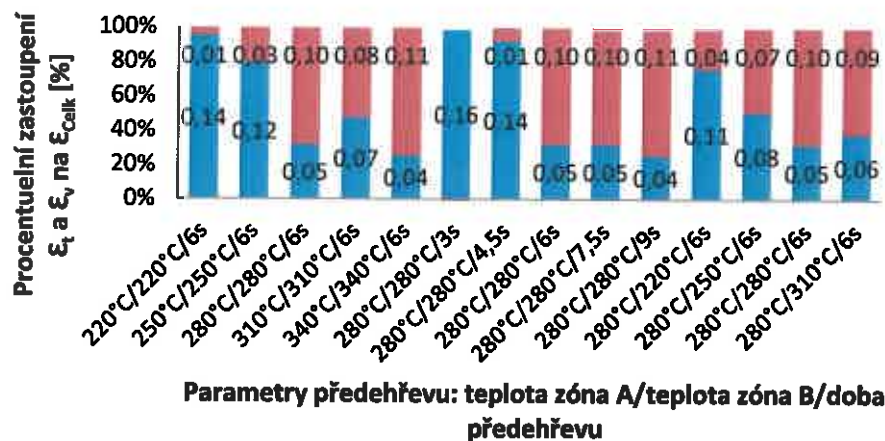
Obr. 48 Schématické znázornění složení deformace u technologie IMD s předtvarováním (obecně pro směr x, nebo y), kde:

L_P - délka hrany elementu ve směru x či y po tisku	[mm]
L_T - délka hrany elementu ve směru x či y po tvarování	[mm]
L_V - délka hrany elementu ve směru x či y po vstřikování	[mm]

Vzhledem k vzájemné závislosti obou deformací ϵ_T a ϵ_V byla vybrána deformace dosažená vstřikem ϵ_V pro popis podílu jednotlivých složek deformace, neboť v kapitole 4 je uvedeno, že deformace pomocí působení taveniny je hůře kontrolovatelná. Tato navíc slouží jako rychlý ukazatel míry nedotvarování vybraných oblastí.

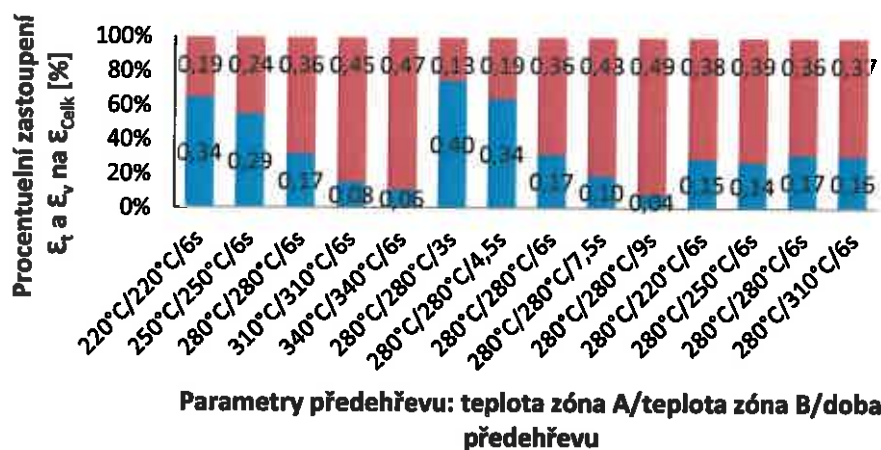
Vliv jednotlivých parametrů na velikost ϵ_V byl zkoumán pomocí metody lineární regrese a krabicových grafů. Pro hodnocené proměnné v bodech 1-5 bylo prokázáno následující: Při změně jakýchkoliv proměnných předehřevu (pro které byla deformace ϵ_V hodnocena), je na nich deformace ϵ_V závislá u nedotvarovaných a nezávislá u dotvarovaných oblastí. Pro dotvarované oblasti je výsledek očekávaný, neboť na základě vypočítaných hodnot ϵ_V jde o potvrzení dříve vyřčeného předpokladu, že $\epsilon_T = \epsilon_{\text{celk}}$, tedy že $\epsilon_V = 0$. Dále lze tedy pro vyhodnocení ϵ_V , uvádět pouze výsledky pro nedotvarované oblasti.

Střední hodnoty poměrného prodloužení fólie dosaženého při procesu vstřikování v jednotlivých bodech za různých parametrů předehřevu jsou uvedeny v následujících grafech (viz Obr. 49 - Obr. 51). Pro názornější představu o podílech jednotlivých deformací ϵ_V a ϵ_T na ϵ_{celk} jsou dodány hodnoty celkové deformace ϵ_{celk} a měřítko pro odečtení jejich jednotlivých procentuálních podílů.



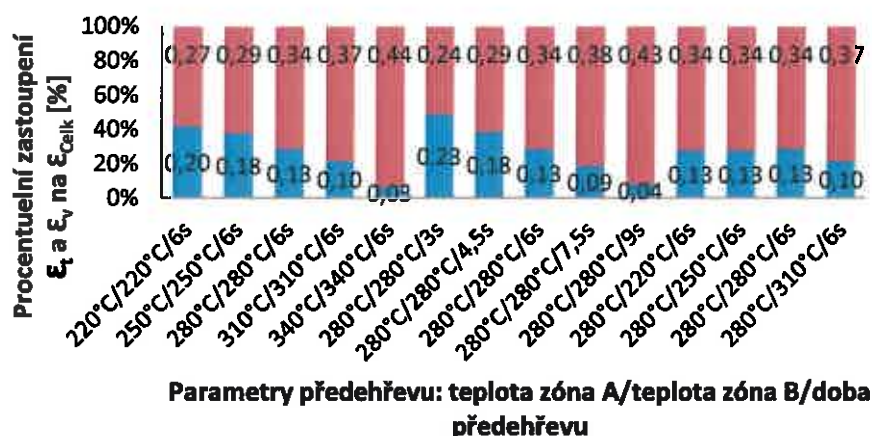
- Velikost střední hodnoty deformace ϵ_T [-] dosažené při tvarování
- Velikost střední hodnoty deformace ϵ_V [-] dosažené při vstřikování

Obr. 49 Vliv teploty a doby předehřevu na podíl středních hodnot deformací ϵ_V a ϵ_T z ϵ_{Celk} pro bod č.1 deformační analýzy ve směru y



- Velikost střední hodnoty deformace ϵ_T [-] dosažené při tvarování
- Velikost střední hodnoty deformace ϵ_V [-] dosažené při vstřikování

Obr. 50 Vliv teploty a doby předehřevu na podíl středních hodnot deformací ϵ_V a ϵ_T z ϵ_{Celk} pro bod č.2 deformační analýzy ve směru y



- Velikost střední hodnoty deformace ϵ_T [-] dosažené při tvarování
- Velikost střední hodnoty deformace ϵ_V [-] dosažené při vstřikování

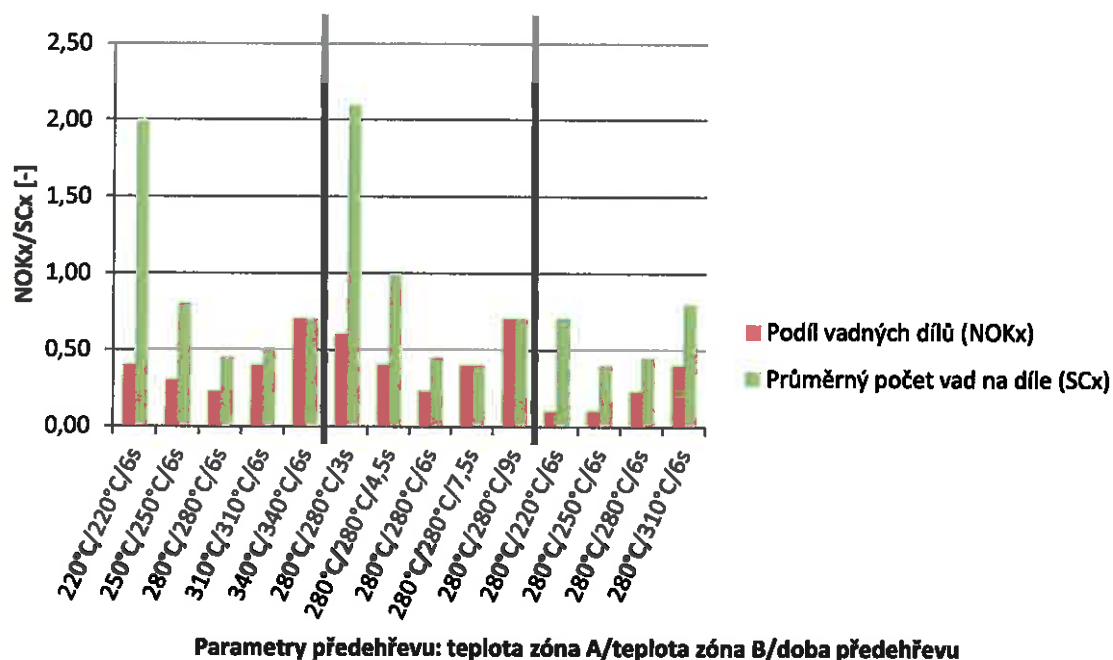
Obr. 51 Vliv teploty a doby předehřevu na podíl středních hodnot deformací ϵ_V a ϵ_T z ϵ_{Celk} pro bod č.3 deformační analýzy ve směru y

Na základě výsledků statistického vyhodnocení závislosti parametrů předehřevu na poměrnou deformaci elementu dosaženou během vstřikování byly dokázány následující závislosti: U vlivu teploty bylo dokázáno, že s rostoucí teplotou se snižuje ϵ_V , tedy míra nedotvarování, s rostoucím časem a konstantní teplotou zářičů byla dokázána stejná závislost. Toto je dáno tím, že fólie se zahřívá od tepelného zdroje a dle základů teorie sdílení tepla a neměnných ostatních podmínkách při měření, je teplota zdroje sálavého tepla i čas působení jedinými proměnnými při ohřevu fólie. Pokud vezmeme v úvahu výsledek práce Wonga O, či Phillipse [20], která pojednává o deformačních schopnostech IMD fólie v závislosti na teplotě, pak je zvýšená míra dotvarování fólie díky vyššímu prohřátí logická a dle naměřených hodnot platná i pro IMD s předtvarováním.

Je zajímavé, že při zjišťování vlivu teploty zářiče v zóně B výrobku (odpovídá pravé polovině dílu), byla prokázána u bodu č. 1, který jako jediný leží v oblasti s upravenou teplotou, menší závislost na změně teploty, než u vlivu teploty celého zářiče. Toto může být způsobeno tím, že ačkoliv je úhel vyzařování u použitých keramických zářičů relativně malý, ale nenulový [37], pak i tento faktor může být uvažován, neboť bod č.1 je umístěn relativně blízko neregulované oblasti. V oblastech 2-3, které neleží v regulované oblasti, nebyl zaznamenán rozpoznatelný trend.

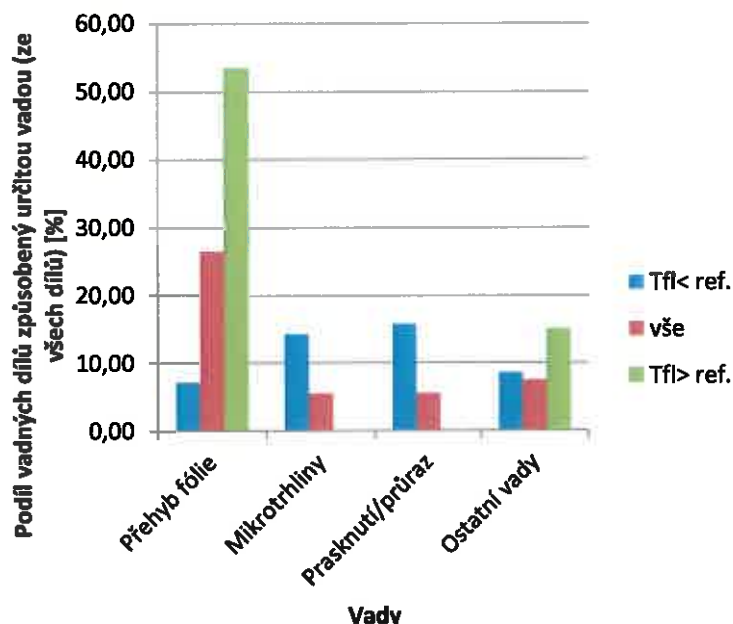
Jako reflexe hodnocení deformací fólie, jsou v níže uvedeném grafu (Obr. 52)

uvedeny, výsledky hlavních ukazatelů kvalitativní analýzy pro parametr „teplota“ a „doba“ předehřevu. Tento přináší přehled o podílech vzorků, s nepřijatelnou vadou (NOK_x) a průměrný počet všech vad na díle (SC_x).



Obr. 52 Graf vlivu teploty a doby předehřevu na podíl NOK dílů a na množství vad na jednom díle (vliv teploty předehřevu je uveden v levé části grafu, vliv času předehřevu ve střední, vliv nehomogenního ohřevu v zóně B je pak uveden vpravo)

Z výše uvedeného vlivu teploty a doby předehřevu na výskyt vad je zřejmé, že v případě konstantní teploty keramických článků napříč topným panelem, znamenalo referenční nastavení nejnižší počet vad a při jakémkoliv vychýlení z těchto hodnot došlo ke zvýšení podílu vad. S tímto souvisí i podstata vzniku nejčastějších nepřístupných vad, jejichž výskyt se mění s prohřátím fólie (dáno dobou či teplotou předehřevu). Na níže uvedeném grafu (Obr. 53) je pak znázorněno, kolik procent vadných výrobků by způsobily jednotlivé vady.

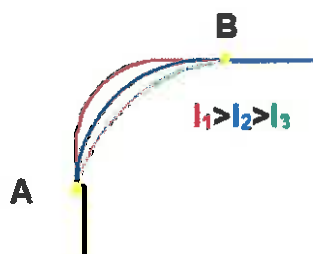


Obr. 53 Grafické znázornění procentuálního podílu NOK výrobků (ze všech výrobků) způsobený určitým typem vady (při referenčním, zvýšeném a sníženém prohřátí fólie)

Z tohoto grafu lze rovněž spatřit, že vada „přehyb fólie“ způsobuje, v porovnání s ostatními vadami, nejvyšší podíl vadných výrobků, který s vyšším prohřátím fólie ještě roste. Toto je podloženo i výsledky statistického vyhodnocení hodnocení jednotlivých vlivů, kde právě díky vadě „přehyb fólie“ je prokázáno, že s vyšším prohřátím fólie (ať již dobou či teplotou ohřevu), dochází ke zvýšení výskytu vadných výrobků. Dále následovaly (ve výše uvedeném grafu četnosti) vady „průraz fólie“ a „mikrotrhliny“, jejichž četnost se naopak zvyšuje s nižším prohřátím a u vyššího prohřátí fólie se prakticky nevyskytují. Toto je podpořeno i výsledky z předchozího grafu (Obr. 52), kde v některých případech vyššího prohřátí jsou ukazatele SCx a NOKx rovny, což znamená, že vady nad rámec těch, kvůli kterým došlo k vyřazení výrobku (tedy v tomto případě „přehyb fólie“), se nevyskytovaly. Pokud přihlídneme k faktu, že úroveň prohřátí fólie má bezprostřední vliv na velikost deformace při vstřikování ε_v , pak lze toto tvrzení vztáhnout i k velikosti této deformace.

Výše zmíněná vada „přehyb fólie“ je dle literární rešerše, (např. Shia-Chung Chen [27], nebo Braun [1] popsali vadu u technologie IML) pravděpodobně způsobena vlněním fólie před čelem taveniny, které není dostatečně vykompenzováno smrštěním způsobeným tvarovou pamětí fólie. Při dosažení kritické velikosti vlny dojde k jejímu přeložení a vzniku optické vady. Toto koresponduje i s výše

popsanými výsledky kde se vzrůstající teplotou, či časem předehevu, tedy nižším ε_v , dochází ke zvyšování výskytu této vady a při vyšším ε_v naopak. Primární příčinou je pak pravděpodobně dokonalejší předtvarování fólie v „nedotvarovaných“ oblastech a tím pádem ztráta míst, kde se může vlna vytvořená před čelem taveniny „narovnat“ a tím pádem redukovat. Kapacita „nedotvarované oblasti“ na narovnání vlny je dána rozdílem délky oblouku při ideálním dotvarování (viz l_1 na Obr. 54) a obecné délky nedotvarované fólie mezi body A a B (např. l_2 nebo l_3 na Obr. 54) ve směru vlnění.



Obr. 54 Ukázka různých délek křivky dané tvarem fólie mezi dvěma body při různém stupni předtvarování IMD fólie

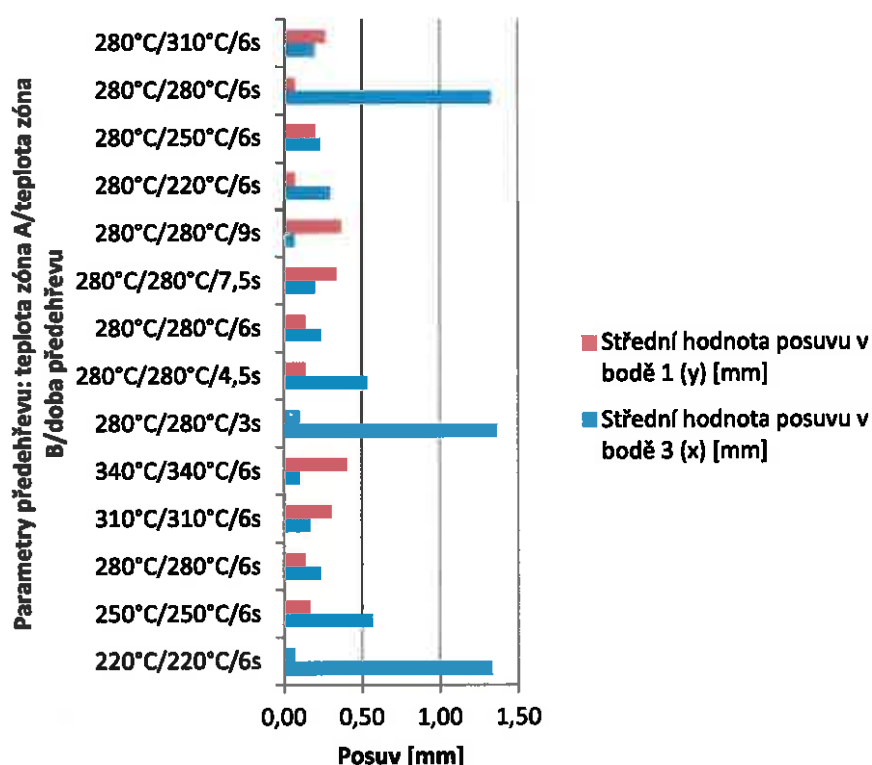
Při zaměření na vznik vady „průraz fólie“ je zřejmé, že primární příčinou je vyšším poměrné prodloužení dosažené vstřikem (ε_v), než je IMD fólie schopna odolat. Vliv spolupůsobení rychlosti deformace není pravděpodobný, neboť Wong 0 zjistil, že při rychlostech deformace nad 100mm/min (což je u zkušebního dílu v místech, kde docházelo k průrazům fólie splněno) se dosažitelná deformace IMD fólie s rychlostí zvyšuje. Toto je podpořeno i prací Phillipse [20], který zmiňuje možnost generování tepla při tvarování PET. Způsob vzniku tohoto jevu je však komplexnější a nejde pouze o velikost lokální deformace pomocí vstřiku či její rychlosti, jak jsem se s přihlédnutím k řešeným pracím domníval, neboť na výrobku byla zaznamenána i místa s vyšší deformací, než v místech kde k tomuto jevu primárně docházelo.

Tato místa s dosaženou vyšší deformací však velmi často vykazovaly vadu „mikrotrhliny“ (praskání inkoustu bez porušení PET nosiče) a svým umístěním vždy zasahovala nedotvarovanou oblast do kraje dílu (nedotvarovaná oblast č. 2 dle Obr. 40 a Obr. 45), což v případě míst se vznikem „průrazu fólie“ neplatilo (bod č. 3 def. analýzy). Jelikož i převážný směr toku taveniny je v obou případech stejný, tak pravděpodobnou příčinou bude nepatrně jiná napjatost fólie způsobená jednostranným upnutím, či mírný lokální posuv.

V případě hodnocení kvality dílů v případě, kdy byla upravena teplota zářičů

odpovídající pouze rovinnější části dílu (zóna B dle Obr. 52), došlo k podobnému chování jako by se snižovala teplota celého zářiče, kdy při snížení teploty se snížil výskyt vady „přehyb fólie“, ale zároveň nedošlo k nárůstu výskytu jiných nepříjemných vad. Až pod teplotou 250°C došlo k nárůstu SCx. Lze tedy říci, že tento typ nastavení je pro proces IMD vhodný.

V případě vyhodnocení posuvů rastru v bodech 3 (směr x) a v bodech 4 (směr y) deformační analýzy, pro proměnné „teplota“ a „čas“ předehřevu byly získány výsledky posuvu v mm uvedené v grafu níže (viz Obr. 55). Je třeba zdůraznit, že v bodě/oblasti č. 3 deformační analýzy jde o nedotvarovanou oblast a v bodě č. 4 pak o zcela dotvarovanou.



Obr. 55 Grafická závislost teploty a času předehřevu na sledované posuvy v bodech 1 a 3 deformační analýzy (zbylé parametry předehřevu referenční)

Z výsledků pro bod č. 3 lze vysledovat, že lokální posuv ve středu nedotvarované oblasti ve směru toku taveniny se zvyšuje s mírou nedotvarování. Dle následného studia průběhu rastru na dílech lze dále vysledovat, že při změně směru toku taveniny za nedotvarovanou oblast č. 3 dochází k minimalizaci tohoto posuvu a ačkoliv je posuv za nejnižší úrovně prohřátí fólie značný, tak vlivem umístění

v nedotvarované oblasti nedochází k nežádoucí vadě „přehyb fólie“. Při dodatečném studiu posuvů v bodě 2 bylo zjištěno, že díky jednostrannému upnutí fólie v dělicí rovině je tento jev výrazně potlačen, což je pravděpodobný důvod vzniku vady „mikrotrhliny“ místo „průrazu fólie“. Při toku taveniny podél nedotvarovaných oblastí je tedy třeba dosáhnout vyšší úrovně prohnutí fólie a tím i menší ε_v , aby byl tento jev minimalizován.

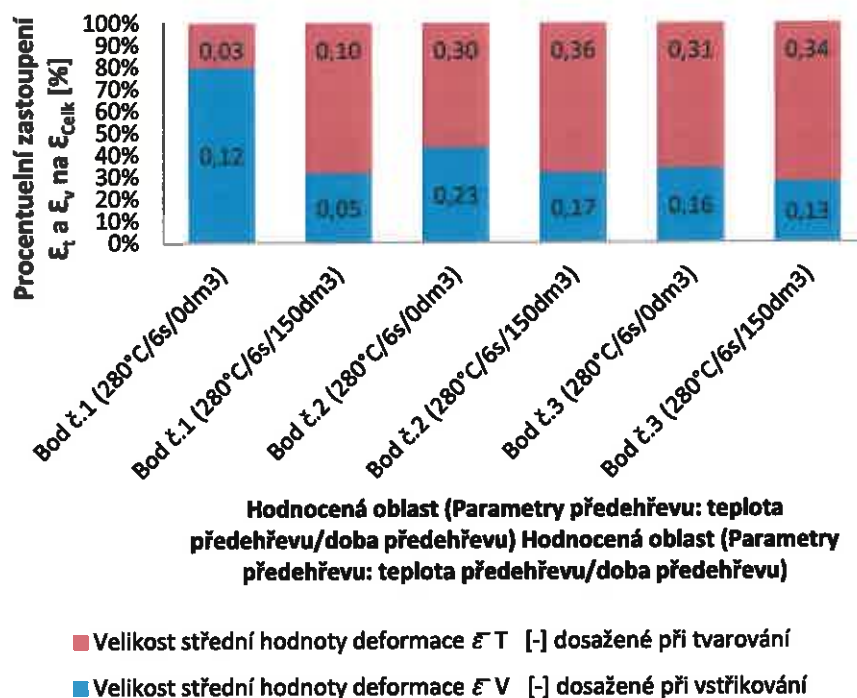
V případě bodu č. 1 se pohybují hodnoty Δl_{pos} vzhledem k přesnosti měření, ve velmi malém rozpětí, ale s rozpoznatelným trendem, že v případě toku taveniny ve zcela dotvarované oblasti dochází k vyššímu posuvu při vyšším prohnutí fólie. V kombinaci s nižší kapacitou lépe dotvarovaného radiusu (na vyrovnání posuvu – v případě vyššího stupně předtvarování) na konci dílu (oblast č. 1), toto poskytuje v souladu s výsledky, vyšší pravděpodobnost vzniku vady „překlada fólie“ v této oblasti dílu. Je však třeba znovu připomenout, že vzhledem k časové náročnosti měření velikosti rastru před vstřikováním, byly všechny díly s rastrem zhotoveny automaticky za podmínek delšího dochlazení fólie, což zdůvodňuje naměření velmi malých rozdílů Δl_{pos} .

6.4.3 Vyhodnocení vlivu velikosti vakua

Obecně lze říci, že vliv velikosti vakua, která byla charakterizována rozdílnou velikostí zásobníku vakua, byl v jistém smyslu analogický k hodnocení vlivu proměnných „teplota“ a „doba“ předeheřvu, které vyšším či nižším prohnutím fólie způsobovaly různou míru předtvarování a z toho plynoucí výskyt vad.

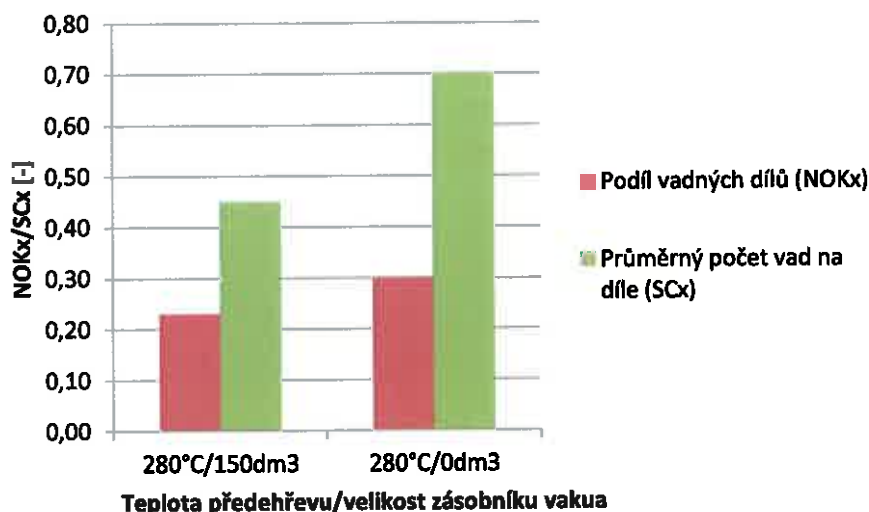
S větší velikostí zásoby vakua byla statisticky prokázána vzrůstající míra dotvarování, ačkoliv z důvodu dostupnosti techniky šlo pouze o dvě konfigurace měření. Střední hodnoty ε_v jsou uvedeny na Obr. 56, kde je pro přehlednost zobrazeno, jakou měrou se spolu deformací během tvarování ε_T podílí na celkové dosažené deformaci ε_{Celk} v jednotlivých bodech. Toto koresponduje s teorií tvarování popsanou např. v [8], kde na základě Boyleva a Daltonova zákona má velikost zásoby vakua při ostatních konstantních parametrech vliv na rychlost tvarování. Vyšší rychlost má za následek, že i po oddálení fólie od zdroje tepla, v průběhu tvarování stihne být vytvarován větší podíl „A tvaru“ výrobku, než folie zchladne pod mez, kdy již tvarovacím tlakem, který je v danou chvíli k dispozici, nelze fólii dále tvarovat. Rovněž je třeba podotknout, že na konci, kdy je třeba tvarovat ostré rádiusy či hrany výrobku, je potřebný vyšší tvarovací tlak (opět i v souvislosti s rostoucím

deformačním odporem v závislosti na dosažené deformaci [20]).



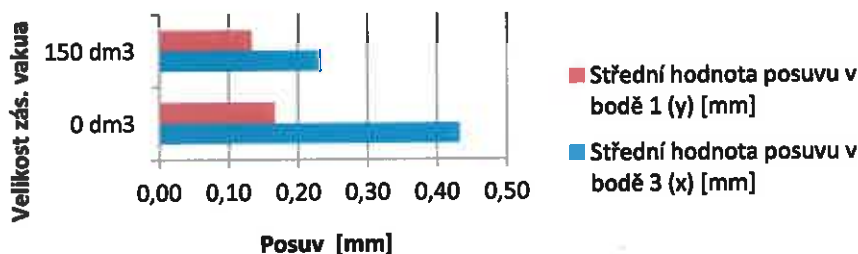
Obr. 56 Vliv velikosti zásobníku vakua na střední hodnoty poměrného prodloužení hrany elementu fólie ve směru y dosaženého vstřikem a tvarováním (součet ϵ_{celk}) pro různé body

Vliv redukce velikosti zásobníku na výskyt vad nebyl vzhledem k množství konfigurací a velikosti testovaného souboru statisticky prokázán, ale pomocí ukazatelů NOKx a SCx (viz Obr. 57) byly zjištěny podobné souvislosti jako u nižšího prohřátí fólie právě v kontextu s menším natvarováním fólie v nedotvarovaných oblastech. Tím se sice snížil výskyt vady přehyb fólie, neboť se zvýšila schopnost této oblasti absorbovat/narovnat vlnění, ale na druhou stranu se zvýšil podíl vad, které s tímto souvisí (zejména mikrotrhliny) a oba ukazatele vad jsou vyšší, než u referenčních parametrů se zásobníkem o velikosti 150dm³.



Obr. 57 Graf vlivu velikosti použitého zásobníku vakua na podíl NOK dílů a na průměrné množství vad na jednom díle

Tímto je tedy potvrzeno, že předpoklad Krebse [8], že tvarování má probíhat co nejrychleji je platný i pro technologii IMD s předtvarováním. V případě požadavku dosažení nižší deformace je výhodnější použít nižší intenzity zdroje předehřevu, či kratšího času předehřevu, neboť lze tyto regulovat prostým nastavením parametrů. V případě intenzity zdroje předehřevu lze navíc aplikovat pouze na část ohřívané fólie. V případě posuvů bylo u bodu č. 3 potvrzeno zjištění ze studia proměnných „teploty“ a „doby“ předehřevu, kde nižší předtvarování znamená větší posuv. Naopak v bodě č.1 nebyl trend změny posuvu zcela zřetelný a hodnota byla téměř srovnatelná s referenční. Graf výše popsaného je možno spatřit na Obr. 58.



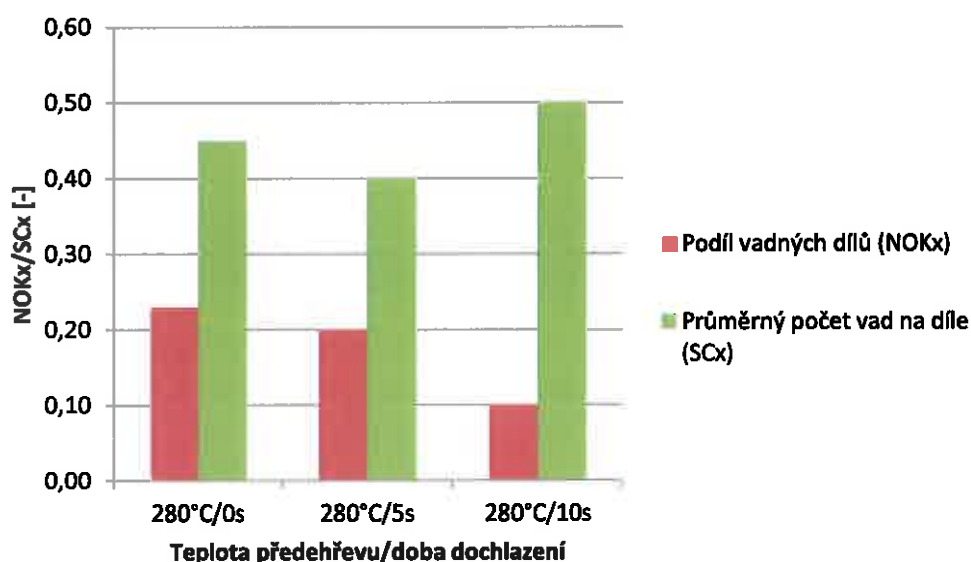
Obr. 58 Grafická závislost velikosti zásobníku vakua na sledované posuvy v bodech 1 a 3 deformační analýzy (zbylé parametry předehřevu referenční)

6.4.4 Vyhodnocení vlivu dochlazení fólie

Jak jsem již dříve v této práci uvedl, tak v případě studia vlivu proměnné „dochlazení

fólie“ nebylo možné hodnotit díly opatřené rastrem, neboť vzhledem k časové náročnosti měření rastru před vstřikem, byly veškeré díly vstřikovány s delší prodlevou mezi tvarováním a vstřikem, než maximálních 10 s. Toto platí jak pro dosažené deformace, tak pro hodnocení posuvů rastru. Na základě teoretických předpokladů a rešerše by hodnocení deformace rastru ani nebylo relevantní, neboť se ani žádný vliv na deformaci fólie nepředpokládá. Naopak u hodnocení posuvů, kde se vliv předpokládá, jsou pro všechny konfigurace pravděpodobně naměřeny nižší hodnoty posuvů.

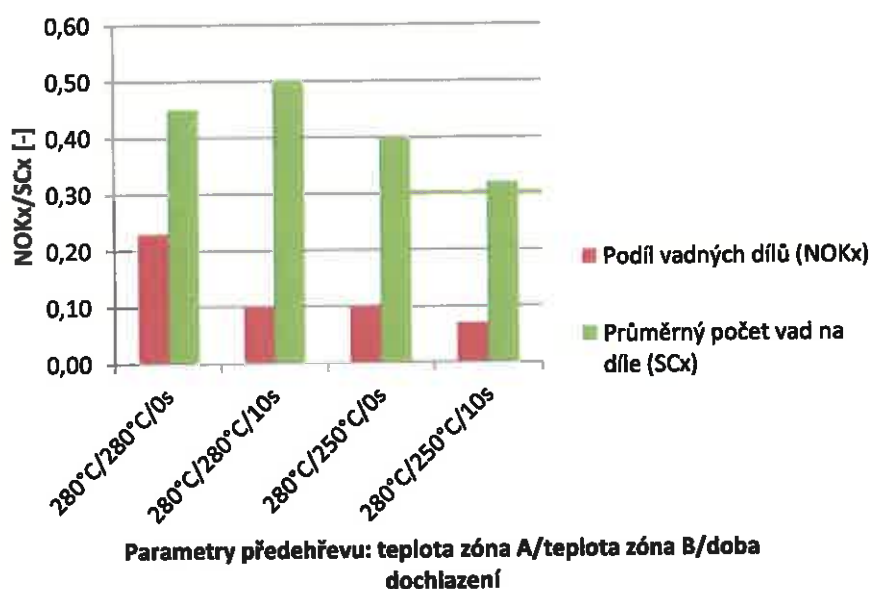
Provést kvalitativní vyhodnocení dílů však již možné bylo. Jelikož šlo o pouhé tři konfigurace a malý soubor dat (bez možnosti spojení s jinou podobnou skupinou dat), tak nebyla závislost počtu vad na dochlazení fólie statisticky prokázána. Na základě ukazatelů NOKx a SCx (viz Obr. 59) bylo zjištěno, že s rostoucím časem přestávky mezi koncem přehřevu a zavřením formy (v této práci označováno jako doba dochlazení) klesá zejména podíl vadných dílů, které jsou nejčastěji způsobeny výskytem vady „přehyb fólie“. Pravděpodobné vysvětlení je, že předpoklad vyslovený ve výzkumu Shia-Chung Chena v oblasti technologie IML [26], je platný i pro IMD, tedy, že dochlazená fólie má vyšší tuhost a tím je méně náchylná vůči vlnění před čelem taveniny



Obr. 59 Graf vlivu doby dochlazení fólie před jejím zastřiknutím na NOKx a SCx

V případě studia vlivu dochlazení fólie na parametr SCx není vliv jednoznačný a mírný nárůst „přijatelných vad“ při delším dochlazení může být způsoben relativně malým hodnoceným souborem oproti referenčnímu.

Jelikož se i pro IMD s předtvarováním potvrdil předpoklad Shia-Chung Chena [26], že chladnější fólie vykazuje menší sklon k vlnění a zároveň se do určité míry potvrdil předpoklad, že snížení teploty v rovinnější části dílu má vliv na počet nepřipustných vad, pak bylo dodatečně vyhodnoceno 100 dílů v kombinaci parametrů předehevu, s nejlepšími předpoklady pro nízký podíl vadných dílů. Konkrétně redukcí teploty předehevu v zóně B dílu na 250 °C v kombinaci se změnou dochlazení fólie z referenčních 0 s na 10 s. Obě dílčí změny prokazovaly v kvalitativní analýze pokles podílu nepřijatelných dílů (NOK_x) avšak v původním plánu výroby zkušebních těles nebyla tato kombinace realizována. Výsledky jsou uvedeny na níže uvedeném grafu (viz Obr. 60).

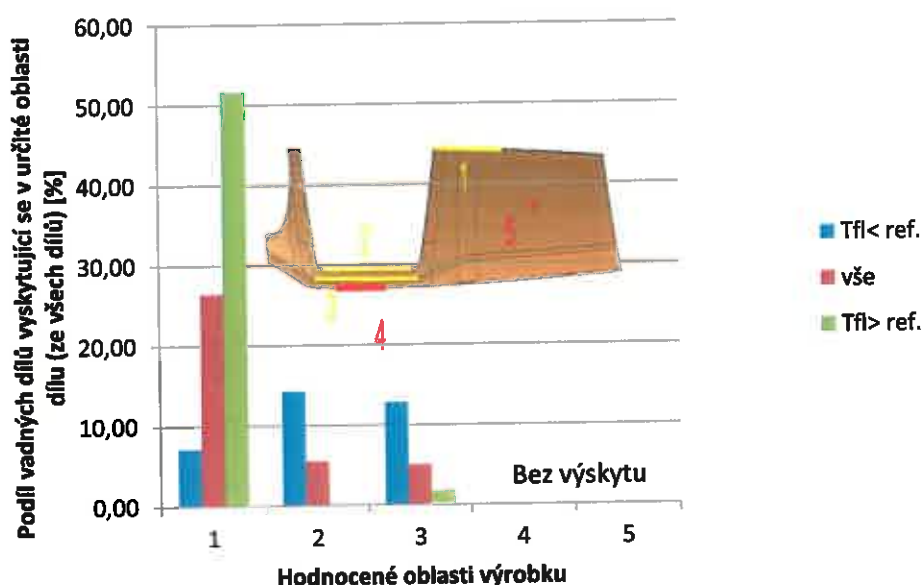


Obr. 60 Grafické porovnání podílu NOK dílů a průměrného počtu vad na díle pro referenční hodnoty předehevu (280/280/0), hodnoty referenční s prodlouženou dobou dochlazení (280/280/10), hodnoty referenční + snížení teploty v zóně B (280/250/0) a nakonec kombinace snížení teploty v zóně B a prodloužení doby dochlazení (280/250/10)

Z výše uvedeného grafu je zřetelné, že zkoušená kombinace prodloužení doby dochlazení fólie a snížení teploty předehevu v zóně B měla pozitivní efekt na hodnotu NOK_x , navíc prokázaný na vysokém množství vzorků. Hodnota SC_x je rovněž nižší, než u referenčních hodnot předehevu, což je s poklesem NOK_x a zároveň neovlivněním deformace logické.

6.4.5 Vyhodnocení vlivu velikosti deformace během vstřikování na výskyt vad

Ačkoliv již v předchozích kapitolách byly základní souvislosti mezi dosaženou deformací a výskytem vad uvedeny, tak tato kapitola uvádí další výsledky, které by nebylo zcela v kontextu uvést v předchozích kapitolách. Pro hodnocení deformací i výskyt vad byly zvoleny totožné oblasti, aby bylo možné vyhodnotit vzájemnou závislost. Tyto zóny však zároveň charakterizovaly specifické oblasti zkušebního dílu. Oblasti 1,2,3 jsou oblastmi nedokonale dotvarovanými, 4 pak nejpříkřejším místem a 5 rovinným, ale nejhlubším místem. Na základě vlivu polohy hodnocené oblasti na díle na výskyt vad v těchto oblastech je tedy možné vyvodit obecné závěry pro daná specifická místa (i v kontextu s dosaženou deformací). Výskyt vadných dílů v těchto zónách je zobrazen na Obr. 61 a vyjádření všech vad v jednotlivých oblastech dílu pak na Obr. 62 opět je variantně zobrazeno pro nižší a vyšší prohřátí, než referenční, které obecně vykazují různé míry deformace dosažené během předtvarování.

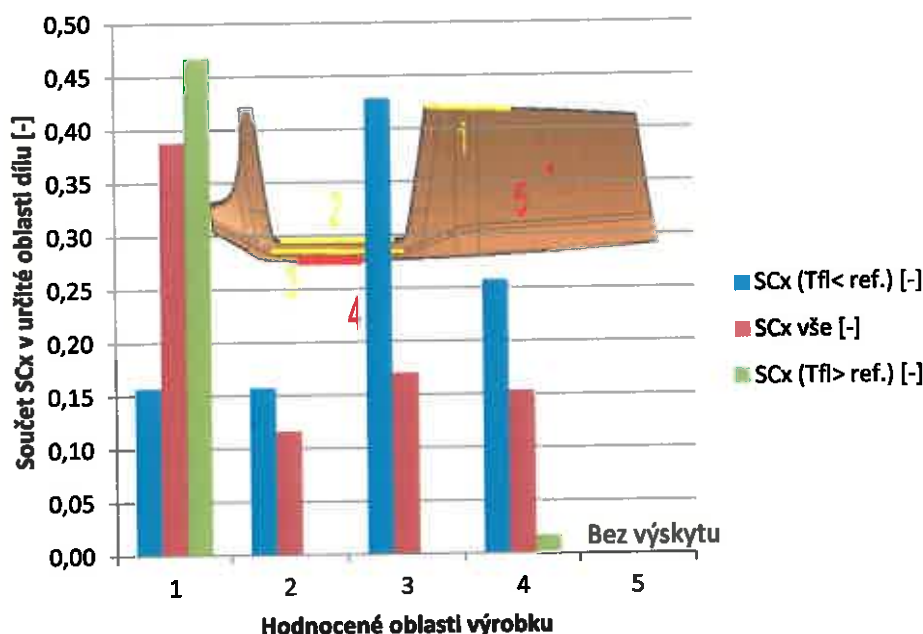


Obr. 61 Grafické znázornění výskytu nepřijatelných vad na díle, které se vyskytovalo v jednotlivých zónách (při referenčním, zvýšeném a sníženém prohřátí)

Z grafu výskytu vadných dílů je zřetelné, že se nepřijatelné vady v zónách 4 a 5, tedy v plně dotvarovaných oblastech nevyskytovaly. Naopak se nepřijatelné vady vyskytují v oblastech 1-3, které jsou nedotvarované a svým specifikem podporují

vznik přehybu fólie v zóně 1, mikrotrhlin v zóně 2 a průrazu fólie v zóně 3.

Měním se parametrem u nedotvarovaných oblastí je ε vstřiku, kde je dokázáno, že se v hodnocených bodech s úrovní prohřátí fólie mění, tedy tím pádem i úroveň předtvarování. Konkrétně s vyšším prohřátím je fólie více dotvarovaná a naopak. Díky tomuto lze použít graf zobrazený na Obr. 61 a Obr. 62, též jako vyjádření vlivu míry nedotvarování na kvalitu dílů.

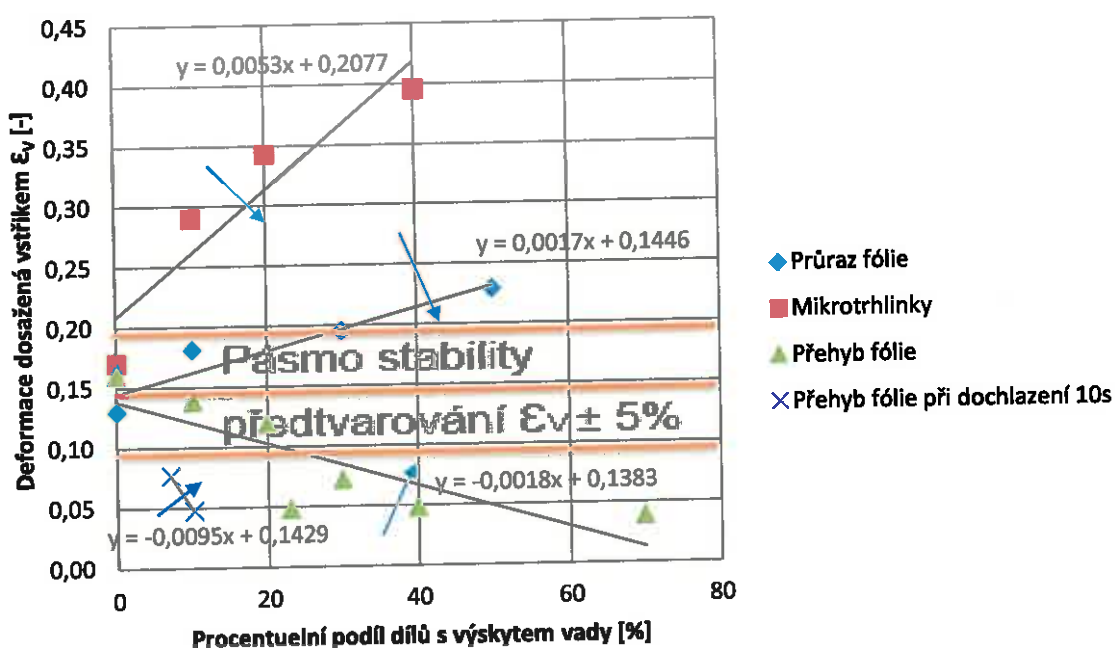


Obr. 62 Grafické znázornění průměrného celkového množství vad na díle SCx, které vzniklo v konkrétní hodnocené oblasti (při referenčním, zvýšeném a sníženém prohřátí fólie)

Z rozboru množství obecných vad v zónách výrobku 1-5 lze vysledovat i další závislosti, v případě plně dotvarovaných oblastí lze vysledovat, že součet četností vad SCx v příkré oblasti (tedy s vyšší celkovou deformací) je vyšší, než v případě rovinné. Přesná závislost příkrosti na množství vad však hodnocena nebyla.

V souvislosti s výše popsaným jsou zde tedy 3 vady, které mohou při určité míře deformace dosažené vstřikem způsobovat kvalitativní zamítnutí dílu. Jde o „průraz fólie“ v případě nedotvarované oblasti uprostřed dílu, „mikrotrhliny“ v případě nedotvarované oblasti na kraji dílu při podélném toku taveniny a „přehyb fólie“ při toku taveniny spíše v kolmém směru k nedotvarované oblasti (ve směru hlavní deformace, která má být provedena taveninou). Komplikaci přináší fakt, že zatímco první dvě vady lze eliminovat menší deformací pomocí vstřiku, tak u přehybu fólie

je tomu naopak. Předpokládám, že při vyhodnocení vlivů deformací dosažených vstřikem na četnost výše jmenovaných vad, lze získat velikost deformace, která je pro proces IMD s předtvarováním univerzálně ideální. Toto vyhodnocení proběhlo pomocí metody lineární regrese (závislosti mezi velikostí deformace dosažené vstřikem ε_v a četností výskytu daných vad), přičemž vznikly 3 přímky odhadující danou závislost (viz Obr. 63). Na základě vyhodnocení vlivu doby dochlazení na výskyt vad byla sestavena závislost vzniku vady „přehyb fólie“ i pro maximální dobu dochlazení 10 s, kde je předpokládána stejná deformace a je zřetelné, že i přes nedostatek údajů tato varianta zvětšuje procesní okno. Na druhé straně jsem si vědom, že zjištěná velikost směrnice přímky může být nepřesná.



Obr. 63 Znázornění procesního okna pro hodnoty deformace dosažené vstřikem

Z uvedené grafické závislosti je možné vidět, že se vrůstající deformací dosaženou během vstřiku ε_v roste i procentuální podíl dílů s vadou „průraz fólie“ a s vadou „mikrotrhlíky“ naopak s klesající deformací při vstřikování stoupá vada „přehyb fólie“. Z uvedeného obrázku lze rovněž vidět, že deformace ε_v o velikosti cca 14% může ve velmi úzké toleranci vést k výrobě IMD dílů téměř beze zmetků ve chvíli, kdy by se sešly všechny negativní aspekty. Pokud bychom předpokládali menší stabilitu předtvarování, pak vznikne kolem požadované hodnoty deformace pás, který



se vejde do procesního okna daného odpovídajícími přímkami až na daleko vyšší hodnotě zmetkovitosti (v grafu uveden příklad nestabilního předehřevu, kde dosažená deformace vstřikem se pohybuje v rozmezí $\pm 5\%$). Toto dále potvrzuje např. nevhodnost IR ohřevu bez zpětnovazebné regulace. Graf samozřejmě umožňuje odečítat hodnoty procesního okna i pro pouze některou z vad, která bude v daném místě vznikat. V případě vad „průraz fólie“ a „mikrotrhlina“ jde o oblast pod těmito přímkami a naopak u vady „přehyb fólie“ nad touto přímkou. Pro snazší orientaci jsou v grafu uvedeny šipky od těchto přímek.

Pokud dojde k omezení ze strany maximálního přípustného výskytu vadných dílů, pak se procesní okno odečítá směrem doleva od této hodnoty a může být získána informace o požadované stabilitě deformace dosažené vstřikem.

Jsem si vědom, že obecná platnost výše uvedených vztahů je ovlivněna mnoha proměnnými, které do procesu IMD s předtvarováním vstupují. Mezi hlavní lze jmenovat druh IMD fólie, koncept předtvarování, tvar dílu či technologické parametry vstřikování. I přesto však pevně věřím, že lze nalézt jeho uplatnění, případně ho použít jako vzor pro podobné „nomogramy“, které již budou konkretizovány. Jako vodítko lze daný graf použít i při návrhu výrobku.



7 Diskuze výsledků

Disertační práce se ve svém experimentu zabývala dosud nepopsanými tématy u technologie IMD s předtvarováním, které korespondují s cíli této práce. Stěžejní výsledky těchto témat jsou uvedeny v textu níže.

Ačkoliv probíhalo měření disertační práce na konkrétním výrobku, tak byl vybrán díl, který svojí velikostí a díky svému tvaru, (hlubší i mělké oblasti, příkré a rovinné oblasti, různé směry tečení taveniny atd..) umožňuje důkladné studium jevů probíhajících při výrobě IMD dílů a vyvození teoretických závěrů platných i pro jiné výrobky s podobnými prvky u technologie IMD.

Dále je třeba podotknout, že vzhledem k rozsahu disertační práce zde nemůže být řešení tématu zcela vyčerpávající a proto jsou v závěru práce uvedena doporučení k dalšímu výzkumu v tématu této disertační práce. Rovněž si myslím, že vzhledem k neexistenci publikací přímo k tématu předtvarování u transferové IMD, je na místě poněkud širší téma této disertační práce.

Dle literární rešerše a teoretických poznatků, byly vybrány proměnné z oblasti parametrů předtvarování, které mají potenciální vliv na deformaci a kvalitu IMD dílů. Vzhledem k dostupným prostředkům byl postaven experiment, který se co nejvíce přiblížil reálným podmínkám sériové výroby. Rozpětí hodnot parametrů bylo voleno tak, aby bylo kvůli názornosti co nejširší, ale zároveň aby ani v krajních hodnotách nedocházelo k 100% tvorbě zmetků a měněnými parametry byly:

- Teplota a doba předehtěvu
- Délka dochlazení fólie před vstřikováním
- Velikost zásobníku vakua

V rámci měření byl vždy měněn pouze jeden parametr a zbytek parametrů zůstal na referenčních hodnotách. Tyto parametry byly aplikovány jak na dílech s dekorem černého klavírního laku (Piano Black), který umožnil odhalení největšího množství vad, tak i na dílech, které byly opatřeny rastrem k hodnocení deformací (kvůli časové náročnosti měření po předtvarování však pouze s plně dochlazenou fólií).

Hodnocena byla nejen kvalita zkoumaných dílů charakterizována výskytem vad (včetně jejich kvantifikace pomocí ukazatelů NOK_x a SC_x), ale zejména souvislost s probíhajícími jevy během vstřikování těchto dílů a s důrazem na průběh deformace

fólie během výrobního procesu IMD. Pro hodnocení deformace i výskyt vad bylo vybráno 5 bodů, z nichž 3 charakterizují oblasti nedotvarované s různými specifiky a 2 oblasti plně dotvarované, přičemž šlo o nejpečlivější místo a místo nejhlubší, avšak rovinné.

Za účelem studia deformací před i po vstřikování IMD dílů byla vytvořena vlastní metodika, včetně vývoje metody tisku rastru, která je dle literární rešerše dosud neaplikovaná na IMD fólii. Metoda spočívá v digitálním tisku ekosolventními inkousty přes transferovou vrstvu IMD fólie, za použití poloprůsvitného dekoru.

Na základě experimentálního měření a testů zastřikování fólie s rastrem bylo zjištěno, že vyvinutá nová metoda tvorby rastru na IMD fólii, je pro tento účel velmi vhodná, neboť na žádném z dílů nedošlo k smývání inkoustu rastru, aniž by byla smytá i vlastní transferová vrstva fólie a u všech vzorků byla zachována vynikající čitelnost/měřitelnost rastru před i po zastřiknutí fólie. Díky těmto vlastnostem je použitá metoda tisku potenciálně vhodná i k tisku jednoduchých obrazců umožňujících individualizaci dílů (např. speciální edice výrobků), nebo k jejich umístění.

Naopak u předehřevu pomocí IR trubicových zářičů byla sledována značná nestabilita procesu, která vedla k jeho celkovému vyřazení z vyhodnocení.

Během měření v experimentu této disertační práce, bylo dle primárních předpokladů potvrzeno, že v některých místech „A tvaru“ výrobku nedojde k dokonalému přilnutí fólie k povrchu tvárnice. Tato místa jsou nazývána „nedotvarované oblasti“ a zpravidla jde o místa, kde se setkávají 2 plochy pod větším úhlem, či se stýkají v menším rádiu, než se je fólie schopna za daných podmínek vytvarovat.

Jako ukazatel míry nedotvarování těchto oblastí bylo vybráno poměrné prodloužení dosažené během vstřikování ε_v , které bylo získáno z hodnocení velikosti elementů před a po vstřiku. Bylo zjištěno, že v plně dotvarovaných oblastech již nedochází po tvarování k další změně velikosti rastru vstřikováním, proto se další vyhodnocení zúžilo právě na vybrané nedotvarované oblasti.

Kvalitativní analýza prokázala svůj význam při objasňování složitých dějů během procesu vstřikování IMD dílů s předtvarováním a porovnáním vlivu jednotlivých parametrů bylo zřetelné, že u většiny z nich není vliv na podíl vadných dílů (NOK_x), ani na průměrný počet vad na jednom výrobku (SC_x) jednoznačný, neboť potlačení jedné vady úpravou procesních parametrů, bylo většinou doprovázeno vznikem další, s vyšší, či nižší významností.

Diskuze vlivu parametrů předehřevu na výslednou deformaci fólie na díle

Na základě měření velikosti rastru na hotových dílech bylo zjištěno, že v ose „x“ dílu dochází až na „nedotvarované“ oblasti pouze k minimální deformaci elementů rastru. Toto je dáno nejen poměrem délky řezu fólie mezi upínacím rámečkem a délkou křivek povrchu v řezu tvárnice vločky, do kterých se musí fólie v daném směru natvarovat, ale zejména minimální příkrostit dílu v tomto směru.

V ose „y“ je tento poměr díky výrazně menší šířce fólie mezi rámečkem (oproti délce), i většími rozdíly v souřadnici „z“ dílu výrazně vyšší, tím i délka křivek povrchu tvárnice a plynoucí potřebná deformace IMD fólie. S tímto souvisí i větší příkrostit povrchu dílu.

Napříč různými příčnými řezy dílu byly zaznamenány různé velikosti elementu rastru, přičemž v oblastech, kde fólie před vstřikem nebyla dokonale vytvarovaná, dochází k dalšímu lokálnímu zvýšení deformace fólie během vstřiku.

Nárůst velikosti elementu rastru ve směru y nebyl v měřitelném rozsahu kompenzován zúžením ve směru x, nýbrž poklesem tloušťky fólie. Toto je dokázáno na základě měření tloušťky natvarovaných nosičů fólie a je patrné i z měření tisknuté vrstvy na povrchu dílů pomocí SEM. Možným důvodem je pravděpodobně upnutí fólie v rámečku a nutnost vykopírování povrchu, který zaujímá větší plochu, než rovinná fólie.

Při statistickém vyhodnocení vlivu celkové deformace fólie ve vybraných místech hotového IMD dílu v závislosti na změně parametrů zařazených do různých skupin (vliv teploty předehřevu, vliv času předehřevu atd..) byla hypotéza, že celková deformace IMD fólie v jednotlivých místech se bude měnit s vybranými parametry předtvarování, zamítnuta téměř pro všechny skupiny sledovaných veličin v případě nedotvarovaných míst a zcela zamítnuta v případě míst ležících ve zcela dotvarovaných oblastech. Pokud byla hypotéza potvrzena, pak to bylo např. u hodnocení vlivu teploty pouze u jednoho ze tří hodnocených nedotvarovaných bodů a parametr udávající směrnici přímky pak nabývá v tomto případě velmi malé hodnoty.

Z výsledků tedy vyplývá, že ačkoliv existují předpoklady, že hodnota celkové deformace elementů by mohla v nedotvarovaných oblastech být mírně závislá na zkoumaných vlivech (právě např. na teplotě předehřevu), pak se toto u provedeného měření nepotvrdilo. Možným důvodem je, zejména relativně malá hloubka tahu a velmi tenká fólie, která po doteku s tvárnici velmi rychle ztuhne a

tváří se pouze „volná“ část fólie, která postupuje k dané malé hloubce tahu velmi rychle a musí „vykopírovat“ stejně velký povrch tvárnice ať již větším poměrem deformace během tvarování, či během vstřikování, neboť byla dokázána platnost následujícího vztahu (19), že součet deformace během tvarování ε_T a během vstřikování ε_V je v daném místě vždy konstantní a je roven celkové deformaci ε_{Celk} :

$$\varepsilon_{Celk} = \varepsilon_T + \varepsilon_V = konst. \quad (17)$$

Mechanismus obou těchto deformací se liší a v případě deformace postupem taveniny je závislý např. na směru jejího toku, či její rychlosti a navíc je třeba zohlednit spolupůsobení případného postupu vlny fólie před taveninou, nebo uvolnění pnutí ve fólii v podobě „tvarové paměti“, neboť mohou způsobovat zmenšení lokálních rozdílů v rozložení finální deformace. V kontextu s použitou velikostí elementů rastru, mohou být dané irregularity již použitou měřicí metodou nepostřehnutelné.

U oblasti, která sice leží ve větší hloubce (vzdálenosti od výchozí roviny fólie), ale povrch je rovinný, byla celková deformace menší než více příkrých povrchů (ačkoliv bylo umístění v menší hloubce). Konkrétně šlo o porovnání příkré plochy se sklonem 74° (vůči fólii), kde byla dosažená celková deformace cca 21 % a plochy o sklonu 0° s celkovou deformací cca 10%. Po důkladnějším studiu byla zjištěna závislost příkrosti na dosažené celkové deformaci, tedy vyšší dosažená deformace s rostoucí příkrostí a obdobně v omezené míře i pro rostoucí hloubku, což korespondovalo s rešerší v oblasti technologie tvarování.

Výskyt vad v nedotvarovaných oblastech nebyl v souvislosti s dosaženou celkovou deformací zřetelný, ale v případě dotvarovaných bylo zjištěno, že výskyt vad na díle (SC_x), byl u rovinnějších oblastí dílu menší, než u příkrých. Vztah mezi konkrétním úhlem a počtem vad na díle však nebyl ze získaných dat jednoznačný.

Diskuze vlivu parametrů „teplota“ a „doba“ přehřevu

Na základě vyhodnocení deformace během vstřikování a tvarování, posuvů rastru, ale i na základě vyhodnocení výskytu vad bylo zjištěno, že zvolené proměnné „teplota“ a „doba“ přehřevu, vykazovaly nejnázornější ovlivnění těchto hodnocených vlivů. Z tohoto důvodu je vyhodnocení vlivu těchto proměnných věnována nejvyšší pozornost.

U vlivu teploty bylo dokázáno, že s rostoucí teplotou se snižuje ε_v , tedy i míra nedotvarování a s rostoucím dobou ohřevu a konstantní teplotou zářičů byla dokázána stejná závislost. Toto je dáno tím, že IMD fólie se jak při aplikaci delšího času, tak při vyšší intenzitě tepelného zdroje více prohřeje a klesne deformační odpor, což má za následek dosažení vyšší deformace.

Průměrně největší míru nedotvarování v porovnání mezi jednotlivými body, bylo možné spatřit u bodu č. 2, kde se rovněž vyskytla při podmínkách referenční teploty předehřevu 280 °C a nejkratšího času 3 s, nejvyšší hodnota deformace během vstřiku (40 % z celkových 53 %). Naopak deformace během vstřikování při nastavení nejvyšších hodnot předehřevu (340 °C /6 s a 280 °C/9 s) se pro všechny body pohybují v řádu jednotek procent a tedy s většinovou deformací při tvarování.

Při zjišťování vlivu teploty zářiče v zóně B výrobku (odpovídá pravé polovině dílu), byla prokázána u bodu č. 1, který jako jediný leží v oblasti s upravenou teplotou, menší závislost deformace na změně teploty, než u vlivu teploty celého zářiče. Toto mohlo být způsobeno nenulovým úhlem vyzařování u keramických zářičů s referenčním nastavením teploty, které jsou umístěny relativně blízko hodnoceného místa. Vliv na výskyt vad u bodu č. 1 však byl pozitivní, proto lze toto nastavení pro IMD doporučit. V oblastech 2-3, které neleží v regulované oblasti, nebyl v dosažené deformaci zaznamenán rozpoznatelný trend.

Studiem výskytu vad na dílech bylo statisticky dokázáno, že kromě snížení teploty předehřevu pod referenčních 280 °C, dochází při vychýlení teploty či doby předehřevu, z referenčních hodnot znamená zvýšení výskytu vadných dílů.

Obecně nejčtetnější vadou vedoucí k neshodnému dílu byl přehyb fólie, který je pravděpodobně způsoben vlněním fólie před čelem taveniny a při dosažení kritické velikosti vlny, či konce dílu dojde k jejímu přeložení a vzniku optické vady. Se vzrůstající teplotou dochází ke zvyšování výskytu této vady, což je pravděpodobně způsobeno lepším předtvarováním v nedotvarovaných oblastech a tím pádem ke ztrátě míst, kde se může vlna před čelem taveniny „narovnat“ (zejména na konci dílu).

Na základě měření posuvů rastru bylo zjištěno, že vyšší úroveň prohřátí zvyšuje posuv rastru (daný výslednicí vlnění před čelem taveniny a uvolnění pnutí v podobě „tvarové paměti“), tedy pravděpodobně rovněž napomáhá vzniku vady „přehyb fólie“. V případě snižování teploty od referenční hodnoty 280 °C se míra nedotvarování zvyšovala (tím i kapacita míst na vyrovnání „vlny“, příp. i posuv rastru) a prostý podíl

výskytu této vady se snižoval. Na druhou stranu se zvyšovalo poměrné prodloužení dosažené vstřikem a z něho plynoucí vady jako mikrotrhlíny inkoustu či v některých případech i průraz fólie, kdy fólie již nebyla schopna odolat tak velké deformaci během vstřiku.

Diskuze vlivu velikosti vakua

Vliv velikosti vakua na dosažené deformace i výskyt vad, byl do značné míry analogický k vlivu různého prohřátí fólie (dáno proměnnými „teplota“ a „doba“ předehřevu). Nižší velikost vakua, charakterizována jeho menší zásobou, vykazovalo tedy podobné jevy, jako u nižšího prohřátí fólie. Vzájemná míra dotvarování byla prokázána s větší velikostí zásoby vakua.

Toto dokazuje platnost předpokladu z teorie tvarování i pro technologii IMD, kde na základě Boylova a Daltonova zákona má velikost zásoby vakua při ostatních konstantních parametrech vliv na rychlost tvarování.

Vyšší rychlost má za následek, že i po oddálení fólie od zdroje tepla v průběhu tvarování stihne být vytvarována větší plocha „A tvaru“ výrobku, než folie zchladne pod mez, kdy již tvarovacím tlakem, který je k dispozici nelze fólii tvarovat.

Rovněž je třeba zmínit, že na konci tvarování, kdy je třeba tvarovat ostré rádiusy či hrany, je potřebný vyšší tvarovací tlak a v případě menšího zásobníku vakua by již nemusel být k dispozici. Případný rešeršovaný vliv rychlosti deformace na její velikost může být též uvažován.

Diskuze vlivu doby dochlazení fólie

Veškeré díly opatřené rastrem, byly z důvodu vyšší časové náročnosti měření před vstřikem, vyrobeny s delší dobou dochlazení fólie, než maximálních 10 s. Proto byly v souvislosti s proměnnou „doba dochlazení“ hodnoceny pouze díly bez rastru na výskyt vad.

S rostoucím časem přestávky mezi koncem předehřevu a zavřením formy (doba dochlazení) klesá výskyt vady „přehyb fólie“, neboť dochlazená fólie má vyšší tuhost a je méně náchylná vůči vlnění před čelem taveniny, toto je i podpořeno relativně nízkými hodnotami posuvu rastru v bodě č.1. Tímto je potvrzena platnost rešeršovaného předpokladu i pro IMD a lze doporučit toto nastavení pro proces IMD s předtvarováním.

Jelikož bylo stejné doporučení vzneseno i pro redukci teploty předehřevu zóny B dílu,



tak došlo k souhrnnému vyhodnocení dílů za kombinace těchto nastavení (snížení teploty v zóně B na 250°C a doba dochlazení 10s). Tato kombinace měla pozitivní efekt na výskyt vad a lze ji rovněž doporučit.

Diskuze vlivu deformace výrobků na výskyt vad

Na základě provedeného výzkumu bylo zjištěno, že výskyt vad u technologie IMD s předtvarováním, je ovlivňován dosaženou deformací folie (zejména deformací vstřikem ϵ_v). Nejčastěji jde o následující 3 vady: „průraz fólie“ v případě nedotvarované oblasti uprostřed dílu, „mikrotrhliny“ v případě nedotvarované oblasti na kraji dílu (při podélném toku taveniny) a „přehyb fólie“ (při toku taveniny spíše v kolmém směru k nedotvarované oblasti).

Pro dané vady byly určeny závislosti mezi velikostí deformace pomocí vstřiku ϵ_v a četností jejich výskytu, čímž bylo naznačeno procesní okno procesu pro různé modelové případy.

Deformace ϵ_v o velikosti cca 14% může ve velmi úzké toleranci vést k výrobě IMD dílů téměř bez vadných výrobků i při setkání všech negativních jevů. Popisovaná závislost rovněž ukazuje možnosti zhoršení zmetkovitosti nestabilním předtvarováním, nebo naopak zlepšení při předpokladu k výskytu pouze některé vady.

Vzhledem k podstatě vad lze doporučit dosažení menších hodnot ϵ_v , při toku taveniny ve směru delšího rozměru nedotvarované oblasti a naopak větších hodnot ϵ_v , při toku taveniny kolmo k delšímu rozměru nedotvarované oblasti.



8 Závěr

V dnešní době, kdy je na trhu mnoho výrobců plastových výrobků a silná konkurence z rozvojových zemí, je již velmi složité se prosadit a dlouhodobě vytvářet zisk. Z tohoto důvodu výrobci plastových výrobků mohou jít cestou vysoké míry automatizace, která sníží náklady na pracovní sílu, či dosáhne vyšší využitelnosti výrobního zařízení. Často se rovněž zaměřují na výrobky, které mají tzv. „přidanou hodnotu“, za kterou je ochoten zákazník zaplatit odpovídající cenu. Tato „přidaná hodnota“ může spočívat jak v kombinaci nových materiálů, důmyslné konstrukce, poskytnutí doplňkových procesů (např. chromování, lakování, montáž), či zejména pak použití nových technologií, které mohou poskytovat mnoho konkurenčních výhod. Jednou z těchto nových technologií je i technologie IMD s předtvarováním, která umožňuje pomocí tzv. transferové fólie dekorovat i složitější díly přímo ve vstřikovací formě (vč. předtvarování). Na tuto technologii je zaměřená i předložená disertační práce.

Oproti standardní IMD technologii, kde se film v případě potřeby tvaruje pouze postupem taveniny, umožňuje IMD s předtvarováním vyrábět mnohem složitější díly. Další předností této technologie je zejména výrazné snížení nákladů a zvýšení produktivity oproti běžně používané technologii IML, která rovněž umožňuje dekoraci vstřikovaných dílů přímo ve vstřikovací formě, avšak za použití vkládané předtvarované fólie, jejíž příprava mimo vstřikovací nástroj zahrnuje další operace, zejména tvarování a ostřih této fólie.

V době psaní této práce nebyla publikována žádná odborná literatura zabývající se přímo problematikou předtvarování u technologie IMD (transferový typ), proto bylo v oblasti řešerše třeba těžit z podobnosti některých témat zejména s technologiemi vstřikování, tvarování, IML a standardní IMD.

Experiment předkládané disertační práce je pak zaměřen na hodnocení vlivu parametrů předtvarování fólie u technologie IMD na kvalitu velkoplošného, tvarově složitého dílu. Návrh experimentálních měření se však velmi intenzivně soustředil na probíhající jevy u technologie IMD s předtvarováním, které by mohly mít nejen vliv na kvalitu dílu, ale též přispěly k popisu průběhu tohoto složitého procesu. Mezi tyto jevy patří např. celková dosažená deformace v jednotlivých místech dílu, či deformace dosažená tvarováním, ale zejména deformace, která v nedokonale předtvarovaných oblastech probíhala během vstřikování postupem taveniny.

Za účelem studia těchto jevů byla navržena vlastní metodika k hodnocení deformací na IMD fóliích před i po vstřikování, zahrnující vývoj nového způsobu tisku rastru na IMD fólii pomocí digitálního tisku.

Výsledky experimentálních měření lze shrnout do následujících hlavních bodů:

- Vytvořená metodika hodnocení deformací u IMD fólie vč. aplikace vyvinuté metody tisku rastru na IMD fólii je zvalidována a lze ji u technologie IMD aplikovat na studium deformací před i po vstřikování.
- Technologické parametry předehřevu zásadně neovlivňují celkovou deformaci fólie (po jejím zastříknutí) v jednotlivých místech dílu. Tato je však ovlivňována tvarem dílu, přičemž vyšší hloubka i příkrost daného místa na díle zvyšuje dosaženou celkovou deformaci.
- Většina technologických parametrů předehřevu ovlivňuje míru předtvarování před zastříknutí fólie a tím pádem i deformaci dosaženou během vstřikování, neboť platí, že celková deformace je dána součtem deformace vzniklé při tvarování a při vstřiku. Konkrétněji vyšší prohřátí fólie či silnější vakuum vede k lepšímu předtvarování.
- Deformace elementů v nedotvarovaných oblastech probíhá zpravidla v jednom směru a je kompenzována snížením tloušťky fólie.
- Technologické parametry předehřevu mají zásadní vliv na výskyt vad u IMD výrobků, přičemž většina vad se projevuje v oblastech, které se dotvarovávají během vstřiku.
- Vliv míry deformace během vstřiku na kvalitu dílů, charakterizovanou výskytem vad, není jednoznačný, neboť při vysoké míře poměrné deformace dosažené vstřikem již dochází k průrazu fólie taveninou, či k vzniku mikrotrhlin. Naopak při nižších úrovních této deformace již nemůže nedotvarované místo pozitivně působit na „narovnání“ vlnění, které se tvoří před čelem taveniny a tím dojde ke vzniku nejčastější závažné vady „přehybu fólie“. Byla sestavena grafická závislost, která zobrazuje procesní okno s odpovídající velikostí deformací, pro stabilní výrobu IMD.
- V kontextu s řešenými předpoklady platnými pro analogické technologie byla prokázána platnost některých z nich i pro IMD.

8.1 Přínos pro vědu

Vzhledem k výsledkům plynoucích z této práce lze nejzásadnější přínos pro vědu shrnout do následujících bodů:

- Provedení vlastní metodiky k hodnocení deformací na IMD fólii před i po zastříknutí, za použití dosud nepoužitého způsobu tisku rastru na IMD fólii, který zajišťuje dostatečnou viditelnost i po průchodu náročnými podmínkami v dutině vstřikovací formy a navíc je velice rychlý s přijatelnými náklady. (V době odevzdání práce probíhá zápis užitého vzoru tisku rastru na fólii).
- Výzkum průběhu deformací IMD fólie během jejího předtvarování i zastříkávání včetně jejich podílu na celkové dosažené deformaci.
- Prokázání platnosti některých základních zákonitostí z příbuzných technologií i pro technologii IMD s předtvarováním včetně poukázání na odlišnosti.
- Návrh zapojení vědy do mnoha neprobádaných oblastí v rámci technologie IMD s předtvarováním.
- Shrnutí poznatků, které mohou vést k potenciálnímu rozšíření této málo známé a v literatuře zcela minimálně popsané technologie.

8.2 Přínos pro praxi

Vzhledem k výsledkům plynoucích z této práce lze nejzásadnější přínos pro praxi shrnout do následujících bodů:

- Představení technologického řešení pro výrobu IMD výrobků s hlubším tvarem včetně popisu probíhajících jevů.
- Vlastní přístup k vyhotovení kvalitativní analýzy dílů jako podpůrného nástroje pro studium dalších souvislostí.
- Vymezení procesního okna deformací, které je třeba dosáhnout pro stabilní proces s definovanou mírou zmetkovitosti.
- Důkladný výzkum vlivu parametrů předtvarování na dosažené deformace fólie v kontextu s kvalitou dílů, přispívá k pochopení probíhajících jevů a může napomoci k nastavení stabilního procesu pro výrobky podobného typu.
- Práce naznačuje fakta, které je třeba zohlednit při návrhu tvaru IMD výrobku a později vhodného nástroje.

- Díky popisu metod zkoumání deformace lze tyto poznatky aplikovat na dílčí výzkumy v praxi, ale i na přesné polohování předtištěných motivů z fólie na výrobek.

8.3 Doporučení k pokračování disertační práce:

Je k dispozici mnoho témat k pokračování předložené disertační práce, ale níže uvádím několik nejzajímavějších:

- Provést výzkum předeřevu pomocí trubcových IR zářičů včetně zpětnovazebné regulace intenzity.
- Navrhnout a validovat použití technologie vysokotlakého tvarování u technologie IMD přímo ve vstřikovací formě.
- Provést výzkum deformace pomocí optických měřicích systémů.
- Popsat vliv parametrů vstřikování na kvalitu IMD dílů a vyhodnotit konsekvence s vlivem předtvarování.



9 Seznam použité Literatury

- [1] BRAUN, H., ENEWOLDSEN, P.: *Folienhinterspritzen: Dekorieren in der Spritzgiessmaschine*. Kunststoffe, 1999, 89.9: 102-104.
- [2] DOUBEK, P.: *Research of deformation behaviour of high strength steel sheets at high deformation speeds*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2006, 166 s.
- [3] EYERER, P., KLEIN, S., KEISER, M. a BRÄUTIGAM, V.: *Polymer engineering: Oberflächentechnologien für Kunststoffbauteile*. Berlin: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-72402-5. Polymer Engineering VDI-Buch 2008, pp 436-465
- [4] CHEN, H., CHEN, S., HSU, P., PENG, H., WANG, Y.: *Study of processing parameters on part warpage of in mold polymer injection molding*, Society of Plastic. *67th Annual Technical Conference of the Society of Plastics Engineers 2009, (ANTEC 2009), 22-24 June 2009, Chicago, Illinois, USA*. Brookfield, Conn: The Society, 2009. ISBN 9781615673278
- [5] FLORIAN, J. *Practical thermoforming: principles and applications*. 2nd ed., rev. and expanded. New York: M. Dekker, c1996, x, 391 p. Plastics engineering (Marcel Dekker, Inc.), 39. ISBN 0824797620.
- [6] HALLIDAY, D., WALKER J. a RESNICK R.: *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Vyd. 1. Brno: VUTIUM, 2000, viii, s.330-576, [33] s. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1868-0.
- [7] KOMMOJI, S, et al. *Studies on the stretching behaviour of medium gauge high impact polystyrene sheets during positive thermoforming*. Journal of Plastic Film and Sheeting, 2014, 8756087914538443.
- [8] KREBS, J. *Teorie zpracování nekovových materiálů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2001. ISBN 80-7083-449-8
- [9] KREBS, J., SOVA, M.: *Termoplasty v praxi* [online]. Praha: Verlag Dashöfer, 1999-2001, 1 sv. (různé stránkování). ISBN 80-86229-15-7.
- [10] KUMAR, P. S., G. K. KUMAR, S. KOMMOJI, R. BANERJEE a A. K. GHOSH. *The effect of material characteristics and mould parameters on the thermoforming of thick polypropylene sheets*. Journal of Plastic Film and Sheeting [online]. 2014, 30(2): 162-180 [cit. 2015-12-31]. DOI: 10.1177/8756087913497387. ISSN 8756-0879. Dostupné z: <http://jpf.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/8756087913497387>



- [11] LENFELD, P.: *Technologie II*. Vyd. 2. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009, 138 s. ISBN 978-80-7372-467-2.
- [12] Bayer Material Science: *Injection molding of high-quality molded parts - Processing data and advice* [online]. 2013, : 15 [cit. 2014-06-13]. Dostupné z: <http://www.plastics.bayer.com/zh-CN/Technologies/Processing/>
- [13] REICHART, Marc. *Neues Verfahren in Serie. AUTOMOBIL PRODUKTION* [online]. 2008, 2008(12): 78-79 [cit. 2013-05-05]
- [14] HSIEH, L., a CHANG, K.: *Yield improvement on in-mold decoration manufacturing through parameter optimization v International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* [online]. 2013, 14(10): 1823-1828 [cit. 2014-05-03]. ISSN: 2005-4602.
- [15] LIU, C.-M., a CHANG P.-W. (2012). *Parameters Affecting the Ink Wash-off in In-mold Decoration of Injection Molded Parts. International Polymer Processing: Vol. 27, No. 2, pp. 224-230. Volume 27, Issue 2 (May 2012) Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG*
- [16] MARTINEC, T., ŠKOLNÍK, P., HUBKA, L.: *Modelling and control of temperature field of an industrial form with infrared radiators*. In ECMS 2007. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2007. s. 125-127. ISBN 978-80-7372-2.
- [17] MELHORN, A. LEONHARD KURZ STIFTUNG AND CO. KG. "IMD Technik". Kunststoff institut Luedenscheid, 2012, 20 s.
- [18] MONTEIX, S., et al. *Experimental study and numerical simulation of preform or sheet exposed to infrared radiative heating*. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 119.1: 90-97.
- [19] PHILLIPS, C. BOULD, C. CLAYPOLE, T. GETHIN, D *Finite element modelling of low temperature forming of polymer films with application in in-mould decoration in Material and Design 30 (s.537-550)*. New York: Elsevier, ©2009-, volumes.
- [20] PHILLIPS, C. CLAYPOLE, T. GETHIN, D *Mechanical properties of polymer films used in in-mold decoration in Journal of materials processing technology (s.221-231)*. New York: Elsevier, ©2008-, volumes.
- [21] PŮTA, J. *Řízení tlaku taveniny ve vtokovém systému vstřikovacího nástroje (Disertační práce)*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008

- [22] SCHIEMANN, L. *Transparent ETFE-foils under biaxial stresses* EDITED BY SCOTT W. BECKWITH .. [ET AL.] a SOCIETY FOR THE ADVANCEMENT OF MATERIAL AND PROCESS ENGINEERING. SAMPE 2012 conference & exhibition: Baltimore, Maryland, May 21-24, 2012. Covina, CA: Society for the Advancement of Material and Process Engineering, 2012. ISBN 9781934551127.
- [23] SCHMIDT, F. M.; LE MAOULT, Y.; MONTEIX, S. *Modelling of infrared heating of thermoplastic sheet used in thermoforming process*. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 143: 225-231.
- [24] SHELBY, M. D. *Effects of infrared lamp temperature and other variables on the reheat rate of PET*. In: Proceedings of ANTEC. 1991. p. 1420-1424.
- [25] SOBOTKA, J.: *Hodnocení mechanických vlastností nových vysokopevnostních materiálů: The evaluation of mechanical properties of new high-strength materials*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2008, 166 s.
- [26] CHEN S.-C., HUANG S.-T. a LIN M.-C.: *Effect of decoration film on mold surface temperature during in-mold decoration injection molding proces: International communications in heat and mass transfer*: Elsevier, 2010, 37: 501-505. ISSN 0735-1933.
- [27] CHEN S.-C., HUANG S.-T. a LIN M.-C, CHIEN R.-D.: *Study on the thermoforming of PC films used for in-mold decoration in International communications in heat and mass transfer*: Elsevier, 2008, 35: s 967-973. ISSN 0735-1933.
- [28] SPE, Society of Plastics Engineers; PDL. *Specialized molding techniques*. Norwich, NY: Plastics Design Library, 2001. ISBN 188420791x.
- [29] TADMOR, Z. a GOGOS, G.: *Principles of polymer processing*. 2nd ed., Rev. ed. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, c2006, xvi, 961 p. ISBN 9780471387701.
- [30] Verband der Automobilindustrie e.V. Qualitäts Management Center (VDA QMC) : *VDA 16: Dekorative Oberflächen von Anbau- und Funktionsteilen im Außen- und Innenbereich von Automobilen / 2. Auflage* 2008
- [31] WEBSTER, S. (ed.). *Basic principles of thermoforming* [online]. Athlone Extrusions [cit. 2014-11-29]. Dostupné z: stephen-webster.co.uk



- [32] WONG, A.C-Y LIANG K,Z: *Thermal effects on the behaviour of PET films used in the in-mould-decoration proces involved in plastics injection moulding in Journal of materials processing technology* 63. 1-3, s. 510-513 New York: Elsevier,1997
- [33] YU-HSING, L., CHEN, H.-L., CHEN, S.-C. a LIN, Y.-C.: *Effect of asymmetric cooling system on in-mold roller injection molded part warpage: International Communications in Heat and Mass Transfer* Elsevier, 2015, vol. 61, s. 111-117
- [34] ZHANG L a kol. *IMD Technology Applied to the Surface Decoration in Product Design v International Proceedings of the 2014 International Conference on Mechatronics, Control and Electronic Engineering*. ISBN (on-line): 978-94-62520-31-8
- [35] ZÖLLNER, O. Optimierte Werkzeugtemperierung (Anwendungstechnische Information KU 21 104-9901 d,e/5056841).
- [36] [online]. [cit. 2013-03-14]. Dostupné z: www.burgdesign.com
- [37] [online]. [cit. 2013-03-14]. Dostupné z: www.ceramicx.com
- [38] [online]. [cit. 2014-10-05]. Dostupné z: www.engel.at
- [39] [online]. [cit. 2014-06-06]. Dostupné z: <http://www.heraeus-infraredsolutions.co.uk/>
- [40] [online]. [cit. 2012-06-15]. Dostupné z: www.koplast.cz
- [41] [online]. [cit. 2012-06-01]. Dostupné z: www.kurz.de
- [42] [online]. [cit. 2014-06-01]. Dostupné z: www.kraussmaffei.com
- [43] [online]. [cit. 2014-12-01]. Dostupné z: www.materialdatacenter.com
- [44] [online]. [cit. 2014-06-01]. Dostupné z: <http://niebling-form.com/formtechnik/>
- [45] [online]. [cit. 2014-06-01]. Dostupné z: www.nissha.com
- [46] [online]. [cit. 2014-02-22]. Dostupné z: www.proell.de
- [47] [online]. [cit. 2014-08-18]. Dostupné z: <http://www.sinotech.com/injectionMolded.html>
- [48] [online]. [cit. 2014-06-01]. Dostupné z: www.synventive.com
- [49] [online]. [cit. 2015-01-01]. Dostupné z: <http://www.tjy.com.tw/>
- [50] [online]. [cit. 2015-03-01]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/index.php?page=fyzika_pol





10 Seznam publikací autora disertační práce:

- [1] PETERA, P.: *The Holding Pressure and Its Influence on Quality in PIM Technology*. In: Acta Polytechnica Vol. 52 No. 4/2012, s. 100 – 102, ISSN 1805-2363
- [2] PETERA, P.: *The influence of holding pressure on powder distribution in PIM technology*. In: Modern Machinery (MM) Science Journal, July 2012, Prague, Czech Republic, ISSN 1805-0476 (online), ISSN 1803-1269 (Print)
- [3] PETERA, P.: *Study of the properties of PIM technology part in different places*. In: 12th international conference Technology 2011, Bratislava, Slovakia, ISBN 978-80-227-3545-2 (CD)
- [4] PETERA, P.: *Construction of the mold for observation the filling stage of PIM technology in automatic cycle*. In: 10th international conference Modern technologies in manufacturing, October 2011, Technical university of Cluj-Napoca, Romania, s. 250-253, ISBN 978-606-8372-02-0
- [5] PETERA, P.: *The influence of surface oxidation on adhesion by metal overmolding*. In: Mezinárodní Baťova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky, April 2011, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta managementu a ekonomiky, Zlín, ČR, ISBN 978-80-7454-013-4 (CD)
- [6] PETERA, P.: *Study of the influence of holding pressure by PIM technology with new method*. In: Mezinárodní Baťova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky, April 2011, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta managementu a ekonomiky, Zlín, ČR, ISBN 978-80-7454-013-4 (CD)
- [7] PETERA, P.: *The influence of etching the inserts on adhesion by glass overmolding*. In: MTeM 2010, Košice, Slovakia, ISBN 978-80-553-0560-8 (CD)
- [8] PETERA, P.: *Common influence of roughness and temperature on overmolding of metal inserts*. In: 13th International scientific conference on ME2010, Slovak University of Technology in Bratislava, Slovakia, S5-96 - 101, ISBN 978-80-227-3304-5
- [9] PETERA, P.: *Study of short-term changes of biopolymer's HL 103 properties evaluated by DSC and DMA method*. In: Mezinárodní Baťova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky, April 2010, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta managementu a ekonomiky, Zlín, ČR, ISBN 978-80-7318-922-8 (CD)

- [10] PETERA, P.: *Influence of size and duration of holding pressure on the weld joint quality by ultrasonic welding of plastics*. In: ERIN 2010, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, Plzeň, ČR, ISBN 978-80-7043-866-4 (CD)
- [11] PETERA, P. – KOTERA, O. – KOPÁČ, D. – PŮTA, J.: *Study of short-term changes of biopolymer's HL 103 mechanical properties*. In: TECHNOLOGIA 2009, 11. medzinárodná konferencia, Bratislava, ISBN 978-80-227-3155-5
- [12] PETERA, P. - PŮTA, J - KOPÁČ, D - KOTERA, O.: *Influence of the vibration amplitude and the welding gap on the weld quality by ultrasonic welding of plastics*. In: PRO-TECH-MA 2009, International Scientific Conference, Progressive Technologies and Materials, Rzeszów - Bezmiechowa, Polsko, s. 213-217, ISSN 978-83-7199-546-0
- [13] KOTERA, O. – KOPÁČ, D. – PETERA, P – PŮTA, J.: *Mathematical description of the proportion regenerates in the original material*. In: 11.Medzinárodná konferencia TECHNOLOGIA 2009, Bratislava, SR, s. 80-82, ISBN 978-80-227-3155-5
- [14] KOTERA, O. – KOPÁČ, D. – PETERA, P.: *Shrinkage of composite plate with glass fibres in relation to degree of regeneration*. In: PRO-TECH-MA 2009, International Scientific Conference, Progressive Technologies and Materials, Rzeszów - Bezmiechowa, Polsko, s. 110-114, ISSN 978-83-7199-546-0
- [15] KOPÁČ, D. – PETERA, P. – KOTERA, O.: *The weld quality comparing of polypropylene depending on the mould temperature*, In: 11.Medzinárodná konferencia TECHNOLOGIA 2009, Bratislava, SR, s.18, ISBN 978-80-227-3155-5
- [16] KOPÁČ, D. – PETERA, P. – KOTERA, O.: *Influence of injection mould temperature on weld quality of nanocomposite polypropylene*. In: PRO-TECH-MA 2009, International Scientific Conference, Progressive Technologies and Materials, Rzeszów - Bezmiechowa, Polsko, s.37, ISSN 978-83-7199-546-0
- [17] PŮTA, J. - LENFELD, P. – KOPÁČ, D. – PETERA, P.: *New Way of Injection Technology Process Control*. In: PRO-TECH-MA 2009, International Scientific Conference, Progressive Technologies and Materials, Rzeszów - Bezmiechowa, Polsko, s.37, ISSN 978-83-7199-546-0



- [18] PETERA, P.: *Influence of welding pressure on the weld quality by ultrasonic welding of plastics*. In: Mezinárodní Baťova Konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2009. Zlín, 2.4.2009, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta managementu a ekonomiky, (CD) ISBN 978-80-7318-812-2
- [19] PETERA, P.: *Dependence of talc amount in polypropylene on its wear resistance and tribological properties* In: Mezinárodní konference MITECH 2009, Praha, 25.6. – 26.6.2009
- [20] PETERA, P. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. *Tvorba rastru k hodnocení deformací na transferové IMD fólii. Užité vzor - přihláška.*
- [21] PETERA, P.: *Tvorba rastru k hodnocení deformací na transferové IMD fólii*. In: Mezinárodní Baťova konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky, Duben 2016, Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta managementu a ekonomiky, Zlín, ČR, *V tisku*

11 Seznam příloh

1. Přehled technických parametrů vstřikovacího stroje ES 2550/500HL
2. Materiálová data PC/ABS Bayer Bayblend T65XF



Příloha 1: Přehled technických parametrů vstřikovacího stroje ES 2550/500HL

Typ stroje	ES 2550/500HL
Uzavírací síla [kN]	5000
Rozměry upínacích desek (ŠxV) [mm]	1480x1300
Vodící sloupy / rozměry (ŠxV) [mm]	Bezsl. konstrukce
Min. výška nástroje [mm]	500
Max. výška nástroje [mm]	1200
Max. rozevření upínacích desek [mm] (bez započítání mag.desek)	1700
Průměr šneku [mm]	80
Zdvihový objem vstřikovací jednotky [cm ³]	2050
Max. vstřikovací tlak [Bar]	1440
Počet hydraulických okruhů na kaskády	6
Počet hydraulických okruhů na tahače jader (PS / OS)	2/3
Počet topných pásů	24
Magnetické desky / výška [mm]	ANO / 54



Příloha 2: Materiálová data PC/ABS Bayer Bayblend T65XF

Vlastnost	Hodnota	Jednotka	Norma / Metoda
Hustota	1130	kg/m ³	ISO 1183
Smrštění	0,5 - 0,7	%	ISO 2577
MFR (260 °C, 5 kg)	12,3	g/10min	ISO 1133
Mez pevnosti v tahu (50mm/min)	54	MPa	ISO 527-2
Prodloužení na mez pevnosti	4,4	%	ISO 527-2
Odolnost za tepla dle Vicata A120	120	°C	
Teplota tvarové stálosti (dle Vicata 0,45 MPa)	122	°C	ISO 75-2
Vrubová houževnatost			
Metoda Charpy při teplotě – 30 °C	35	kJ/m ²	ISO 180N
Metoda Charpy při teplotě 23 °C	45	kJ/m ²	ISO 180N
Vrubová houževnatost			
Metoda Charpy při teplotě – 30 °C	Nepřeraženo	kJ/m ²	ISO 180U
Metoda Charpy při teplotě 23 °C	Nepřeraženo	kJ/m ²	ISO 180U
Doporučené vsífkovací parametry			
Doporučená teplota taveniny	260°C	°C	
Dop. teplota temperace nástroje	80°C	°C	