

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

TECHNICKÁ FAKULTA

Katedra materiálu a strojírenské technologie



Optimalizace vstupních parametrů vstřikovacího procesu polymeru

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Hrabě, Ph.D.**

Autor diplomové práce: **Bc. Jiří Socha**

PRAHA 2011

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Jiří Socha

obor Silniční a městská automobilová doprava

Vedoucí katedry Vám ve smyslu Studijního a zkušebního řádu ČZU v Praze čl. 17 odst. 2 určuje tuto diplomovou práci.

Název práce: **Optimalizace vstupních parametrů vstřikovacího procesu polymeru**

Osnova diplomové práce:

1. Úvod
2. Cíl práce a metodika
3. Popis současné problematiky vstřikování polymerů
4. Optimalizace vstupních parametrů vstřikovacího procesu polymeru
5. Závěr
6. Seznam literatury
7. Přílohy

Rozsah hlavní textové části: 40 - 60 stran

Doporučené zdroje:

- [1] BALTÁ, C., FAKIROV, S.: Microhardness of polymers. Cambridge. Cambridge University Press, 2007. 237 s.
- [2] BRAUN, D. et al.: Polymer synthesis : theory and practice : fundamentals, methods, experiments. Berlin, Springer, 2005. 385 s.
- [3] CAMPO, E., A.: Selection of polymeric materials : how to select design properties from different standards. Norwich, William Andrew, 2008. 253 s.
- [4] DOBRÁNSKY, J.: Experimentálna analýza vplyvu zmeny technologických parametrov na hmotnostnú charakteristiku výsledného produktu pri vstrekování termoplastov. Plasty a kaučuk, 2008, Roč. 45, č. 11-12, s. 335-336
- [5] RŮŽIČKOVÁ, Z.: 3D nástroj pro simulaci vstřikování plastů. MM Průmyslové spektrum, 2009, Roč. 13, č. 10, s. 58-59
- [6] ZEMAN, L.: Vstřikování plastů : úvod do vstřikování termoplastů. Praha, BEN - technická literatura, 2009. 246 s.
- [7] Časopisy: Strojírenská technologie, MM Průmyslové spektrum, TM Svařování – dělení-spojování materiálů, Technik

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Hrabě, Ph.D.**

Termín zadání diplomové práce: listopad 2009

Termín odevzdání diplomové práce: duben 2011



Vedoucí katedry




Děkan

V Praze dne: 30. 11. 2009

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím literárních pramenů uvedených v seznamu použité literatury a po odborných konzultacích s vedoucím diplomové práce.

.....

Podpis

V Praze dne 1.dubna 2011

Poděkování

Děkuji Ing. Petru Hraběti, Ph.D., vedoucímu mé diplomové práce, a doc. Ing. Rostislavu Chotěborskému, Ph.D. za jejich odborné vedení, cenné připomínky a rady, které mi poskytovali v průběhu jejího zpracování.

Dále bych rád poděkoval své rodině, za podporu během studia, technologovi Ing. Štefanu Vilčkovi a pracovníkům měrného střediska firmy TRW Volant a.s., Miroslavovi Kočímu a Tomáši Martinkovi, za jejich výpomoc a trpělivost při měření a vyhodnocování vzorků.

Abstrakt: *Cílem této diplomové práce bylo vytvoření komplexního přehledu dostupných způsobů a možností provádění optimalizací vstřikovacího procesu polymeru a následné sestavení a vyhodnocení statisticky navrženého experimentu ve vybraném podniku. V kapitole „Úvod“ je stručně nastíněn rozvoj celosvětového plastikářského průmyslu. V kapitole „Cíl práce a metodika“ jsou stanoveny cíle práce a postupy k jejich dosažení. Kapitola „Popis současné problematiky vstřikování polymerů“ je rozdělena do několika podkapitol, kde jsou postupně zpracovány obecné informace o polymerních materiálech, technologii vstřikování a o oblastech a principech dílčích optimalizací vstřikovacího procesu. Kapitola „Optimalizace vstupních parametrů vstřikovacího procesu polymeru“ je také rozdělena do několika podkapitol, obsahujících popis vybraného podniku, vstřikovaného materiálu, dané technologie vstřikování a postup sestavení a vyhodnocení statisticky navrženého experimentu. Kapitola „Závěr“ obsahuje interpretaci výsledků experimentu a jejich přínos pro praktické využití v daném podniku.*

Klíčová slova: *DoE, statistika, experiment, optimalizace, vstřikování, polymer*

Optimization of input parameters of the polymer injection process

Summary: *The aim of this graduation thesis was to create complex survey of accessible methods and possibilities of implementation of optimization injection process of the polymer and then propose and assess statistically designed experiment in selected company. In chapter „Introduction“ is briefly outlined development of global plastics industry. In chapter „Aim of the thesis and methodics“ are described objectives of the thesis and procedures to their achievement. Chapter „Description of the current problems of polymer injection“ is divided into several subheads, in which gradually processed general information about polymeric materials, injection technology and about areas and principles of partial optimization of the injection process. Chapter „Optimization of input parameters of the polymer injection process“ is also divided into several subheads, including description of selected company, injected material, applied injection technology and procedure of proposal and evaluation of the statistically designed experiment. Chapter „Results“ includes interpretation of results of the experiment and their contribution for practical usage in the given company.*

Keywords: *DoE, statistics, experiment, optimization, injection, polymer*

Obsah:

1. Úvod	1
2. Cíl práce a metodika	3
2.1 Cíle práce	3
2.2 Metodika práce	3
3. Popis současné problematiky vstřikování polymerů	4
3.1 Obecné informace o polymerech a jejich základní rozdělení.....	4
3.2 Základní technologie zpracování polymerů.....	7
3.3 Technologie vstřikování polymerů.....	8
3.3.1 Historie a vývoj vstřikování polymerů	8
3.3.2 Hlavní a speciální způsoby vstřikování polymerů.....	10
3.3.2.1 Vstřikování termoplastů.....	10
3.3.2.2 Vstřikování reaktoplastů.....	12
3.3.2.3 Vstřikování elastomerů	13
3.3.2.4 Speciální způsoby vstřikování polymerů	13
3.4 Princip a oblasti optimalizací vstřikovacího procesu	18
3.4.1 Optimalizace při vývoji výrobku.....	19
3.4.2 Optimalizace konstrukce vstřikovací formy.....	20
3.4.3 Optimalizace vstřikovacích parametrů – DoE.....	21
3.4.3.1 Historie a rozvoj DoE.....	21
3.4.3.2 Princip a postup DoE	21
4. Optimalizace vstupních parametrů vstřikovacího procesu polymeru....	25
4.1 Vstřikovaný materiál – Polyuretan	25
4.2 Systému vstřikování polyuretanu	27
4.3 Návrh a sestavení DoE	29
4.4 Výroba vzorků pro experiment	32
4.5 Měření a vyhodnocování vzorků	33
4.5.1 Vyhodnocení hmotnosti vzorku	33
4.5.2 Vyhodnocení hmotnosti přetoku do dělicí roviny	35
4.5.3 Vyhodnocení hmotnosti přetoku odvzdušněním formy	37
4.5.4 Vyhodnocení hmotnosti vtoku	39
4.5.5 Vyhodnocení času přetoku pěny.....	41
4.5.6 Vyhodnocení součinitele délkového smrštění	43
4.5.7 Vyhodnocení součinitele objemového smrštění.....	45
4.5.8 Vyhodnocení průměrné tvrdosti vzorku	48
4.5.9 Vyhodnocení průběhu tvrdosti vzorku	50
4.5.10 Vyhodnocení barevnosti vzorků.....	52
4.5.10.1 Vyhodnocení souřadnice barevnosti L^*	53
4.5.10.2 Vyhodnocení souřadnice barevnosti a^*	53
4.5.10.3 Vyhodnocení souřadnice barevnosti b^*	55
4.5.11 Vyhodnocení struktury vzorku	57
5. Závěr	60
6. Seznam použité literatury	62
Seznam obrázků.....	66
Seznam použitých zkratk	68
7. Přílohy	69

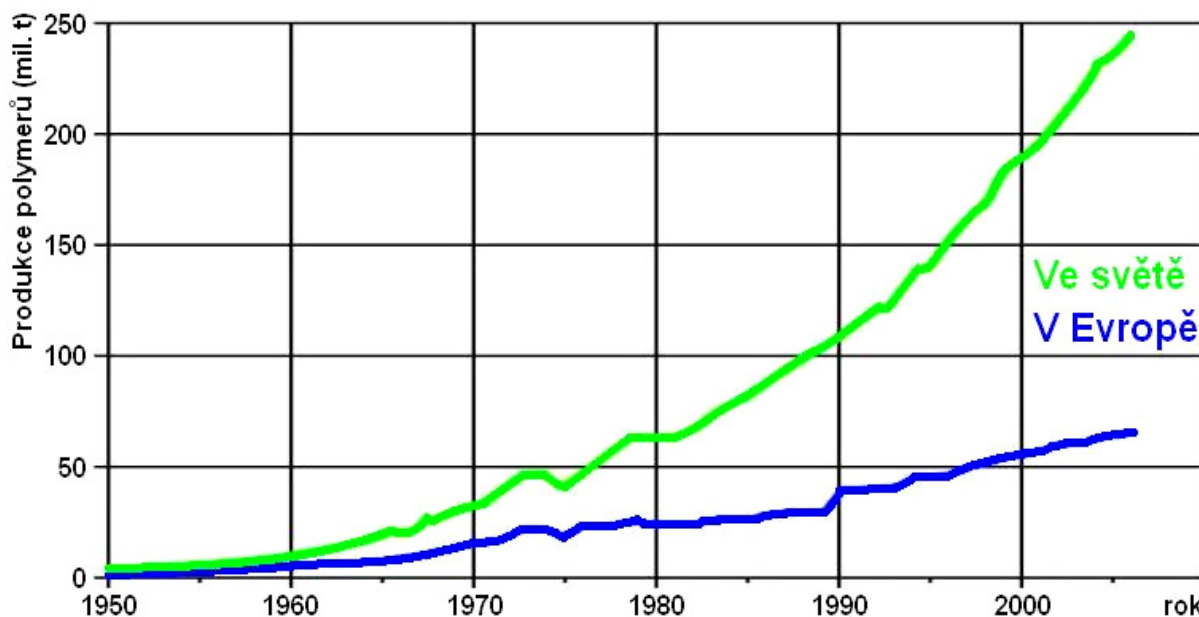
1. Úvod

Růst celosvětového průmyslu je úzce spojen s výrobou a použitím polymerů, zejména plastů, které tvoří významnou materiálovou základnu pro výrobu v řadě důležitých odvětví. Plasty totiž mají jednu skrytou vlastnost, kterou nelze nalézt na žádném bezpečnostním listu ani na žádném produktu – jsou energeticky mimořádně účinné a lze je tedy považovat za klíčový prvek zdrojů úsporných technologií s nízkou spotřebou materiálu. Využívání plastů tak skrývá například velké výhody v oboru tepelných izolací budov nebo i v dopravě, díky lehkým konstrukčním systémům v automobilech, autobusech, vlacích či letadlech. [5, 6]

Důkazem je například fakt, že na výrobu jednoho amerického automobilu je dnes použito až 130 kg plastů, což má za následek výrazné snížení jeho celkové hmotnosti. Podle obecně uznávaných průmyslových odhadů dochází na každých 10 % takto zredukované hmotnosti ke snížení spotřeby paliva v rozsahu 5 až 7 %, čímž samozřejmě dochází i k úměrnému snížení emisí škodlivých látek do ovzduší. [7, 8]

Podobný příklad, tentokrát z leteckého průmyslu, uvádí jeden z největších světových výrobců plastů, saúdskoarabský Sabic, podle něhož za předpokladu, že letadlo spotřebuje na 1 kg hmotnosti asi 0,03 kg paliva za hodinu letu a vzhledem k tomu, že celosvětová flotila komerčních dopravních letadel nalétá 57 mil. hodin ročně, pak úspora 1 kg hmotnosti náhradou za plasty stejných užitných vlastností znamená úsporu zhruba 1 700 tun paliva a 5 400 tun emisí CO₂ ročně. [9]

Podle údajů PlasticsEurope, BASF a K 2004 bylo v roce 2003 ve světě vyrobeno kolem 221 mil. tun polymerů, což znamená, že se za období 15-ti let jejich výroba celosvětově zdvojnásobila, viz obr. 1, přičemž ocel ke stejnému růstu produkce potřebovala 35 let. [10]



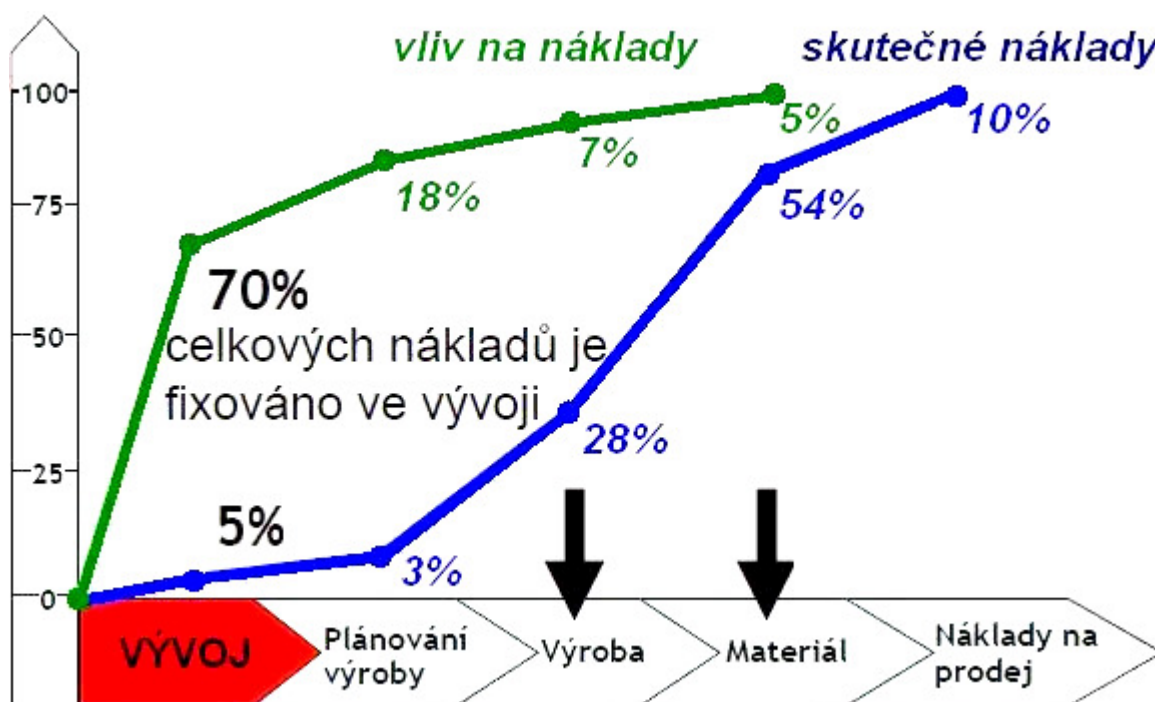
Obrázek 1 - Světová produkce polymerů za období 1950 - 2006 [50]

Nejlepšího výsledku v celosvětové produkci plastů však bylo dosaženo až v roce 2007, kdy jich bylo vyrobeno neuvěřitelných 260 mil. tun. Nicméně další růst produkce byl v následujících letech znemožněn příchodem celosvětové ekonomické krize, která v roce 2009 zapříčinila propad až o 11,5 % vůči výše zmiňovanému rekordu, tj. na 230 mil. tun plastů. [7]

Vlivem tohoto celosvětového průmyslového útlumu samozřejmě dochází k razantnímu nárůstu konkurenční rivality mezi jednotlivými plastikářskými podniky, ve snaze o získání nového zákazníka či udržení si zákazníka stávajícího, to vše s minimem vynaložených nákladů, přičemž pro některé podniky se tento boj stává otázkou samotného přežití. [11]

Požadavky na kvalitu vstřikovaných plastových dílů se za poslední desetiletí dostaly téměř na maximum možností technologického procesu vstřikování. O to je horší fakt, že výsledná kvalita plastových výstřiků závisí na všech faktorech, které se vstřikovacího procesu účastní, tj. na vstřikovaném polymeru, vstřikovací stroji a jeho perifériích, tvaru výstřiku a způsobu jeho zaformování, konstrukci formy a významnou měrou i na technologických parametrech během samotného procesu vstřikování. Optimalizací, tj. korekcí, těchto jednotlivých faktorů je podnik schopen snížit své výrobní náklady, zvýšit zisk a upevnit tak svou pozici na trhu.[12]

Z praxe vyplývá, že ve vývoji může být fixováno až 70 % celkových nákladů na výrobu plastového dílu, přičemž vývojová fáze představuje zhruba jen 5 %, viz obr. 2. To je rozhodně důvod, proč věnovat vývojové fázi a správnému nastavení vstřikovacího procesu velkou pozornost. [13]



Obrázek 2 - Opodstatnění optimalizačních procesů ve výrobním podniku [14]

2. Cíl práce a metodika

Tato kapitola popisuje stanovené cíle a metodiku vypracování této diplomové práce.

2.1 Cíle práce

Jedním ze stanovených cílů této diplomové práce je vytvoření komplexního přehledu dostupných způsobů a možností provádění optimalizací vstřikovacího procesu polymeru a vysvětlení jejich ekonomických opodstatnění. Nicméně k lepšímu pochopení této problematiky je nezbytně nutné nejprve přiblížit alespoň základní informace o polymerech a samotné technologii vstřikování polymerů.

Dalším cílem je navržení a sestavení statisticky navrženého experimentu se změnou vstupních parametrů vstřikovacího procesu ve vybraném podniku, zabývajícího se zpracováním plastických hmot.

Hlavním cílem je vyhodnocení tohoto statisticky navrženého experimentu a určení jednotlivých vlivů vstupních parametrů vstřikovacího procesu na sledované výstupní veličiny finálního výrobku, případně doporučení optimálního nastavení vstřikovacího stroje pro nejefektivnější dosažení těchto výstupních parametrů výrobku.

2.2 Metodika práce

Teoretická část této diplomové práce je zpracována formou literární rešerše různorodých literárních a informačních zdrojů, umožňující získat dostatečné množství vědomostí pro pochopení a splnění části praktické. V první podkapitole jsou nejprve zpracovány obecné informace o polymerních materiálech, jejich základní rozdělení a popis technologie výroby. V následujících podkapitolách jsou přiblíženy základní principy hlavních a speciálních způsobů technologie vstřikování polymerů a také opodstatnění, oblasti a postupy provádění optimalizačních úkonů.

Praktická část diplomové práce nejprve přibližuje charakter vybraného podniku, vstřikovaného materiálu a daného výrobního zařízení. Na základě osvojení si těchto veškerých znalostí a také znalostí získaných dlouhodobým pozorováním optimalizovaného procesu je již možné naplánovat statisticky navržený experiment a vyrobit vzorky.

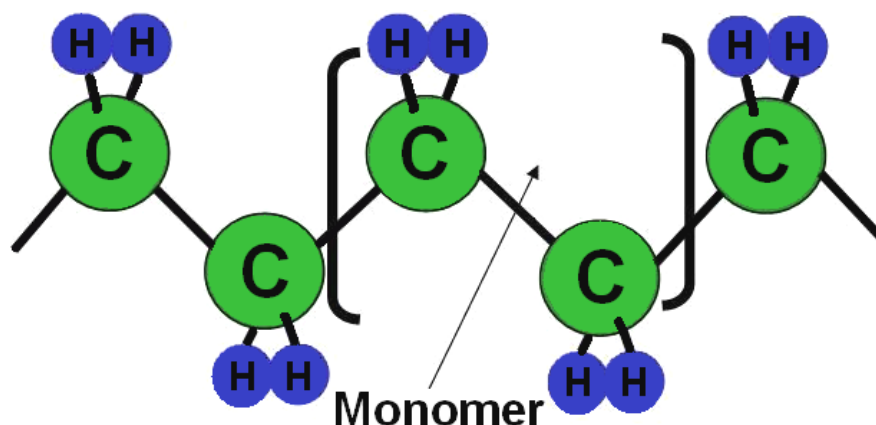
Dalším krokem je pečlivé změření a vyhodnocení těchto vzorků, které je třeba dále zpracovat pomocí statistického softwaru. Poslední fází je objektivní interpretace zjištěných výsledků a poznatků, získaných během experimentu, a případný návrh dalších postupů vedoucích k neustálému zlepšování daného vstřikovacího procesu polymeru.

3. Popis současné problematiky vstřikování polymerů

Tato kapitola obsahuje základní informace o polymerech a jejich rozdělení, principech hlavních a speciálních způsobů technologie vstřikování a o oblastech a možnostech provádění optimalizačních úkonů.

3.1 Obecné informace o polymerech a jejich základní rozdělení

Polymery, jak již z názvu vyplývá (*řecky: polys = mnoho, meros = část*), jsou látky složené z molekul jednoho či více druhů atomů nebo jejich skupin, spojených navzájem do makromolekulární řetězcové struktury, viz obr. 3. [15, 16]



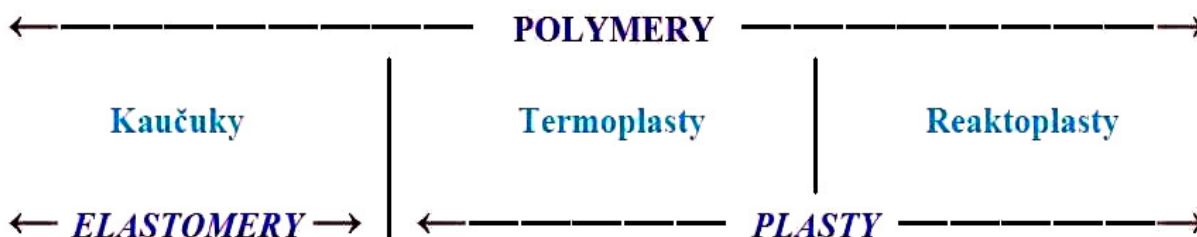
Obrázek 3 - Příklad polymeru (Polyethylen) [17]

Polymery lze rozdělit dle způsobu vzniku na:

- *Přírodní (organické)*
 - jsou založeny na přírodních makromolekulárních látkách,
 - např. polysacharidy, nukleové kyseliny, proteiny, atd.
- *Syntetické (anorganické)*
 - k jejich výrobě je použita chemická reakce,
 - např. polyethylen, polypropylen, polystyren, teflon, atd. [18, 19]

Polymery lze dále kategoricky rozdělit na:

- ▶ *elastomery*,
- ▶ *plasty*, viz obr. 4.

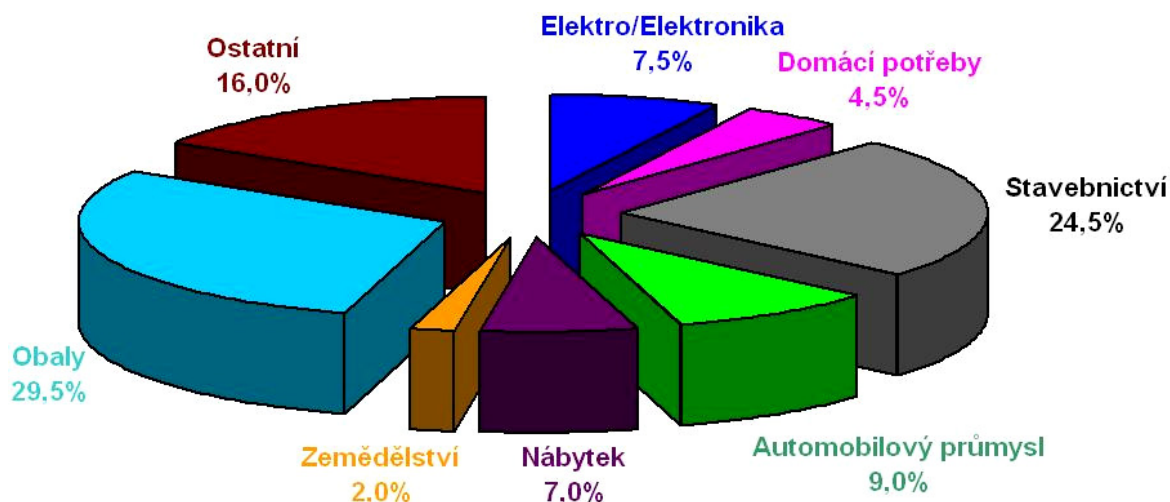


Obrázek 4 - Základní klasifikace polymerů z hlediska jejich vlastností [1]

Elastomery jsou vysoce elastické polymery, které lze velmi snadno deformovat. Hlavním zástupcem elastomerů jsou kaučuky (pryže). [1]

Plasty, známé též pod názvem plastické hmoty, označují řadu syntetických či polosyntetických polymerních materiálů, často s přidavkem dalších látek (aditiv), které zlepšují jejich užité vlastnosti, jako jsou např. houževnatost, pružnost, tvrdost, nízkou měrnou hmotnost, odolnost proti stárnutí a chemikáliím, dobré elektroizolační vlastnosti, jednodušší složení a struktury, dlouhou životnost, tvarovou paměť, dobrou a energeticky málo náročnou zpracovatelnost, propustnost elektromagnetických vln a gama-zářením, atd.

Díky těmto vlastnostem našly plasty uplatnění téměř ve všech průmyslových odvětvích, viz obr. 5. [20, 21, 22]



Obrázek 5 - Světová spotřeba plastů ve vybraných průmyslových odvětvích v roce 2003 [1]

Plastické hmoty se dle způsobu zpracování dělí na:

- **termoplasty**,
jež lze pomocí tepla opakovaně převést do stavu taveniny a opětovně zpracovat různými technologiemi (při zahřívání nedochází ke změnám chemické struktury),
- **reaktoplasty**,
které jsou ve vytvrzeném stavu, charakterizovaném změnou chemické struktury polymeru, již dále nerozpustné a netavitelné. Dalším zahříváním polymeru dojde pouze k rozkladu, tj. degradaci, hmoty. [1, 18]

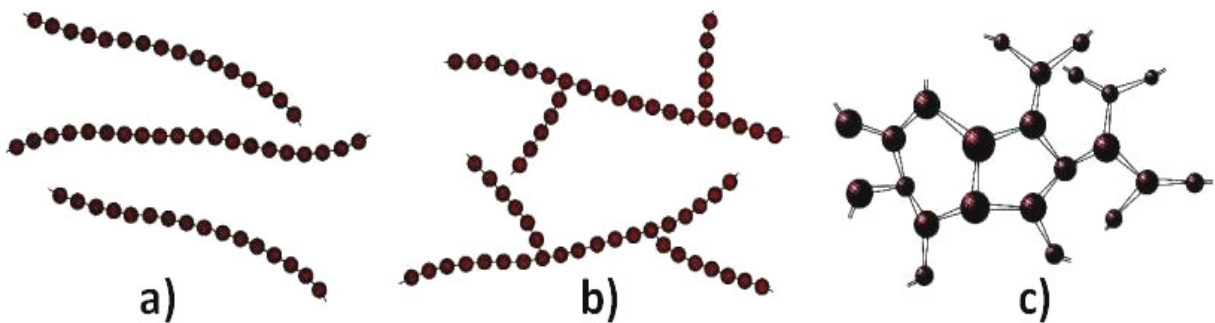
Polymery mohou vznikat třemi základními chemickými reakcemi:

- ▶ **polymerací** – tj. řetězovou chemickou reakcí volného počtu molekul monomeru, při níž vznikají ve velmi krátkém časovém intervalu dlouhé makromolekuly polymeru, tzv. makromolekulární řetězce,
- ▶ **polykondenzací** – tj. reakcí dvou stejných nebo různých monomerů, jež obsahují dvě či více reakčních funkčních skupin, přičemž dochází k postupnému nárůstu molekulové hmotnosti za současného vzniku polymeru a nízkomolekulárního produktu (např. vody),

- ▶ **polyadici** – tj. reakcí sloučenin, jejichž molekuly obsahují násobné vazby či jsou tvořeny kruhy s malým počtem členů, které jsou schopny adičních reakcí se sloučeninami a jejich molekulami vhodných funkčních skupin. Na rozdíl od polymerace vzniká struktura základního článku polymeru odlišná od struktury výchozích látek. [1]

Základní druhy polymerních makromolekul:

- **Lineární makromolekuly** – viz obr. 6/a,
 - jsou typické pro termoplasty,
 - vznikají tak, že se monomerní molekuly řadí vedle sebe,
 - se mohou z prostorových důvodů vzájemně více přiblížit (vyšší hustota),
 - jsou dobře rozpustné a tavitelné (dobrá pohyblivost makromolekul),
 - charakteristické houževnatostí a dobrou zpracovatelností.
- **Rozvětvené makromolekuly** – viz obr. 6/b,
 - jsou typické pro termoplasty,
 - vznikají tak, že se na základní řetězec naváže paralelní,
 - se nemohou z prostorových důvodů příliš přiblížit (nižší hustota),
 - jsou hůře rozpustné a tavitelné (zhoršená pohyblivost makromolekul),
 - rozvětvení způsobuje zhoršení většiny mechanických vlastností.
- **Zesíťované makromolekuly** – viz obr. 6/c,
 - zesíťování dvojrozměrné či trojrozměrné,
 - jsou typické pro reaktoplasty a kaučuky,
 - vznikají zesíťováním přímých a rozvětvených makromolekulárních řetězců,
 - sítě mohou být řídké (kaučukovité polymery) nebo husté (reaktoplasty),
 - zesíťování vede ke ztrátě tavitelnosti a rozpustnosti polymeru,
 - charakteristické vysokou tvrdostí, tuhostí a odolností za zvýšených teplot.



Obrázek 6 - Základní typy struktury polymerů [23]

Polymery můžeme podle použití přísad rozdělit na:

- **neplněné polymery**
 - polymery s takovým množstvím přísad (aditiv), které neovlivňují vlastnosti polymerní matrice,

- **plněné polymery**
 - polymery s takovým množstvím přísad (aditiv), které ovlivňují fyzikální a mechanické vlastnosti polymeru. [1, 18]

Obecné rozdělení přísad (aditiv) polymerů:

- **Plniva** – ovlivňují mechanické a chemické vlastnosti.
- **Stabilizátory** – zpomalují degradační procesy a stárnutí polymeru.
- **Maziva** – snižují viskozitu (usnadňují zpracování polymerů).
- **Barviva** – dávají polymerům požadovaný barevný odstín.
- **Změkčovadla** – zlepšují houževnatost, zpracovatelnost a ohebnost.
- **Iniciátory** – výrazně ovlivňují účinek tvrdidla.
- **Nadouvadla** – po zahřátí vytváří plynné látky uvnitř polymeru.
- **Tvrdidla** – způsobují vznik příčných vazeb mezi makromolekulami.
- **Retardéry hoření** – zpomalují či znemožňují proces hoření polymeru. [18]

3.2 Základní technologie zpracování polymerů

Ke zpracování polymerů se používá řada technologií. Použitelnost jednotlivých způsobů je závislá zejména na technologických vlastnostech zpracovávaného polymeru, tvaru a funkci výrobku. [24]

Technologie zpracování plastů obecně dělíme na:

- ▶ **Tvářecí technologie** – jsou technologie, při kterých se tvar výchozího materiálu mění zásadním způsobem a dochází tak k výraznému přemístování jednotlivých částic materiálu. Tváření probíhá za působení tlaku, zvýšené teploty či obou vlivů současně.
Do této kategorie patří: vstřikování, vypěňování, vytlačování, lisování, válcování, odlévání, apod.
- ▶ **Tvarovací technologie** – jsou technologie, u kterých se vychází z polotovaru výrobku, kdy materiál mění tvar bez velkého přemístování částic. Tvarovací technologie mohou být doprovázeny zvýšenou teplotou či tlakem, ale také nemusí.
Do této kategorie patří: obrábění plastů, tvarování desek, výroba dutých těles, ohýbání, spojování a spékání plastů, apod.
- ▶ **Doplňkové technologie** – jsou technologie, které slouží k úpravě vlastností polymeru před zpracováním, úpravě finálních výrobků a případně také k recyklaci polymerních odpadů.
Do této kategorie patří: sušení, míchání, granulace, předehřev, natírání, čištění, apod. [25]

3.3 Technologie vstřikování polymerů

Vstřikování je způsob tváření polymerů, při kterém je dávka zpracovávaného materiálu v kapalném stavu vstříknuta vysokou rychlostí z tlakové komory do uzavřené tvarové dutiny kovové formy, kde polymer následně ztuhne (termoplasty) či dojde k jeho vytvrzení (reaktoplasty) ve finální výrobek. Tlaková komora, popř. vstřikovací hlavice vysokotlakého systému, je součástí vstřikovacího stroje a zásoba vstřikovaného polymeru se v ní neustále doplňuje.

Technologie vstřikování je nejrozšířenější technologií zpracování polymerů, jedná se o proces diskontinuální, tj. cyklický, kterým lze zpracovávat téměř všechny druhy termoplastů a v omezené míře některé reaktoplasty a kaučuky.

Vstřikováním se vyrábějí takové výrobky, které mají buď charakter finálního výrobku nebo dále slouží jako polotovary pro následné technologické operace. Vyznačují se velmi dobrou rozměrovou i tvarovou přesností a vysokou mírou reprodukovatelností fyzikálních a mechanických vlastností.

Výhody vstřikování polymerů:

- ✓ krátký čas cyklu,
- ✓ schopnost vyrábět tvarově složité součásti,
- ✓ dobré tolerance rozměrů výrobku,
- ✓ dobrá povrchová úprava výrobku,
- ✓ konstrukční flexibilita.

Nevýhody vstřikování polymerů:

- ✗ vysoké investiční náklady,
- ✗ dlouhé doby pro výrobu forem,
- ✗ neúměrně velké strojní zařízení. [26]

3.3.1 Historie a vývoj vstřikování polymerů

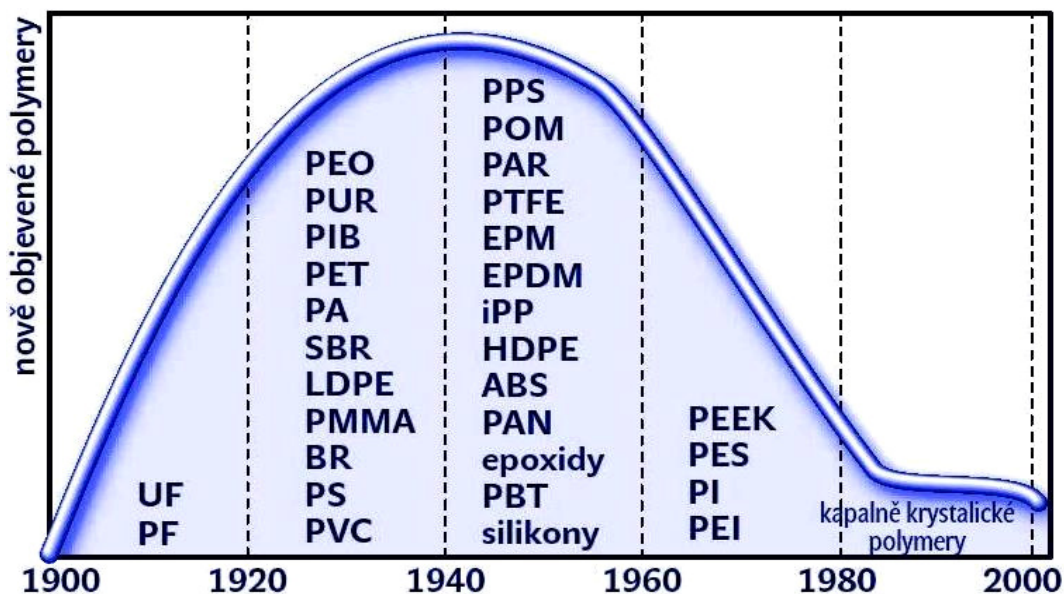
Za počátek historie plastikářského průmyslu lze považovat padesátá léta 19. století, kdy Britský vědec Alexander Parkes vynalezl Parkesin, termoplastický materiál připravený z roztoku nitrocelulózy. Ve speciálním zařízení se za zvýšené teploty a tlaku z tohoto koncentrovaného roztoku odpařila velká část rozpouštědla a vznikla tak pevná, za tepla tvárná hmota. Tento objev však zpočátku nesklidil ve světě velký úspěch, jeho výroba byla nákladná, materiál byl náchylný k praskání a extrémně hořlavý. [27, 28]

O několik let později, roku 1868, Americký vynálezce John Wesley Hyatt pracoval na vylepšení Parkesova objevu a vytvořil tak Celuloid, nitrát celulózy rozpuštěný v alkoholovém roztoku kafry (rok 1870, USA patenty č. 91 341 a 105 338).

John Wesley Hyatt a jeho bratr Isaiah dále postavili jednoduché zařízení, sestávající z parou vytápěného válce s hydraulickým pístem a tryskou, umístěnou kolmo na osu válce a

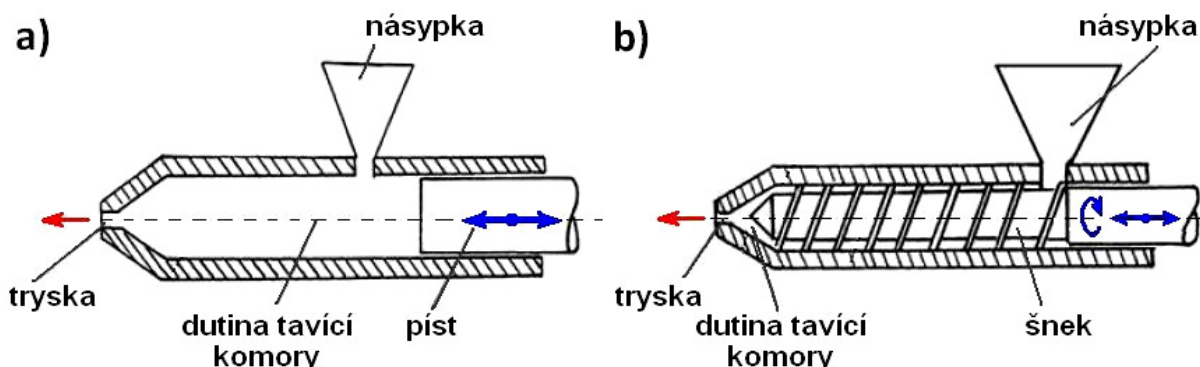
dosedající do dělicí roviny dvoudílné ocelové formy uzavírané druhým hydraulickým válcem. Takto konstruované zařízení bylo oficiálně považováno za první pístový stroj na vstřikování polymerů. (rok 1872, USA patent 133 229 a rok 1878, USA patent 202 441). Princip pístového vstřikovacího stroje je schematicky znázorněn na obr. 8/a. [28, 29]

Další vývoj technologie vstřikování byl úzce spjat s celosvětovým technickým rozvojem a objevováním nových polymerních materiálů, zejména v třicátých až padesátých letech 20. století, tj. v období 2. světové války, kdy byla obrovská poptávka po levných, masově vyráběných produktech, viz obr. 7. [28, 30]



Obrázek 7 - Časové rozložení objevů nových polymerů v průběhu 20. století [30]

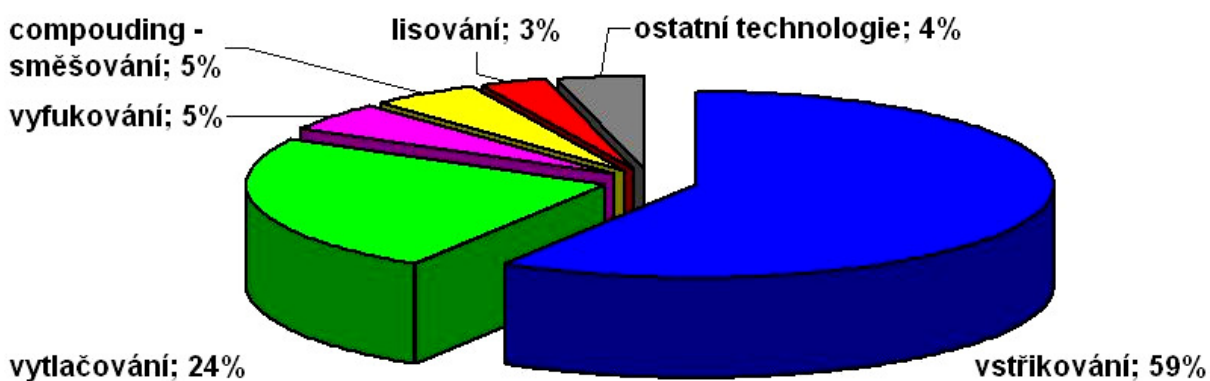
V roce 1946 Americký vynálezce James Watson Hendry postavil první šnekový vstřikovací stroj, který umožňoval mnohem lepší kontrolu nad rychlostí injekce a kvalitou výsledných produktů. Další výhodou tohoto systému vstřikování bylo dokonalé promíchání materiálu s přísadami (aditivy) před samotným vstříknutím do dutiny formy. Princip šnekového vstřikovacího stroje je schematicky znázorněn na obr. 8/b.



Obrázek 8 - Princip vstřikovacích strojů: a) pístové, b) šnekové [31]

S postupem času byly tyto dva základní systémy vstřikování polymeru dále rozvíjeny a modernizovány za účelem zpracování nově objevených polymerů, zlepšení jakosti výrobku či zkrácení výrobních časů (viz kap. 3.3.2.4 – Speciální způsoby vstřikování polymerů). [28]

Důkazem tohoto celosvětového rozvoje může být například fakt, že v České republice koncem roku 2002 zaujímala mezi všemi plastikářskými technologiemi dominantní postavení právě technologie vstřikování (podíl 59 %), následována technologiemi vytlačování (podíl 24 %), compounding – směšování (podíl 5 %), vyfukování (podíl 5 %), lisování (podíl 3 %) a ostatními technologiemi (celkem podíl 4 %), viz obr. 9. [22]



Obrázek 9 - Struktura plastikářského průmyslu ČR v roce 2002 [22]

3.3.2 Hlavní a speciální způsoby vstřikování polymerů

V dnešní době existuje kromě klasických způsobů vstřikování polymerů i mnoho dalších, které se liší např. v parametrech procesu, v konstrukci nástroje a vstřikovacího systému, v použitelnosti pro daný polymer apod.

Principiálně lze tyto technologie rozdělit na:

- ▶ vstřikování termoplastů,
- ▶ vstřikování reaktoplastů,
- ▶ vstřikování elastomerů,
- ▶ speciální způsoby vstřikování polymerů. [32]

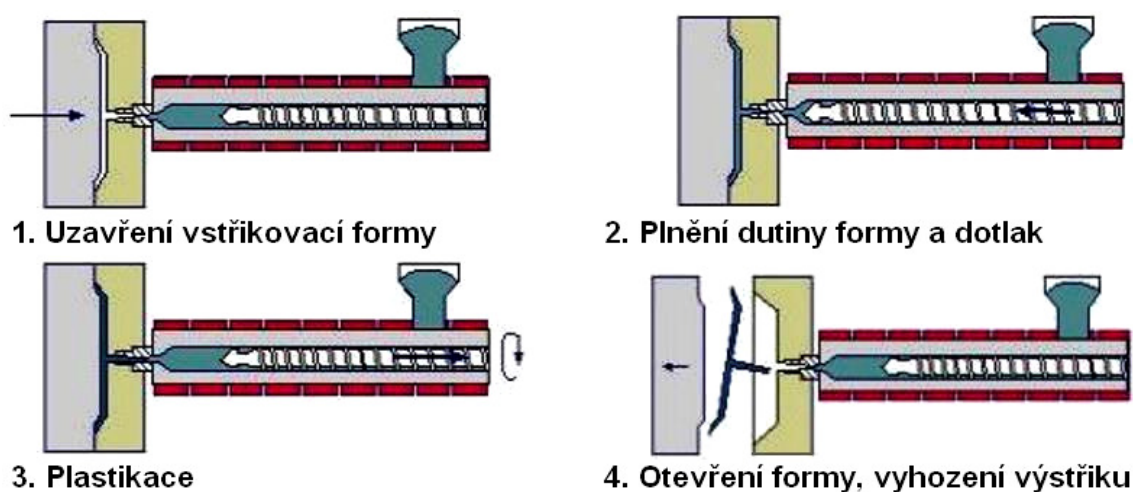
3.3.2.1 Vstřikování termoplastů

Postup vstřikování termoplastů probíhá v několika základních fázích. Na počátku vstřikovacího cyklu je dutina formy prázdná a forma otevřená. Plast v podobě granulí je nasypán do násypky, odkud je odebírán pracovní částí vstřikovacího zařízení, tj. šnekem nebo pístem. Ta hmotu dopravuje do tavicí komory, kde za současného působení účinků tření a přiváděného tepla plast taje a vzniká tavenina (proces plastikace). Forma se pak zavře, uzamkne a tavenina je následně dalším pohybem pracovní části vstřikována do dutiny formy, kterou vlivem zvýšeného tlaku zcela zaplní. Jakmile tavenina vstoupí do dutiny formy, okamžitě začne předávat teplo vstřikovací formě, čímž postupně chladne. Samotný proces chlazení se dělí na dobu chlazení při plném vstřikovacím tlaku a na dobu chlazení při klesajícím tlaku. Během této doby však dochází i k postupnému smršťování materiálu, tj. zmenšování jeho objemu vlivem chladnutí, a na výstřiku se mohou začít vytvářet tvarové

deformace, tzv. propadliny. Tento negativní jev lze z větší míry kompenzovat pomocí tzv. dotlaku, tj. dodatečného dotlačení taveniny do dutiny formy.

Dotlak může být stejně vysoký jako maximální vstřikovací tlak nebo může po krátké chvíli klesnout a další chladnutí probíhá již za sníženého tlaku. Po skončení dotlaku začíná automaticky v pracovní části vstřikovacího zařízení plastikace nově dopraveného materiálu pro následný pracovní cyklus. Ve formě vlivem chladnutí zatím plynule klesá hodnota vnitřního tlaku až na hodnotu zbytkového tlaku, kdy se forma opět otevře, výrobek se vyjme či je vyhozen mechanickým zařízením a celý cyklus se opakuje, schematicky viz obr. 10.

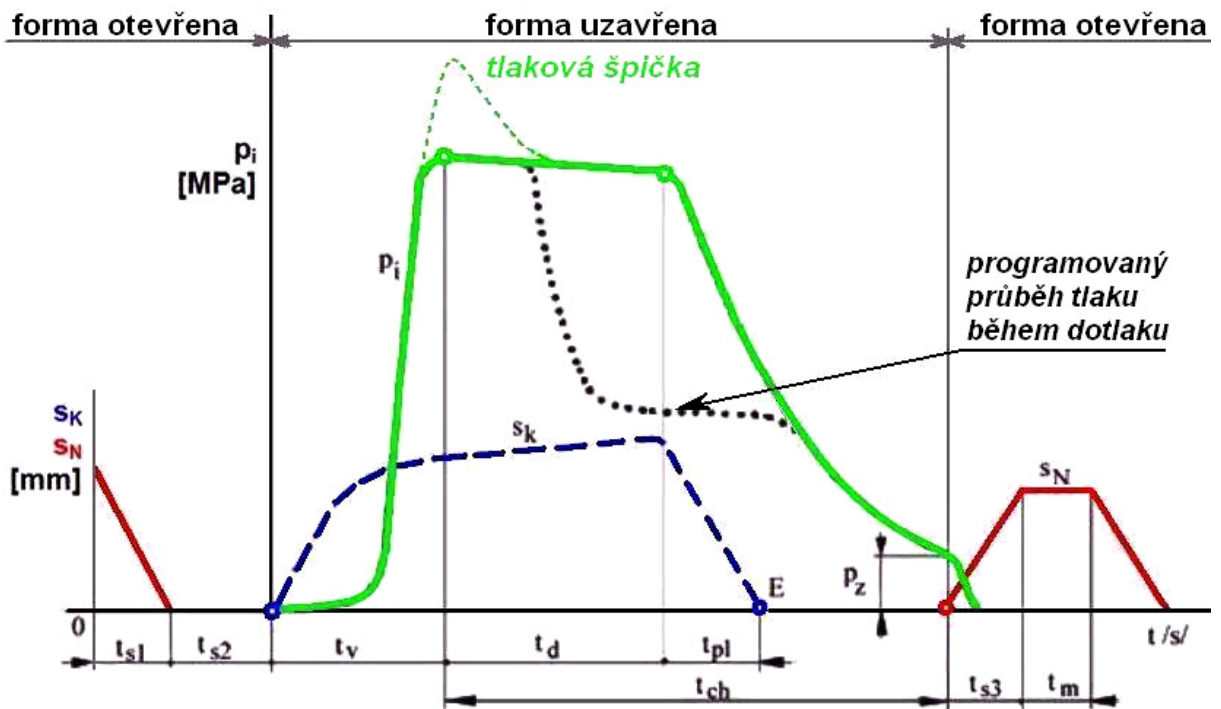
Předčasné vyjmutí výstřiku z formy, tj. při vyšších hodnotách zbytkového tlaku, následně způsobí zvýšení vnitřního tlaku materiálu, které může způsobovat až samovolné praskání výstřiků. [2, 26]



Obrázek 10 - Vstřikovací cyklus termoplastu [26]

Jak již z předchozího textu vyplývá, celý vstřikovací cyklus je tedy možné posuzovat i z pohledu vstřikovaného plastu a vyjádřit jej jako závislost vnitřního tlaku p_i v dutině formy a pohybu jednotlivých pracovních nástrojů na čase, viz obr. 11, kde:

- p_i průběh vnitřního tlaku formy (MPa),
 - p_z hodnota zbytkového tlaku ve formě (MPa),
 - s_k pohyb pracovní části vstřikovacího zařízení (mm),
 - s_n pohyb nástroje (vstřikovací formy) (mm),
 - t_d doba dotlaku materiálu do formy (s),
 - t_{ch} doba chladnutí materiálu ve formě (s),
 - t_m doba potřebná k vyjmutí výstřiku a přípravě formy na další cyklus (s),
 - t_{pl} doba plastikace materiálu ve vstřikovacím zařízení (s),
 - t_{s1} strojní doba na uzavření vstřikovací formy (s),
 - t_{s2} strojní doba činností před zahájením vstřikování (s),
 - t_{s3} strojní doba na otevření vstřikovací formy (s),
 - t_v doba plnění dutiny formy (s).
- Znárodněná tlaková špička je důsledkem opožděného přepnutí na dotlak. [26]



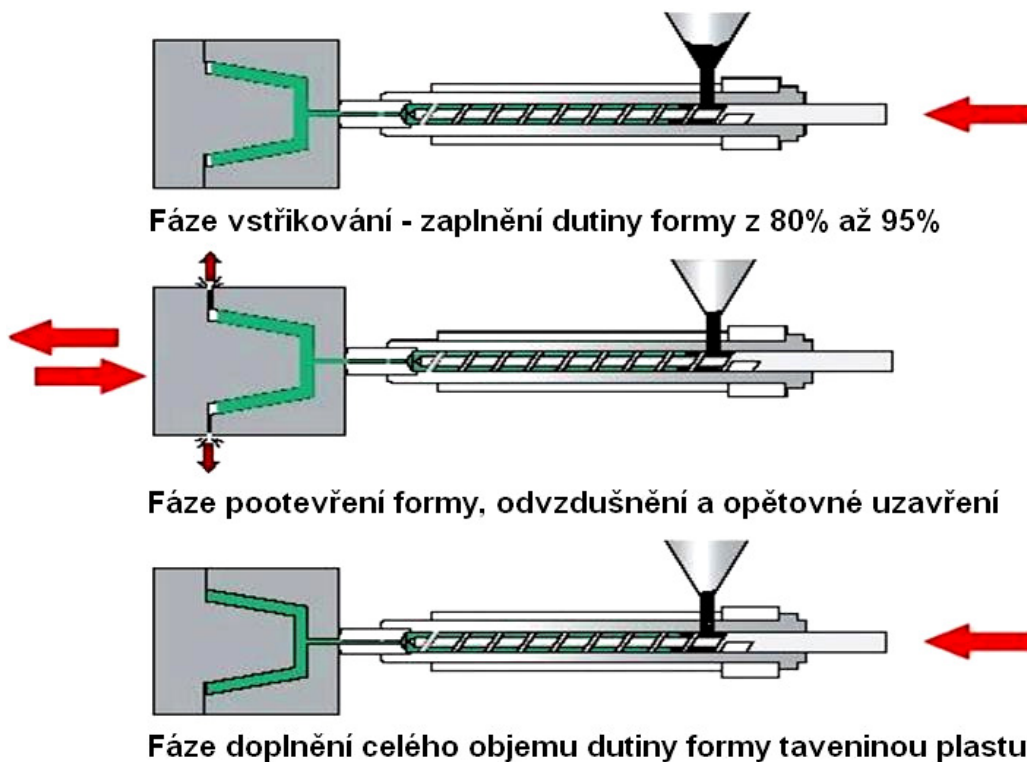
Obrázek 11 - Vstřikovací cyklus – průběh vnitřního tlaku [31]

3.3.2.2 Vstřikování reaktoplastů

Kromě termoplastů se mohou vstřikováním zpracovávat téměř veškeré druhy reaktoplastů, avšak v dnešní době se takto zpracovává pouze asi jedna třetina.

Hlavními odlišnostmi jsou jednak rozdílná závislost viskozity na teplotě a dále fakt, že doba potřebná pro ochlazení termoplastických výstřiků je zde nahrazena dobou potřebnou pro jejich vytvrzení. Forma se tedy nechladí, ale je naopak vyhřívána na vytvrzovací teplotu dle druhu reaktoplastu (obvykle 150 až 190 °C), a doba cyklu je v podstatě dána dobou vytvrzování. Reaktoplasty jsou plastikovány při relativně nízkých teplotách (zhruba 45 až 115 °C). Další odlišností je potlačení kompresní části ve vstřikovacím zařízení, aby nedošlo k přílišnému zahřátí reaktoplastu vlivem zvýšeného namáhání, což by následně vedlo k jeho předčasnému vytvrzení.

Důležitou činností při zpracování reaktoplastů je velmi dobré odvědušnění dutiny formy od plynů, které vznikají při jejich ohřevu a následně způsobují vady výstřiků. Kromě klasických způsobů odvědušnění se používá i metoda pootevírání formy po vstřiku, viz obr. 12, kdy se během fáze vstřikování materiálu o objemu 80 až 95 % objemu dutiny formy umožní mírné pootevření formy (zhruba 0,1 až 0,2 mm), čímž dojde k úniku plynu z dutiny formy, následované jejím opětovným uzavřením a doplněním do plného objemu. [32]



Obrázek 12 - Způsob odplynění formy jejím pootevřením [33]

3.3.2.3 Vstřikování elastomerů

Elastomery, podobně jako termoplasty a reaktoplasty, mohou být také vstřikovány do tvarových forem. Stejně jako reaktoplasty plastikují při relativně nízkých teplotách a jsou obvykle vstřikovány do elektricky vyhřívaných forem, kde vlivem dodávaného tepla dochází k vulkanizaci a k vytvoření zesíťované polymerní struktury. [32]

3.3.2.4 Speciální způsoby vstřikování polymerů

Kromě výše zmíněných technologií vstřikování polymerů existuje ještě celá řada dalších způsobů, které se od těchto základních mohou odlišovat např. konstrukcí nástroje a vstřikovacího zařízení, parametry procesu, kombinací vstřikovaných materiálů, apod.

Příkladem těchto technologií může být:

► RIM – reakční vstřikování

Tento způsob vstřikování spočívá ve vstříknutí kapalné monomerní směsi do uzavřené dutiny formy, kde dojde k jejímu promíchání. Vlivem nastalé chemické reakce směs polymeruje a dále expanduje do dutiny formy za současného uvolňování tepla (exotermická reakce), kde postupně dochází k jejímu plnému vytvrzení. Vstřikovací tlak je velice malý, což klade menší nároky na uzavírací síly, konstrukci formy a vstřikovacího zařízení. Součástí vstřikovací formy je kromě tvarové dutiny i míchací jednotka pro oba vstupní komponenty, plnicí dutina a hlavně velmi dobrý systém odvzdušnění a odvzdušňovacích otvorů. [32]

Hlavním materiálem používaným pro účely reakčního vstřikování je např. polyuretan a jeho různé směsi, polyamid, sloučeniny na bázi epoxidů, apod. Další rozdíly oproti klasickému vstřikování stručně charakterizuje tabulka 1.

<i>Technologie</i>		RIM	Vstřikování
Teplota taveniny	°C	40 až 60	150 až 370
Viskozita plastu	Pa.s	0,1 až 1,0	100 až 100 000
Vstřikovací tlak	MPa	10 až 20	20 až 100
Uzavírací síla	kN	500	300 až 30 000

Tabulka 1 - Rozdíly technologických parametrů RIM a klasického vstřikování [32]

Výhody použití této technologie jsou:

- ✓ nízká viskozita jednotlivých komponent směsi umožňující snížení vstřikovacích tlaků (nižší cena forem),
- ✓ vlastnosti výsledného polymeru lze snadno přizpůsobit požadavkům výroby,
- ✓ díly bez vnitřního pnutí, dodatečných deformací a propadlin,
- ✓ vstřikem směsi v monomerním stavu je zabráněno deformacím polymerních řetězců ve vstřikovacím zařízení.

Nevýhody použití této technologie jsou:

- ✗ v některých případech poměrně dlouhé doby cyklů,
- ✗ občasné potíže s dosažením kvalitního povrchu po aplikaci laků. [32]

► **GIT – vstřikování plastů s podporou plynu**

Jedná se o ekvivalent vstřikování termoplastů, vyvinutý v osmdesátých letech minulého století, s možností vyrábět díly s uzavřenými dutinami vytvořenými pomocí pracovního plynu, obvykle velmi čistého dusíku (min. 99,8 %). Výsledkem jsou výstřiky o zdánlivě velkém průřezu, přičemž odpadá nutnost chlazení velkého množství termoplastické taveniny.

Výhody použití této technologie jsou:

- ✓ snížené uzavírací síly,
- ✓ snížení smrštění a deformací výstřiků,
- ✓ vysoký stupeň tuhosti u výstřiků s žebry,
- ✓ zkrácení délky cyklu vlivem lepšího ochlazení výstřiku až o 50 %,
- ✓ snížení hmotnosti výstřiku až o 50 %,
- ✓ pokles výrobních nákladů o 30 až 50 %.

Nevýhody použití této technologie jsou:

- ✗ vyšší cena vstřikovacího stroje a zařízení,
- ✗ optimalizace tvaru výstřiků pro zajištění kontroly nad pohybem plynu,
- ✗ problematické chlazení v místech kanálů,
- ✗ řízení celého vstřikovacího procesu.[2, 32]

► **WIT – vstřikování plastů s podporou vody**

V dnešní době se kromě technologie vstřikování plastů s podporou plynu začíná prosazovat i technologie vstřikování s podporou vody, která je vstřikována jednou nebo více pumpami do tekuté taveniny plastu za účelem vytvoření dutiny. Teplota vstřikované vody musí být volena s ohledem na zpracovávaný materiál, aby nedocházelo k jejímu odpařování v dutině formy. Čelo vody působí na plastické jádro jako vtláčovaný píst, jehož účinek je navíc podpořen vytvořením tenké plastové membrány způsobené rychlým ochlazením taveniny.

Výhody použití této technologie jsou:

- ✓ výhody technologie WIT jsou srovnatelné s technologií GIT,
- ✓ navíc se vlivem většího chladicího účinku výrazně zkracuje doba potřebná pro ochlazení výstřiků, čímž dojde ke zkrácení celého cyklu až na 10 až 20 % doby cyklu klasické technologie vstřikování,
- ✓ vnitřní stěny výstřiku mají velmi hladký povrch.

Nevýhody použití této technologie jsou:

- ✗ vyšší cena vstřikovacího stroje a zařízení,
- ✗ použitelnost technologie jen u určitých tvarů plastových dílů,
- ✗ řízení celého vstřikovacího procesu. [2,32]

► **Vícekomponentní nebo vícebarevné vstřikování**

Technologie vícekomponentního a vícebarevného vstřikování umožňují na jednom vstřikovaném dílu kombinovat buď dva či více materiálů, nebo dvě či více barev od jednoho druhu plastu. V případě nedostatečné vzájemné adheze vstřikovaných materiálů je zapotřebí provést úpravu geometrie dílů tak, aby došlo k vzájemnému zastříknutí spojovaných částí.

► **Intervalové vstřikování**

Je zvláštním případem vícebarevného vstřikování, které je založeno na míchání dvou barevných odstínů ve speciální míchací trysce ještě před samotným vstřikem do tvarové dutiny formy. Na rozdíl od dvoukomponentního vstřikování jsou vstřikovací jednotky spárovány dohromady pomocí speciální intervalové jednotky, která řídí činnost trysek jednotlivých komponent.

► **Mramorové vstřikování**

Tato technologie patří do skupiny zpracování vícekomponentních či vícebarevných polymerů. Namísto klasické šnekové plastikace je zde použit speciální hnětací člen, který má částečně tvar šneku a částečně tvar pístu. Plastikace je dosaženo postupným posouváním materiálu směrem vpřed v tavicí komoře bez intenzivního promíchávání, čímž je zabráněno plné homogenizaci směsi. Výsledkem jsou náhodné barevné variace finálního výrobku. [32]

► Vstřikování vlákný plněných termoplastů

V současné době se na trhu začínají prosazovat plasty plněné dlouhými vlákny (10 až 12 mm), které výrazně zvyšují tuhost, rázovou houževnatost a rozměrovou stabilitu vyráběných dílů a výrobků, které nachází rozsáhlé uplatnění zejména v automobilovém průmyslu, viz obr. 13.



Obrázek 13 - Příklad použití dílců z vyztužených termoplastů v automobilu [32]

► Vstřikování sendvičů

Sendvičové vstřikování získalo název podle struktury vyráběných dílů, kdy je vnější slupka tvořena jedním materiálem a jádro dílu materiálem druhým. Velký počet dnes realizovaných aplikací je založen na kombinaci technických vlastností rozdílných plastů. Příkladem může být výrobek, jehož jádro obsahuje výztužná vlákna pro zlepšení mechanických vlastností, přičemž jeho povrch bude tvořen kvalitním, na dotyk příjemným plastem. Podobně se tedy nabízí i možnost snížení výrobních nákladů využitím recyklátu v jádrech některých plastových dílů.

► PIM - Vstřikování polymerů s prášky

Této technologii se využívá k výrobě přesných dílů s výbornou kvalitou povrchu zejména pro automobilový a strojírenský průmysl. Polymer se zde používá pouze jako nosné pojivo základního materiálu, tj. prášku kovu, porcelánu, karbidů křemíku apod., v prvních fázích vstřikovacího procesu.

► Vstřikování taveninou o vysokém tlaku

Tento proces vstřikování je založený na vstřikování taveniny pod vysokým tlakem (v rozsahu 100 až 250 MPa) do uzavřené dutiny formy. Oproti klasickému způsobu vstřikování je v tomto případě vstřikovací jednotka navíc vybavena pneumaticky, případně hydraulicky ovládanou jehlovou tryskou, která zamezí úniku taveniny při její kompresi doprovázené zmenšením jejího objemu. Okamžitě po otevření trysky začne tavenina pod tlakem proudit do dutiny formy. Působením relaxace taveniny a dotlaku následně dochází k výrazné redukci smrštění finálního výrobku. [32]

► **Nízkotlaké vstřikování**

Je alternativou vysokotlakého vstřikování s tím, že nízký tlak je jak na straně vstřiku, tak i na straně uzavírací jednotky. Výhodou je snížení velikosti stroje, nižší vnitřní pnutí ve výrobku a nízká cena nástroje. Mezi nevýhody patří zejména delší vstřikovací cyklus.

► **Střídavé, cyklické, vstřikování**

Tato technologie je založena na kontrolovaném tečení taveniny v dutině vstřikovací formy během fáze plnění a dotlaku. Po přípravě taveniny ve vstřikovací jednotce dochází k jejímu rozdělení do dvou proudů. Vše je řízeno programem v jednotlivých sekvencích, tzn. pokud jeden píst vstřikuje, druhý dotlačuje a naopak, či v poslední fázi provádí dotlak oba písty najednou. Výsledkem je zvýšení pevnosti u vyztužených plastů, snížení počtu vad výrobku, vnitřních pnutí a minimalizace efektu studených spojů. [32]

► **CIM - vstřikování s dolisováním, kompresní vstřikování**

Je technologie vstřikování, u které je tavenina vstřikována do dutiny pootevřené vstřikovací formy, kde je materiál následně dotvarován a dolisován pomocí programově řízené uzavírací síly. Uzavírací systém v tomto případě přejímá funkci dotlaku. Výsledkem je produkt s velmi vysokou rozměrovou přesností, s minimálními hodnotami smrštění, deformací a vnitřních pnutí.

► **Technologie zastříkávání, hybridní technologie**

Principem této technologie je nastříkávání polymeru na předtvarovaný nepolymerní materiál, např. textilií či jakýkoliv kov, vložený do dělicí roviny vstřikovací formy za účelem vytvoření výrobku s lepšími užitnými vlastnostmi. Zároveň dochází k úspoře hmotnosti polymeru, zvýšení pevnosti, korozní odolnosti, případně zlepšení vzhledu apod.

► **Vstřikování strukturních pěn**

Tato technologie slouží k výrobě dílů s napěněným (lehčeným) jádrem a kompaktní povrchovou vrstvou. Plasty pro výrobu strukturních pěn jsou nadouvány přídatkem 0,7 až 3,0 % chemického nadouvadla nebo fyzikálně přídatkem uhlovodíků. [32]

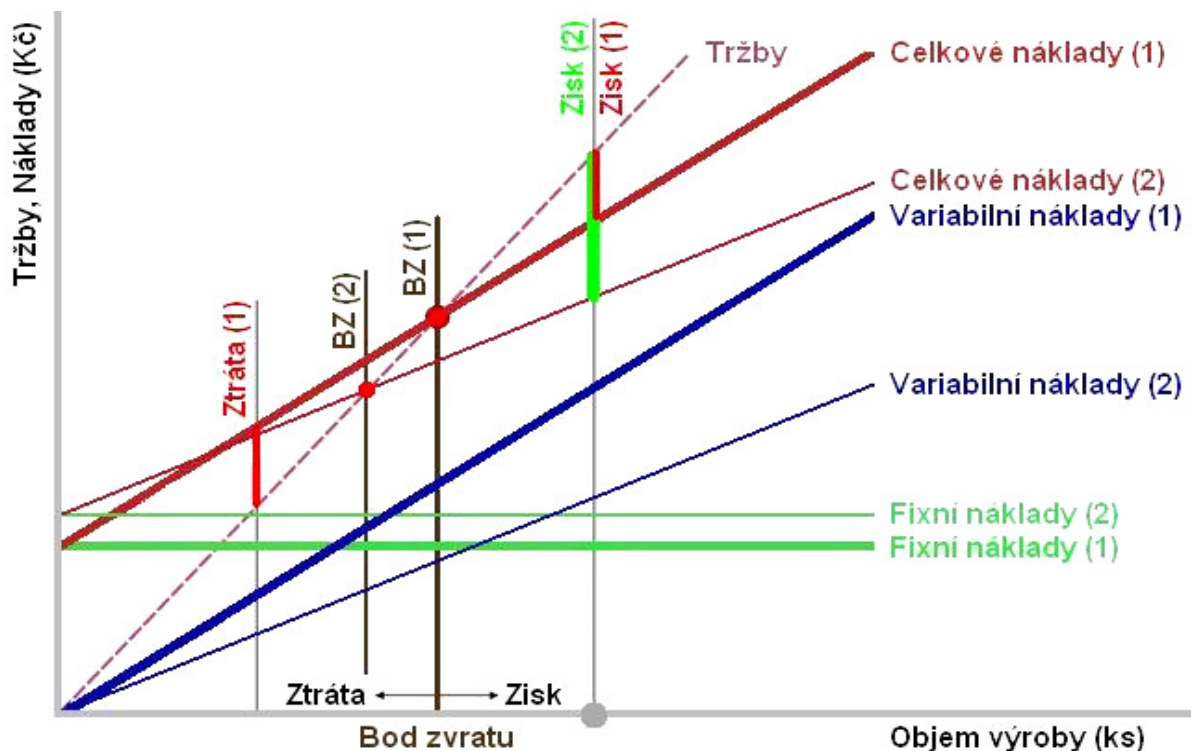
3.4 Princip a oblasti optimalizací vstřikovacího procesu

Jak již bylo zmíněno v úvodní kapitole, optimalizací vstřikovacího procesu je podnik schopen vlivem úspory výrobních nákladů zvýšit svůj zisk a konkurenceschopnost.

Princip tohoto ekonomického efektu je graficky znázorněn na obr. 14, kde položky označené indexem „1“ charakterizují ekonomickou situaci před optimalizací a indexem „2“ po optimalizaci výrobního procesu. Je patrné, že vlivem důkladnějšího zkoumání a provádění analýz ve fázi vývoje nepatrně vzrostou fixní náklady, avšak díky tomuto lépe propracovanému technickému návrhu a nastavení celého vstřikovacího procesu dochází ve výsledku ke zmírnění růstu variabilních nákladů a samozřejmě tedy i ke zvýšení zisku podniku. [34]

Mezi hlavní faktory ovlivňující směrnicí růstu variabilních nákladů patří:

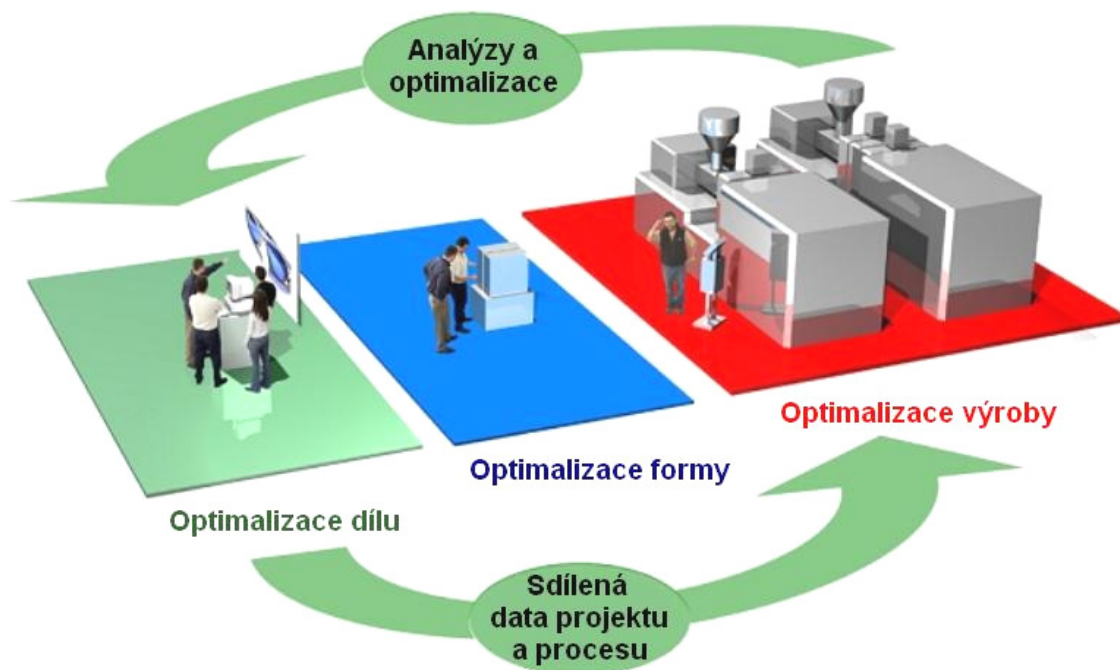
- množství spotřebovávaného materiálu na jeden vyrobený kus,
- cena spotřebovávaného materiálu,
- délka vstřikovacího cyklu,
- zmetkovitost a vady vyráběných dílů. [13]



Obrázek 14 - Grafické znázornění zvýšení zisku podniku vlivem optimalizace výrobního procesu; (1) – před optimalizací, (2) – po optimalizaci [35]

Optimalizace můžeme rozdělit dle fáze vývoje do těchto tří základních oblastí:

- optimalizace dílu,
- optimalizace vstřikovací formy,
- optimalizace výroby a vstřikovacích parametrů, viz obr. 15. [34]



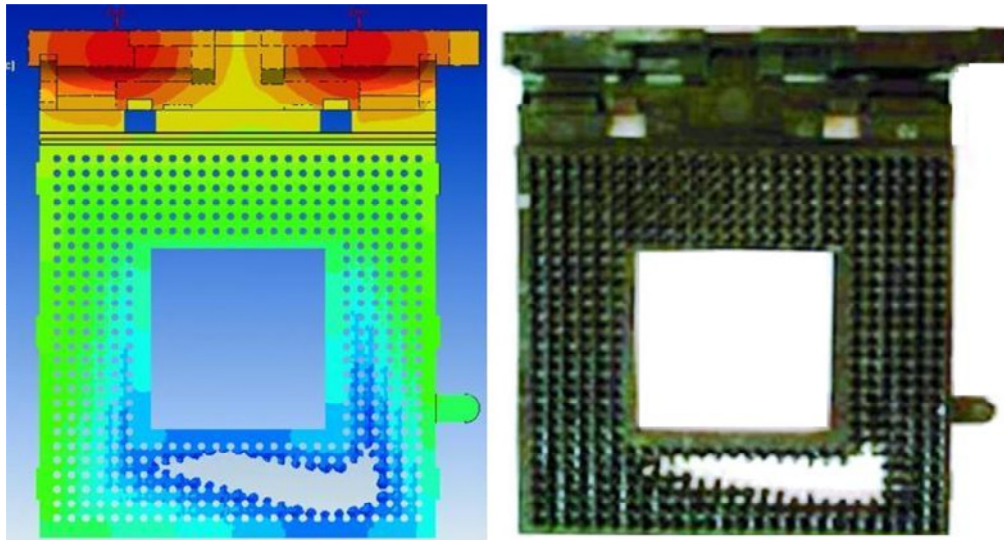
Obrázek 15 - Tým realizující vývoj a přípravu výroby plastového dílu [34]

3.4.1 Optimalizace při vývoji výrobku

V dnešní době, kdy jsou kladeny stále vyšší nároky na jakost, striktní dodržování termínů a ceny vstřikovacích forem, je třeba již ve fázi designu dílu nebo nejpozději ve fázi konstrukce formy pečlivě prověřit, zda v sobě daný díl neskrývá problémy pro zpracovatelskou technologii vstřikování polymerů. Dále je třeba brát v úvahu fakt, že designéři vyráběných dílů často nemají znalosti technologie vstřikování ani charakteru a vlastností plastových materiálů a mnohdy ani netuší, jaké komplikace způsobují navrženým komplexním a v některých případech zbytečně složitým designem dílu konstruktérům forem a technologům.

Tečení taveniny v dutině formy je velmi komplikovaný proces a u tvarově složitých dílů s proměnlivými tloušťkami stěn lze jen s těžší odhadnout, zda bude dutina formy správně doplněna a kde mohou vznikat případné vady dílu. Daleko dříve, než nastane tato situace, lze předcházet mnoha problémům vypracováním několika simulačních analýz v profesionálních softwarech a jejich výsledky konzultovat s designérem dílu ve snaze o nalezení možných kompromisů tvarovou modifikací dílu.

Dnešní simulační softwary umožňují spolehlivě predikovat průběh plnění dutiny formy, přehřívání materiálu při toku vtokovou soustavou a dutinou formy, optimalizovat pozice a dimenze vtoků, odhalit místa studených spojů a uzavírání vzduchu (viz obr. 16), vyhodnotit průběh chlazení dílu v dutině formy, minimalizovat pracovní cyklus, správně určit výsledné deformace apod. [34, 36]

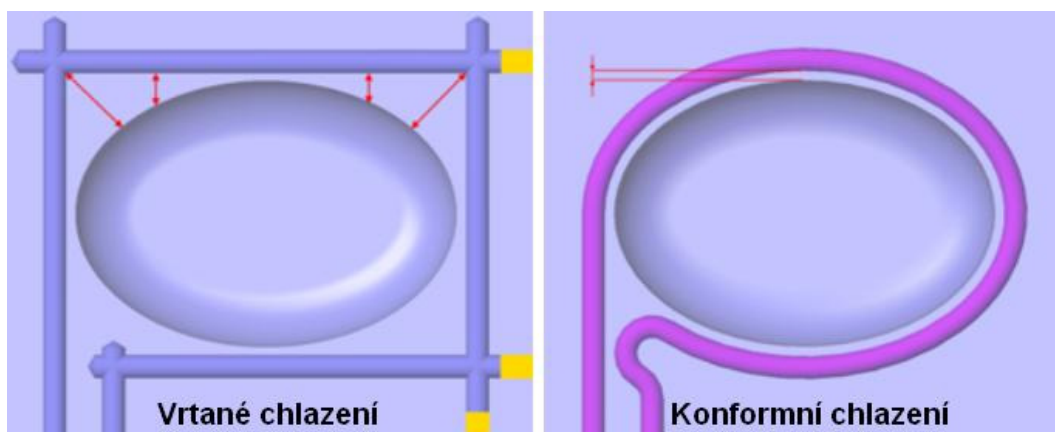


Obrázek 16 - Predikce uzavírání vzduchu pomocí simulačního software (vlevo) a porovnání s reálným výliskem (vpravo) [37]

3.4.2 Optimalizace konstrukce vstřikovací formy

Z předchozí kapitoly je patrné, že optimalizace konstrukce vstřikovací formy úzce korespondují se simulačními analýzami vstřikovaného dílu. V širším měřítku lze tedy brát v úvahu tyto následující vlivy: zvolený materiál vstřikovací formy, případná povrchová úprava dutiny formy, vtokový systém, odvzdušňovací systém, vyhazovací systém a samozřejmě i chladicí systém. [12]

Optimalizací chladicího systému vstřikovací formy, tj. kvalitnějším návrhem tvaru a polohy chladicích kanálků, je možné dosáhnout efektivnějšího sdílení tepla mezi dutinou formy a chladicím médiem, čímž se docílí rovnoměrnějšího rozložení teplot v dutině formy, snížení pnutí a deformací dílu a výrazného zkrácení délky vstřikovacího cyklu až o 50 %. Příkladem takto provedené optimalizace je tzv. konformní chlazení vyrobené metodou Direct Metal Laser Sintering, viz obr. 17, které v co nejkratší možné vzdálenosti od stěny výlisku kopíruje jeho povrch a zároveň výrazně zlepšuje průtok chladicího média díky plynulému zakřivení chladicích kanálků. [34, 38]



Obrázek 17 - Varianty provedení chladicího okruhu vstřikovací formy [38]

3.4.3 Optimalizace vstřikovacích parametrů – DoE

K řešení optimalizací vstřikovacích parametrů můžeme přistupovat podobně jako v předchozích případech, tj. použít specializovaný simulační software pro vstřikování polymerních materiálů, nebo provést optimalizaci pomocí statisticky navrženého experimentu, označovaného též jako DoE (Design of Experiments).

Statisticky navržený experiment je účelnou a zároveň úspornou metodou hledání lepších řešení při každodenním řízení procesů. Podniky, které využívají metody DoE, dosahují běžně až 50 % úspory nákladů a času oproti těm, které využívají jiné strategie testování a optimalizací definovaných procesů. Hlavní podmínkou použitelnosti metody DoE je stabilita a zajištění opakovatelnosti optimalizovaného procesu. [39, 40]

3.4.3.1 Historie a rozvoj DoE

Základní kámen metody DoE položil počátkem 20. století anglický matematik Sir Ronald Aylmer Fisher formulováním teoretických základů analýzy rozptylu (ANOVA), které mimo jiné popsal ve své knize „The Design of Experiments“, vydané roku 1935. [40, 42]

O další rozvoj myšlenky statisticky navrženého experimentu se v následujících desetiletích zasloužili zejména anglický statistik George E. P. Box, jehož knihy dodnes poskytují nejsrozumitelnější úvod do experimentování, a americký statistik Douglas Montgomery, o jehož učebnici „Design of Experiments“ se dodnes opírají nejen praktici, ale i tvůrci statistických softwarů.

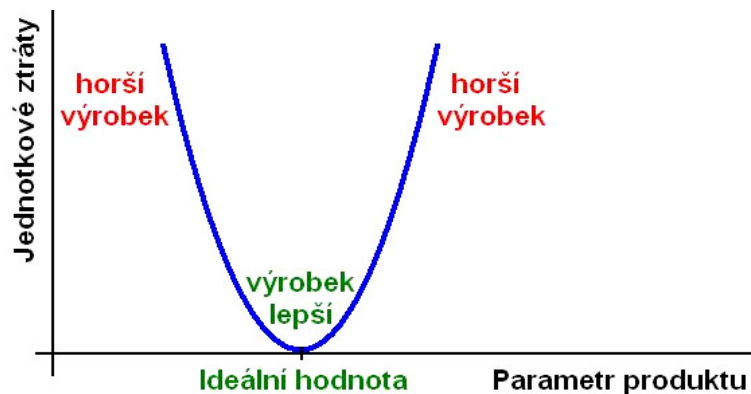
K největšímu rozmachu statisticky navržených experimentů došlo však až v osmdesátých letech 20. století, a to zejména díky prvním komerčně dostupným statistickým softwarům, za pomoci kterých bylo možné vyhodnocovat i komplikované procesy. Ve stejném období přichází i japonský inženýr Genichi Taguchi se svým robustním návrhem provádění experimentů, který vzápětí přitahuje pozornost nově vznikající manažerské iniciativy Six Sigma.

V dnešní době se statisticky navržený experiment stává běžnou součástí školení na stupeň Black Belt a jeho aplikace je oprávněně považována za indikátor vyspělosti podniku, zejména po překonání počáteční nedůvěry a negativních skepsí. [40, 41, 42]

3.4.3.2 Princip a postup DoE

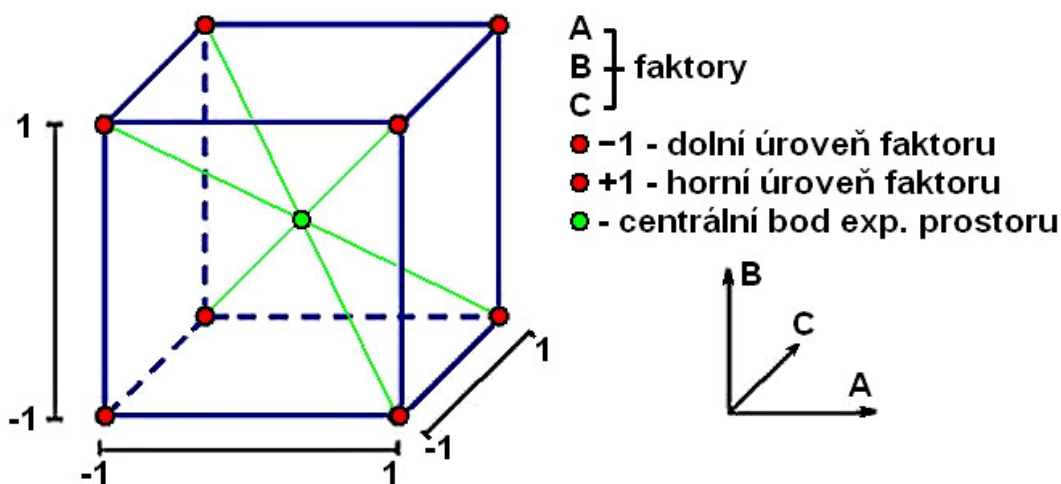
Na proces nebo produkt, který chceme optimalizovat, obecně působí celá řada vlivů, avšak pouze některé z nich dokážeme řídit. Tyto vlivy jsou označovány jako faktory.

Výstup procesu, obecně označovaný jako produkt, by měl teoreticky splňovat veškeré požadavky zákazníka, tj. předem definované měřitelné výstupní veličiny, které jsou v rámci procesu označovány jako odezvy. Úkolem DoE je najít takovou kombinaci vstupních faktorů, aby hodnota odezvy (nebo několika odezev) byla co nejpříznivější, tzn. v místě nejnižších jednotkových ztrát, viz obr. 18.



Obrázek 18 - Taguchiho ztrátová funkce [3]

K tomuto účelu je zapotřebí, aby experimentátor zkoumal odezvu hned v několika bodech experimentálního prostoru, viz obr. 19. [3, 40]



Obrázek 19 - Hledání v experimentálním prostoru [40]

DoE není jen vlastním návrhem experimentu, ale je to souhrnné označení řady činností, které můžeme chronologicky rozdělit do pěti základních etap:

1. *plánování (příprava) experimentu,*
2. *vlastní návrh experimentu,*
3. *provedení experimentu,*
4. *analýza výsledků,*
5. *zhodnocení a aplikace výsledků.* [3]

■ Prvním experimentem bývá zpravidla tzv. screening, čili zmapování procesu. Zejména u složitých procesů nebo výrobků je zpravidla na začátku zjištěn velký soubor vstupních proměnných, u nichž tušíme souvislost s výsledkem, tj. odezvou, procesu. Úkolem screeningu je tedy co nejefektivnějším způsobem tyto vstupní proměnné roztrždit a najít mezi nimi jen těch několik, jejichž vliv na kvalitu výstupu je skutečně významný.

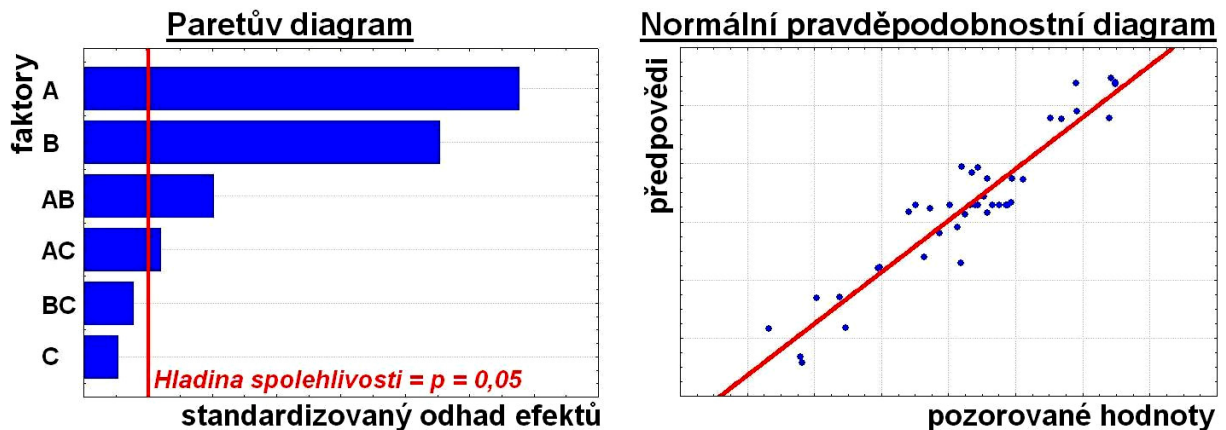
Cenou, kterou za to však musíme zaplatit, je nižší rozlišení návrhu, tzn. že některé vypočtené efekty nebude jednoduché přímo přiřadit jednotlivým faktorům či jejich interakcím. K tomu nám však poslouží především tyto dva grafy:

► **Paretův diagram,**

kde hodnota „p“, tj. ukazatel statistické významnosti vypočtených efektů, jenž určuje hranici pravděpodobnosti, při které se pozorovaný efekt vyskytuje v procesu pouze náhodou, viz obr. 30.

► **Normální pravděpodobnostní diagram,**

kde lze hodnoty zjištěných efektů v daném pravděpodobnostním diagramu proložit přímkou, přičemž body ležící na této přímce patří šumu a ty, které leží mimo, hledaným statisticky významným faktorům, viz obr. 20. [3]



Obrázek 20 - Paretův diagram (vlevo) a Normální pravděpodobnostní diagram (vpravo) [3]

Pro posouzení a ohodnocení statistické významnosti vypočtených efektů jednotlivých faktorů a jejich interakcí slouží následující tři principy:

1. **Hierarchický princip**

— Efekty (interakcí) nižších řádů hrají větší úlohu než efekty řádu vyšších. Efekty shodných řádů bývají stejně důležité.

2. **Princip úspornosti**

— Počet důležitých efektů ve faktoriálním experimentu bývá relativně malý.

3. **Princip dědičnosti**

— Aby mohl být významný efekt interakce, musí být významný alespoň jeden z jeho faktorů.

Pro minimalizaci nepříznivých vlivů a šumu existuje několik základních prostředků, přičemž mezi nejdůležitější patří:

► **znáhodnění experimentu,**

kdy je pořadí jednotlivých kroků experimentu stanoveno náhodným losem či generátorem náhodných čísel v počítači,

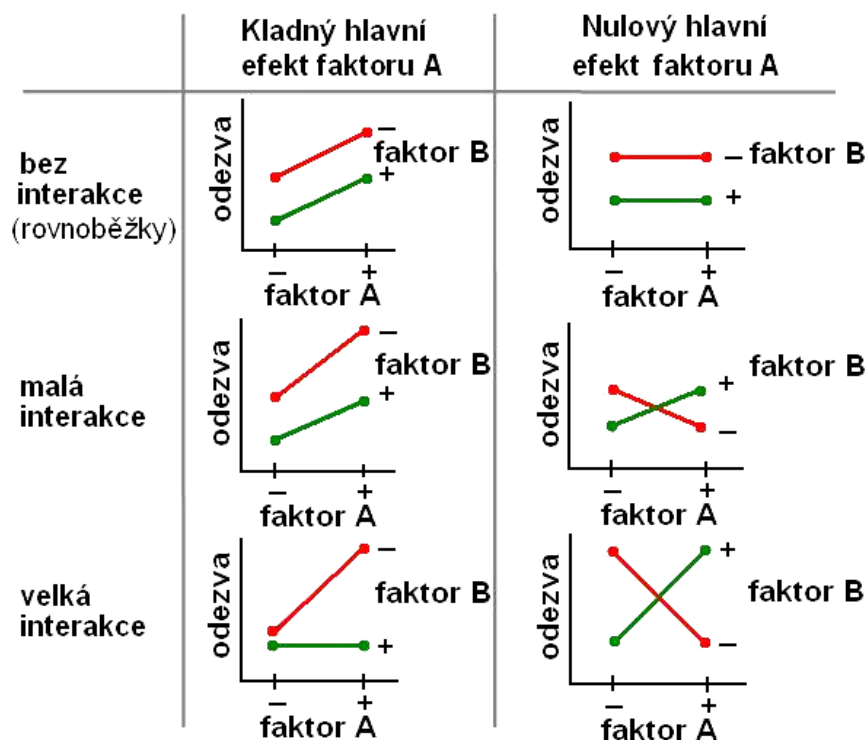
► **zahrnutí centrálních bodů do experimentu,**

které, jak již sám název napovídá, leží uprostřed experimentálního prostoru. Často se centrální body přidávají dva nebo tři – jeden na začátku, druhý uprostřed a třetí na konci experimentu, což umožní ověřit stabilitu procesu během provádění celého experimentu. [3]

■ Zadání dalšího experimentu již vychází z nabyté znalosti procesu nebo výrobku a je proto mnohem preciznější. Volí se zpravidla experiment o vyšším stupni rozlišení, který umožňuje blíže zkoumat i vzájemné interakce jednotlivých vstupních proměnných, viz obr. 21. Výsledkem je sestavení modelu procesu, který má podobu rovnice ve tvaru:

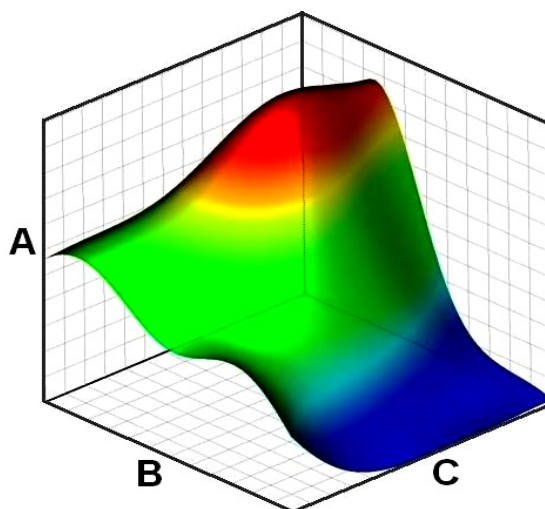
$$y = \text{konstanta} + a \cdot x_1 + b \cdot x_2 + c \cdot x_3 + \dots + u \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \dots ,$$

kde: y = odezva; a, b, c = regresní koeficienty; x_1, x_2, x_3 = hodnoty faktorů. [3]



Obrázek 21 - Interpretace grafů interakcí [43]

■ Posledním stupněm experimentu je pak použití analýzy odezvových ploch, viz obr. 22, která s velkou precizností umožňuje najít optimální nastavení vstupních parametrů i hledat takové kombinace říditelných faktorů, při nichž je proces nejodolnější vůči ostatním vlivům. Takové nastavení pak nazýváme robustní. [3, 40]



Obrázek 22 - Příklad odezvové plochy DoE (A, B, C – vstupní faktory) [44]

4. Optimalizace vstupních parametrů vstřikovacího procesu polymeru

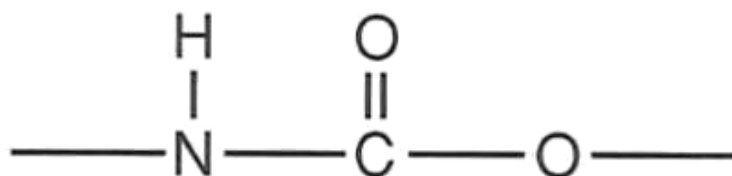
Na základě schválené žádosti z roku 2009 mi bylo umožněno provést statisticky navržený experiment ve firmě TRW Volant a.s., za účelem optimalizace vstupních parametrů vstřikovacího procesu polyuretanu.

Firma TRW Volant a.s., sídlem Praha 9 – Horní Počernice, je organizačně začleněna do divize TRW Occupant Safety Systems Europe, která se zabývá vývojem, výrobou a prodejem volantů, airbagů a bezpečnostních pásů pro přední světové automobilky. Spolu s německým závodem TRW Aschaffenburg a novým rumunským závodem TRW Timisoara, tvoří TRW Volant a.s. trojici závodů zaměřených na výrobu volantů v rámci divize TRW OSS, skupina SWS (Steering Wheel Systems).

Volant, spolu s dnes již samozřejmým airbagem, je nejen kritickým dílem ovlivňujícím bezpečnost automobilu, ale i významným pohledovým prvkem v centru pozornosti každého řidiče. Proto je ve firmě TRW Volant a.s. kladen důraz na vysokou kvalitu výsledného produktu nejen po stránce funkční, ale i estetické. [45]

4.1 Vstřikovaný materiál – Polyuretan

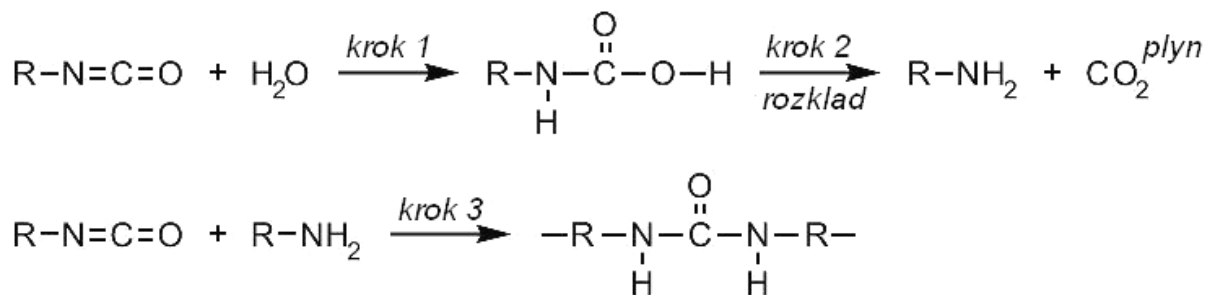
Polyuretan (zkráceně PUR) je polymer, který se vyrábí polyadicí diizokyanátu a dvojnásobně nebo vícenásobně alkoholů za vzniku uretanové (karbamátové) vazby, viz obr. 23. Tato polyadiční reakce byla objevena roku 1937 Otto Bayerem, chemikem tehdejší IG Farbenindustrie v Leverkusenu, a později byla dále vylepšena pro plně komerční využití. [4, 46]



Obrázek 23 - Strukturní vzorec uretanové skupiny [4]

Klíčovými vstupními komponenty polyuretanu jsou izokyanáty, které jsou charakterizovány prostřednictvím svého procentuálního obsahu NCO- skupin v jedné molekule látky. [4]

Izokyanáty velmi snadno reagují se všemi sloučeninami, které obsahují aktivní vodík, což je např. voda, alkoholy, aminy, fenoly, karboxylové kyseliny aj. Hlavní růstová reakce je obvykle doprovázena řadou vedlejších reakcí, z nichž některé se cíleně využívají při výrobě určitých typů polyuretanů, např. při výrobě pěnového polyuretanu je důležité uvolňování oxidu uhličitého (CO₂), který při reakci izokyanátové skupiny s vodou působí jako nadouvadlo, viz obr. 24. [4, 46]

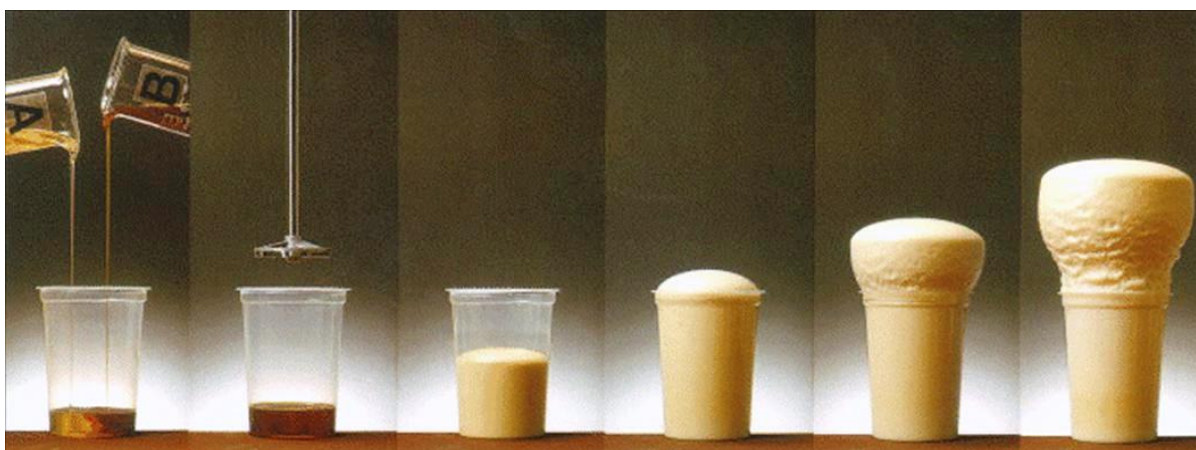


Obrázek 24 - Chemický vzorec reakce izokyanátu s vodou [47]

Hlavními reakčními partnery izokyanátů jsou polyhydroxylové sloučeniny, též nazývané jako polyoly, charakterizované hydroxylovým číslem (OH- číslo, v mg KOH.g⁻¹). Dvě hlavní třídy polyolů jsou polyesteroly a polyetheroly, přičemž 80 až 90 % dnes používaných polyolů jsou právě polyetheroly. Struktura polyolu, a tím i zpracovatelský profil a soubor vlastností polyuretanového výrobku, může být řízen v širokých hranicích volbou délek a složení polyetherolových řetězců, právě tak jako funkcností startovacích molekul.

Jak již z předchozího textu vyplývá, izokyanát a polyol tvoří, co do množství, převážnou část polyuretanového výrobku. Následně popisované pomocné a přídatné látky se používají podle typu výrobku a jeho požadovaných vlastností. [4]

- **Katalyzátory** – jsou všeobecně nezastupitelnou součástí každé PUR receptury, které umožňují např. urychlení polyadiční reakce, prodloužení a kvalitnější zesíťování řetězců či řízení různých současně probíhajících reakcí.
- **Nadouvadla** – slouží k výrobě pěnového polyuretanu. Jednotlivé fáze procesu pění polyuretanu určují tři charakteristické časy od začátku míchání, viz obr. 25:
 - startovací čas – tzn. nástup zvětšování objemu,
 - čas náběhu – tzn. konec procesu nadouvání,
 - čas nelepivosti – tzn. povrch pěny již nelepí.



Obrázek 25 - Fotografické znázornění procesu pění polyuretanu [4]

Pro tvorbu plynu jsou v podstatě k dispozici dva různé druhy nadouvadel:

- **chemická** – vznikají v průběhu polyadiční reakce polyolu s izokyanátem (uvolňování CO_2),
 - **fyzikální** – jsou sloučeniny s nízkým bodem varu, které jsou zplyňovány při exotermické reakci polyolu s izokyanátem.
- **Stabilizátory** – dovolují řízení velikosti buněk pěny a napomáhají k vytvoření homogenní struktury. Do této kategorie lze dále zařadit UV stabilizátory, hydrolyzu stabilizující přísady, inhibitory oxidace a retardéry hoření.
 - **Barviva, plnidla, atd.** [4]

Polyuretany nás doprovázejí v denním životě jako měkké polštářové pěny, elastické podrážky bot, výborné tepelné izolanty a mnohé další. S rozšířenou celoroční spotřebou cca 5 milionů tun, patří dnes polyuretany k hospodářsky nejdůležitějším speciálním umělým hmotám. Za svůj velký význam vděčí především dvěma zvláštnostem, které je odlišují od mnohých jiných typů umělých hmot:

- ▶ Výrobky z polyuretanu mohou být vyráběny prostřednictvím intenzivního míchání reaktivních tekutých výchozích komponent i v malých zpracovatelských podnicích jednoduchým způsobem do požadovaného tvaru.
- ▶ Značný sortiment výchozích komponent, či přidání aditiv, umožňuje vyrábět produkt s širokým spektrem vlastností, od tvrdého až po měkký, vypěněný (buněčný) nebo kompaktní atd. [4]

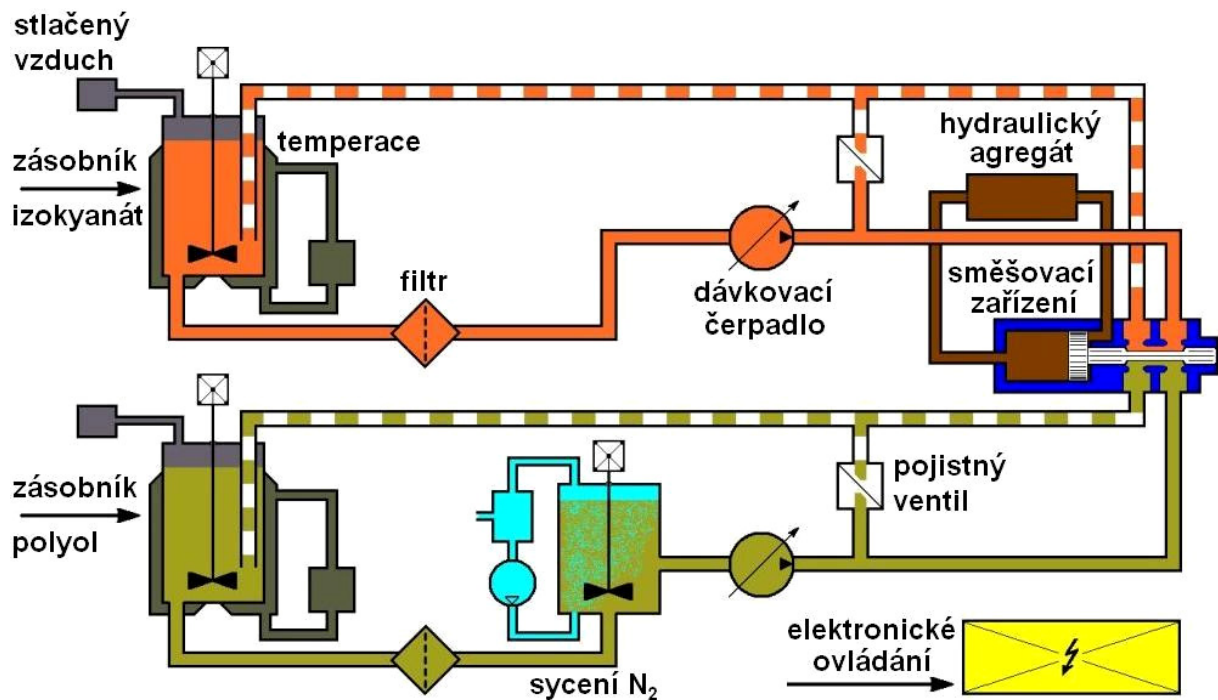
4.2 Systému vstřikování polyuretanu

Výroba polyuretanových produktů není zpravidla prováděna polyadící základních komponent přímo u výrobce těchto materiálů, nýbrž u samotného zpracovatele. Zpracování tedy zahrnuje nejen vytvarování, jako u mnohých standardních polymerních hmot, ale začíná v podstatě již primární výrobou polyuretanu smíšením tekutých reaktivních komponent – polyolu a izokyanátu. Na základě této zvláštnosti musely být vyvinuty pro výrobu PUR produktů speciální zpracovatelská technologie, tzv. reakční vstřikování RIM (obecně viz kap. 3.3.2.4 – Speciální způsoby vstřikování polymerů). Dávkovací stroj a tvářecí jednotka jsou hlavní prvky zpracovatelského zařízení. [4]

Systém vstřikování ke zpracování polyuretanu vykonává následující funkce:

■ **Přípravu tekutých komponent na smíšení**

Komponenty jsou zahřívány na požadovanou teplotu zpracování v oddělených pracovních nádržích, kde pomalu pracující míchadla zabezpečují jejich rovnoměrné temperování a homogenizaci. Současně jednotlivé komponenty cirkulují v celém dopravním systému, tzn. že přesně a nezávisle na sobě regulovatelná dávkovací čerpadla neustále dopravují komponenty z pracovních nádrží trubkovým nebo hadicovým vedením ke směšovací hlavě a zpět do pracovní nádrže, viz obr. 26.



Obrázek 26 - Schematicky znázorněný systém vstřikování polyuretanu [4]

■ Dávkování tekutých komponent do směšovací hlavy v požadovaném směšovacím poměru a promísení

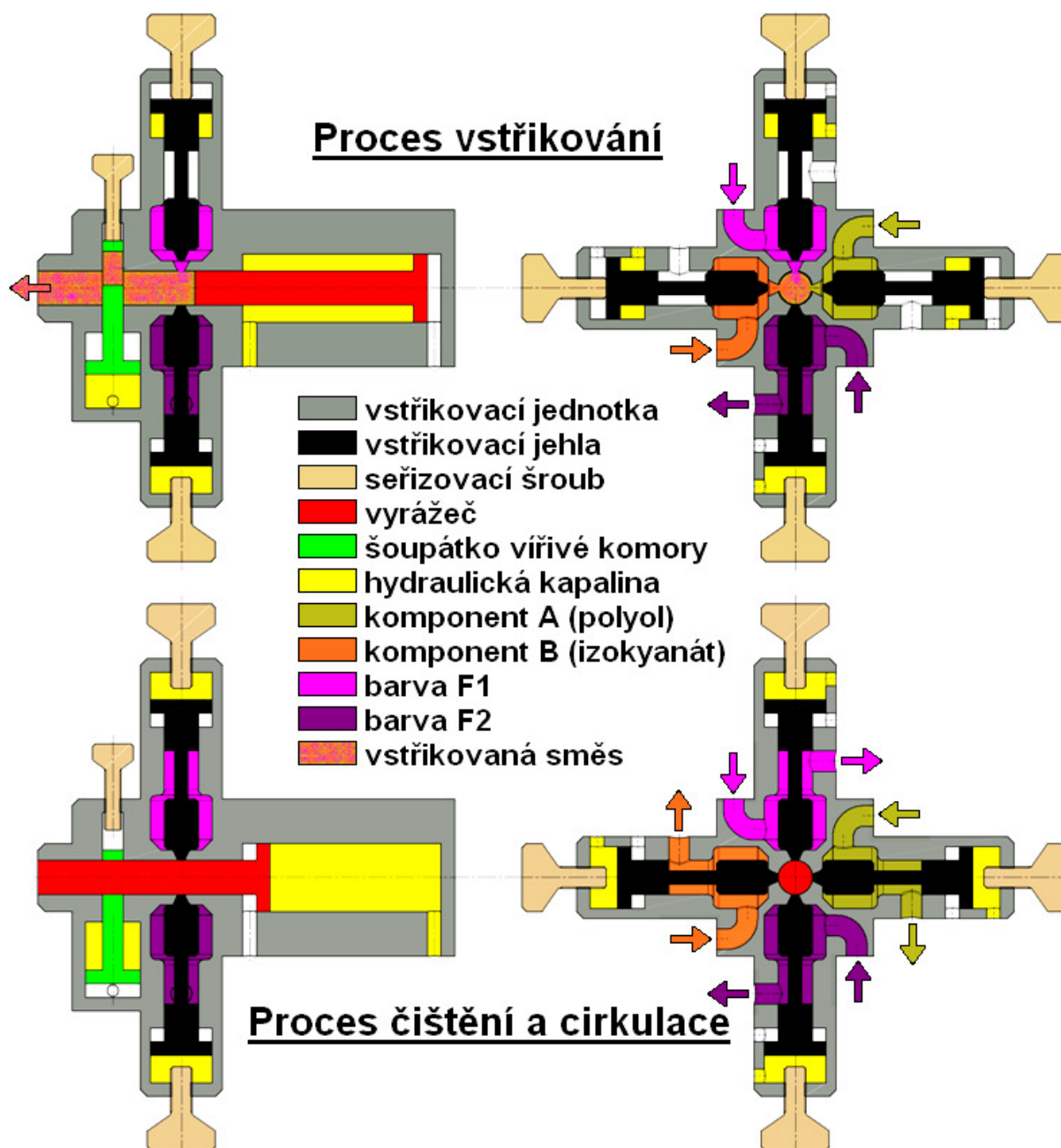
Promísení vstřikovaných komponent dle předvoleného směšovacího poměru, nastaveného seřízením průtoků jednotlivých dávkovacích čerpadel, probíhá až ve směšovacím zařízení, ústředním prvku každého vstřikovacího stroje. Polyadiční reakce začíná tedy v momentě, kdy elektronicky ovládaný hydraulický agregát uvolní cestu vstřikovaným komponentám do směšovací komory přestavením ovládací jehly, čímž zároveň dochází k okamžitému uzávěru cirkulačního obvodu. Množství dávkovaných komponent je úměrné intervalu otevření této ovládací jehly a nastavenému vstřikovacímu tlaku, který se u těchto systémů běžně pohybuje v rozmezí 100 až 200 bar. Když je dosaženo zvoleného množství materiálu, dojde k přesunutí ovládací jehly zpět do závěrné polohy, čímž se opět uvolní cesta cirkulačního obvodu. Dokonalému promísení vstřikované směsi navíc napomáhá i hydraulicky ovládané šoupátko vířivé komory, které je nedílnou součástí vstřikovací jednotky vysokotlakého RIM systému.

S pomocí vícetřiskových směšovacích hlav je možné současně dávkovat do směšovací komory více jak dvě komponenty, např. komponentu A (polyol), komponentu B (izokyanát) a dvě různé barvy (F1 a F2), viz obr. 27. [4]

■ Vstříknutí reakční směsi do dutiny formy

Je nezbytně nutné, aby ještě tekutá reakční směs opustila směšovací komoru dříve, než dojde k ukončení polymerační reakce. Toho je docíleno hydraulicky ovládaným vyrážecem, který po ukončení dávkovacího cyklu a přestavení šoupátka vířivé komory do polohy pro čištění, provede vytlačení veškeré zbylé reakční směsi ze vstřikovací jednotky do vtokové

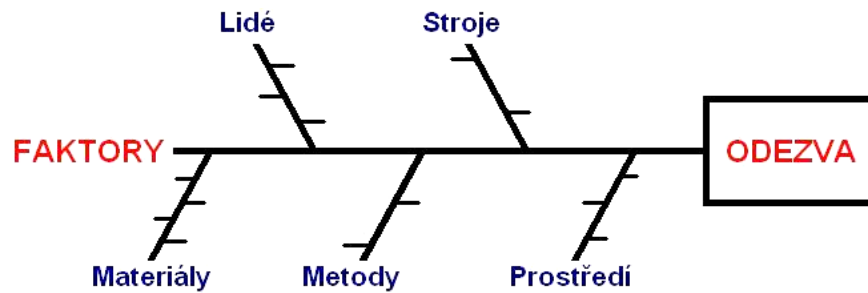
soustavy vstřikovací formy. Princip celého mechanismu vstřikovací jednotky je schematicky znázorněn na obr. 27. [4]



Obrázek 27 - Schematicky znázorněný princip a funkce vstřikovací jednotky RIM [48]

4.3 Návrh a sestavení DoE

Dalším krokem při tvorbě statisticky navrženého experimentu je vytvoření seznamu všech možných faktorů, tj. parametrů vstřikovacího procesu polyuretanu, které mohou mít vliv na výsledné sledované efekty výrobku. K tomuto účelu obvykle slouží Ishikawův diagram (= diagram příčin a následků, schematicky znázorněný na obr. 28) sestavený během, obvykle moderované, diskuze kompetentních pracovníků podniku.



Obrázek 28 - Ishikawův diagram [3]

Z takto sestaveného seznamu jsou primárně vyselektovány ty faktory, u kterých mechanismus jejich účinku dokonale známe nebo se kterými nemůžeme v rámci experimentu hýbat (budou považovány za konstanty). [3]

V našem případě byl zprvu vytvořen obsáhlý seznam těchto všech potenciálních ovlivňujících faktorů, přičemž pro samotné sestavení experimentu bylo vybráno pouze **6 faktorů** a jejich meze nastaveny symetricky na obě strany od doposud používaného nastavení:

- ✓ **směšovací poměr PUR**..... **f1** **60 – 70 %**
- ✓ **teplota formy** **f2** **45 – 65 °C**
- ✓ **nastavení šoupátka vířivé komory** **f3** **25 – 75 %**
- ✓ **doba vstřiku** **f4** **1,0 – 1,4 s**
- ✓ **doba náklonu**..... **f5** **1,0 – 7,0 s**
- ✓ **celkový průřez odvzdušnění** **f6** **2,2 – 5,4 mm²**

■ použití separátu	ANO	■ doba čištění	50 s
■ použití laku	NE	■ doba klidu čištění v taktu	60 s
■ vstříkovaný materiál	FFS 5	■ doba čištění v taktu	60 s
■ vstříkovací tlak polyolu	160 bar	■ trvání čištění v taktu	10 min
■ vstříkovací tlak izokyanátu	160 bar	■ doba chodu tlumivky vpřed	0,8 s
■ vstříkovací tlak barvy	80 bar	■ doba chodu tlumivky zpět	0,8 s
■ obsah dusíku v polyolu	12 %	■ doba chodu vyrážeče vpřed	1,7 s
■ teplota vstř. polyolu	36 °C	■ doba chodu vyrážeče zpět	1,7 s
■ teplota vstř. izokyanátu	27 °C	■ doba chodu vyrážeče	0,2 s
■ úhel náklonu formy	40 °	■ doba nárůstu tlaku komponent	5,0 s
■ 1. předběžný chod čerpadel	10 s	■ cirkulace zapnuta	1,0 min
■ následný chod čerpadel	6,0 s	■ cirkulace vypnuta	60 min
■ 2. předběžný chod čerpadel	5,0 s	■ doba zablokování pění	11 s
■ doba klidu čištění	0,2 s	■ okolní klimatické podmínky	

Pro tento experiment se šesti faktory byl, vzhledem k časové náročnosti samotné výroby a vyhodnocení vzorků, zvolen:

poloviční dílčí návrh o 32 krocích a rozlišení V s centrálními body (viz tabulka 2).

pokus	centrum	směšovací poměr	teplota formy	nastavení šoupátka vířivé komory	doba vstřiku	doba náklonu	celkový průřez odvzdušnění
		f1	f2	f3	f4	f5	f6
		%	°C	%	sec.	sec.	mm ²
1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	-1	-1	1	1
3	1	-1	-1	-1	1	-1	1
4	1	-1	-1	-1	1	1	-1
5	1	-1	-1	1	-1	-1	1
6	1	-1	-1	1	-1	1	-1
7	1	-1	-1	1	1	-1	-1
8	1	-1	-1	1	1	1	1
9	1	-1	1	-1	-1	-1	1
10	1	-1	1	-1	-1	1	-1
11	1	-1	1	-1	1	-1	-1
12	1	-1	1	-1	1	1	1
13	1	-1	1	1	-1	-1	-1
14	1	-1	1	1	-1	1	1
15	1	-1	1	1	1	-1	1
16	1	-1	1	1	1	1	-1
17	1	1	-1	-1	-1	-1	1
18	1	1	-1	-1	-1	1	-1
19	1	1	-1	-1	1	-1	-1
20	1	1	-1	-1	1	1	1
21	1	1	-1	1	-1	-1	-1
22	1	1	-1	1	-1	1	1
23	1	1	-1	1	1	-1	1
24	1	1	-1	1	1	1	-1
25	1	1	1	-1	-1	-1	-1
26	1	1	1	-1	-1	1	1
27	1	1	1	-1	1	-1	1
28	1	1	1	-1	1	1	-1
29	1	1	1	1	-1	-1	1
30	1	1	1	1	-1	1	-1
31	1	1	1	1	1	-1	-1
32	1	1	1	1	1	1	1
33 (C)	0	0	0	0	0	0	0
34 (C)	0	0	0	0	0	0	0
35 (C)	0	0	0	0	0	0	0

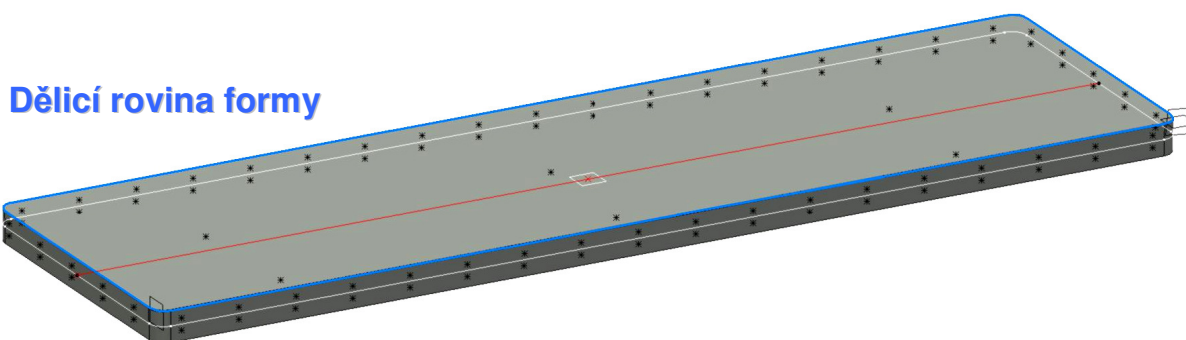
Tabulka 2 - Kódovaný návrh DoE: $2^{(6-1)}$ s centrálními body

4.4 Výroba vzorků pro experiment

Jelikož metodu DoE ve vybraném podniku doposud nikdo neaplikoval, byla z důvodu úspory materiálu pro tento prvotní experiment vybrána vstřikovací forma s označením L2-8027-01, která slouží k výrobě polyuretanových destiček na zkoušky a komparaci různých typů dezénu ostatních vstřikovacích forem.

Před výrobou samotných destiček bylo nutné formu nejprve kompletně vyčistit, zkompletovat a přeměřit její vnitřní rozměry pomocí 3D souřadnicového měřicího stroje, viz obr. 29, kde je znázorněn počet a rozmístění měrných bodů. Na základě tohoto měření byly zjištěny výchozí rozměry vzorků (tj. dutiny formy) a to:

- **délka** $L_F = 357,713$ mm,
- **šířka** $\check{S}_F = 102,593$ mm,
- **výška** (včetně dělicí roviny 0,394 mm) $H_F = 10,792$ mm.



Obrázek 29 - Měření dutiny formy

Vzhledem k problémovému nastavování směšovacího poměru a teploty formy vlivem tepelné setrvačnosti celého systému, nemohl být experiment DoE zcela znáhodněn. Z tohoto důvodu byl alespoň pro minimální ověření stability vstřikovacího procesu zvolen vyšší počet centrálních vzorků, a navíc při každém nastavení nové kombinace faktorů byl první vyrobený vzorek ihned znehodnocen a k samotnému vyhodnocení experimentu použit až ten následující.

Experiment byl naplánován na pátek 15.10.2010, přičemž veškeré okolní parametry a parametry procesu byly pravidelně kontrolovány a zaznamenávány. Především se jednalo o sledování teplot jednotlivých komponent (viz příloha 1), vyhodnocování procentuálního obsahu dusíku v polyolu laboratorní zkouškou (viz příloha 2) a průběh klimatických podmínek u vstřikovacího zařízení (viz příloha 3).

Vše probíhalo bez problému až do okamžiku, kdy během výroby posledních vzorků došlo k náhodnému zadření čerpadla systému pro sycení polyolu dusíkem. Vzhledem k tomuto faktu a rozsahu opravy musel být experiment bohužel přerušen, celý systém vypnut a dokončení přesunuto na pondělí 18.10.2010.

Vlivem tohoto přerušení bylo nutné k plánovanému dokončení experimentu dále vyrobit i duplicitní vzorky poslední série, která nemohla být ještě tímto, výše zmiňovaným,

výpadkem postihnuta. Na základě vyhodnocení sledovaných parametrů a statistického porovnání duplicitních vzorků bylo zjištěno, že tento výpadek neměl významný vliv na průběh experimentu a nově vyrobené vzorky bylo tedy možné zahrnout do celkového vyhodnocení.

Po dokončení výrobní části experimentu, byly vzorky vyrovnány v přepravních krabicích a uskladněny na měrném středisku, kde jsou udržovány předepsané klimatické podmínky pro měření:

- ▶ teplota vzduchu v rozmezí 20 ± 1 °C,
- ▶ relativní vlhkost vzduchu v rozmezí 30 až 55 %.

Po dobu 3 týdnů zde byly vzorky ponechány pro ustálení všech sledovaných parametrů. Veškerá měření byla následně prováděna pouze v těchto prostorách.

4.5 Měření a vyhodnocování vzorků

▶ K měření všech sledovaných parametrů vyrobených vzorků byla použita měřidla, zařízení a softwarové vybavení společnosti *TRW Volant a.s.*, měřidla byla pravidelně kontrolována a cejchována v rámci předepsaných interních směrnic zmiňovaného podniku.

▶ K vyhodnocení všech zjištěných hodnot sledovaných efektů byl použit statistický software firmy *StatSoft, Inc. (2009), STATISTICA[®], version 9.0, www.statsoft.com*.

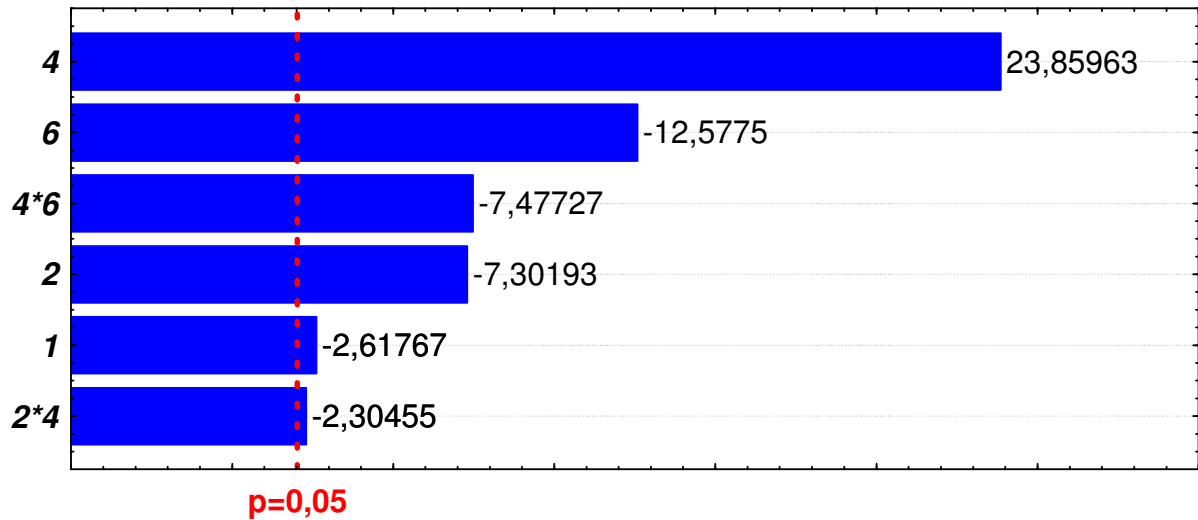
4.5.1 Vyhodnocení hmotnosti vzorku

Měření hmotnosti vzorku bylo prováděno pomocí digitální laboratorní váhy, jejíž přesnost byla před zahájením samotného měření zkontrolována zvážení etalonu (přesného 2 kg závaží). Takto naměřené hodnoty byly postupně zapsány do tabulky, viz příloha 1.

Pozdějším zpracováním těchto hodnot ve výše zmiňovaném statistickém softwaru, viz příloha 4, a následným vygenerováním Paretova (obr. 30) a normálního pravděpodobnostního diagramu (obr. 31) bylo zjištěno, že na sledovaný efekt mají s 95 % pravděpodobnostní spolehlivostí vliv zejména tyto faktory a jejich interakce:

- 4doba vstříku**pozitivní vliv,**
- 6průřez odvzdušnění.....**negativní vliv,**
- 4*6interakce doby vstříku a průřezu odvzdušnění**negativní vliv,**
- 2teplota formy**negativní vliv,**
- 1směšovací poměr**negativní vliv,**
- 2*4interakce teploty formy a doby vstříku**negativní vliv.**

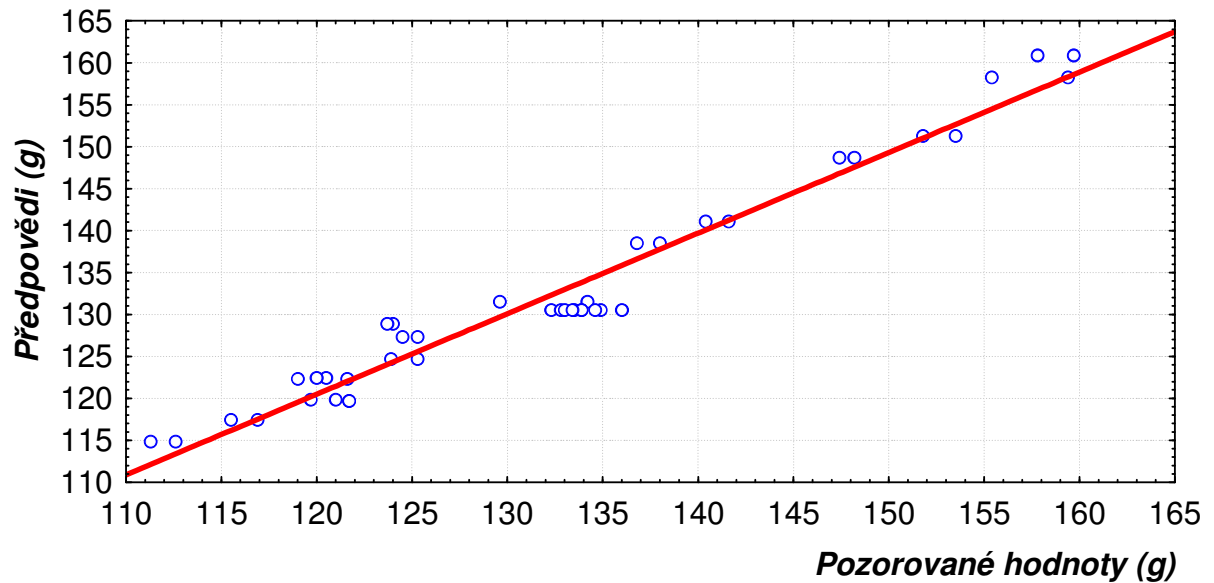
Paretův graf standardizovaných efektů
Proměnná: hmotnost vzorku (g)



Standardizovaný odhad efektu (absolut. hodn.)

Obrázek 30 - Paretův diagram efektu pro hmotnost vzorku

Pozorované vs. předpovědi
Proměnná: hmotnost vzorku (g)



Obrázek 31 - Normální pravděpodobnostní diagram pro hmotnost vzorku

Pro bližší zkoumání vzájemných interakcí jednotlivých významných faktorů (2 – teplota formy, 4 – doba vstřiku a 6 – průřez odvzdušnění) byl následně vygenerován i graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti, viz obr. 32.

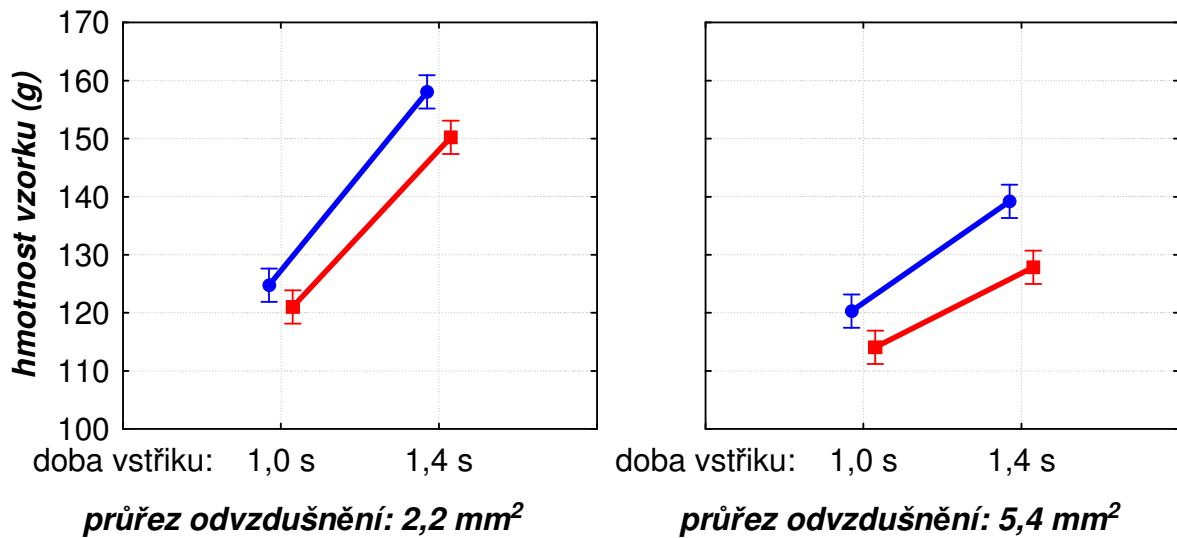
Z grafu je patrné, že teplota formy má mírný interakční vliv s dobou vstřiku, přičemž následkem zvětšení průřezu odvzdušnění dochází k výraznému snížení hmotnosti vzorku.

Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti (95 %)

Proměnná: hmotnost vzorku (g)

teplota formy: 45 °C

teplota formy: 65 °C



Obrázek 32 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro hmotnost vzorku

Výsledná rovnice modelu procesu pro sledovaný efekt (hmotnost vzorku) má v kódovaném tvaru pro danou mez spolehlivosti 95 % znění :

$$\begin{aligned} \text{Efekt (g)} = & 132,9748 - 2,6125*(f1) - 7,2875*(f2) + 23,8125*(f4) - 12,3202*(f6) \\ & - 2,3000*(f2*f4) - 7,4625*(f4*f6) \end{aligned}$$

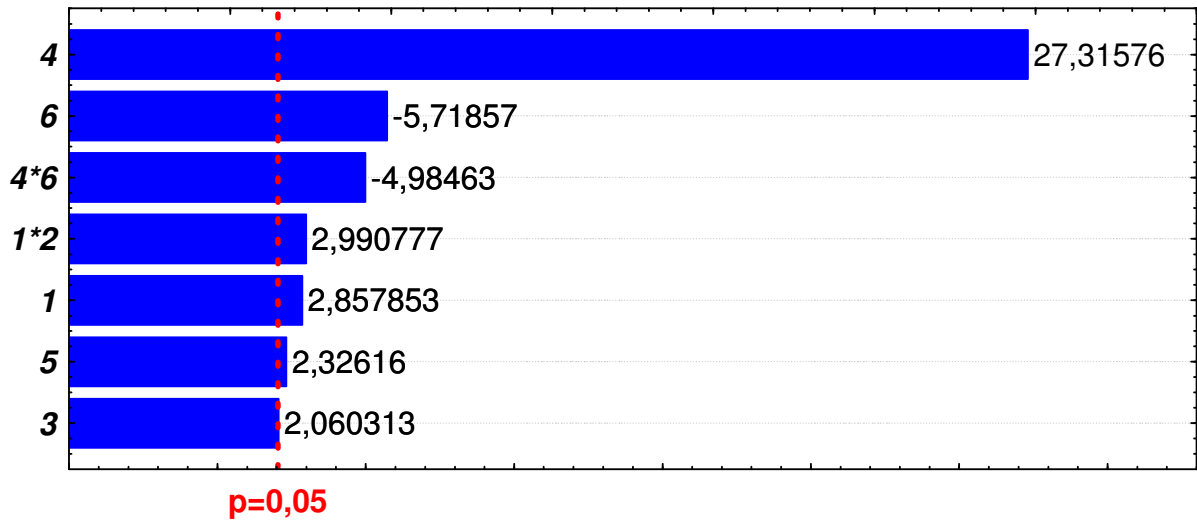
4.5.2 Vyhodnocení hmotnosti přetoku do dělicí roviny

Měření hmotnosti přetoku do dělicí roviny bylo, podobně jako v předchozím případě, prováděno pomocí digitální laboratorní váhy. Vážením tohoto přetoku můžeme charakterizovat schopnost reakční vstříkované směsi zatékat do úzkých prostorů a dutin. Takto naměřené hodnoty byly také zapsány do tabulky, viz příloha 1.

Pozdějším zpracováním těchto hodnot ve výše zmiňovaném statistickém softwaru, viz příloha 5, a následným vygenerováním Paretova (obr. 33) a normálního pravděpodobnostního diagramu (obr. 34) bylo zjištěno, že na sledovaný efekt mají s 95 % pravděpodobnostní spolehlivostí vliv zejména tyto faktory a jejich interakce:

- 4doba vstříku**pozitivní vliv,**
- 6průřez odvzdušnění.....**negativní vliv,**
- 4*6interakce doby vstříku a průřezu odvzdušnění**negativní vliv,**
- 1*2interakce směšovacího poměru a teploty formy**pozitivní vliv,**
- 1směšovací poměr**pozitivní vliv,**
- 5doba náklonu**pozitivní vliv,**
- 3nastavení šoupátka vířivé komory**pozitivní vliv.**

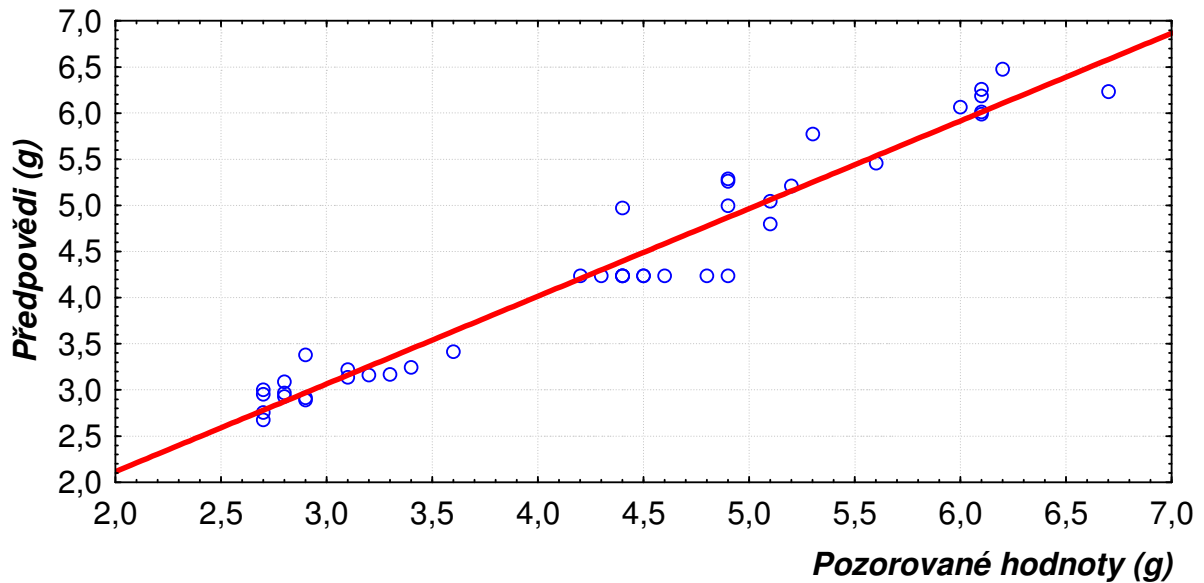
Paretův graf standardizovaných efektů
Proměnná: hmotnost dělicí roviny (g)



Standardizovaný odhad efektu (absolut. hodn.)

Obrázek 33 - Paretův diagram efektu pro hmotnost přetoku do dělicí roviny

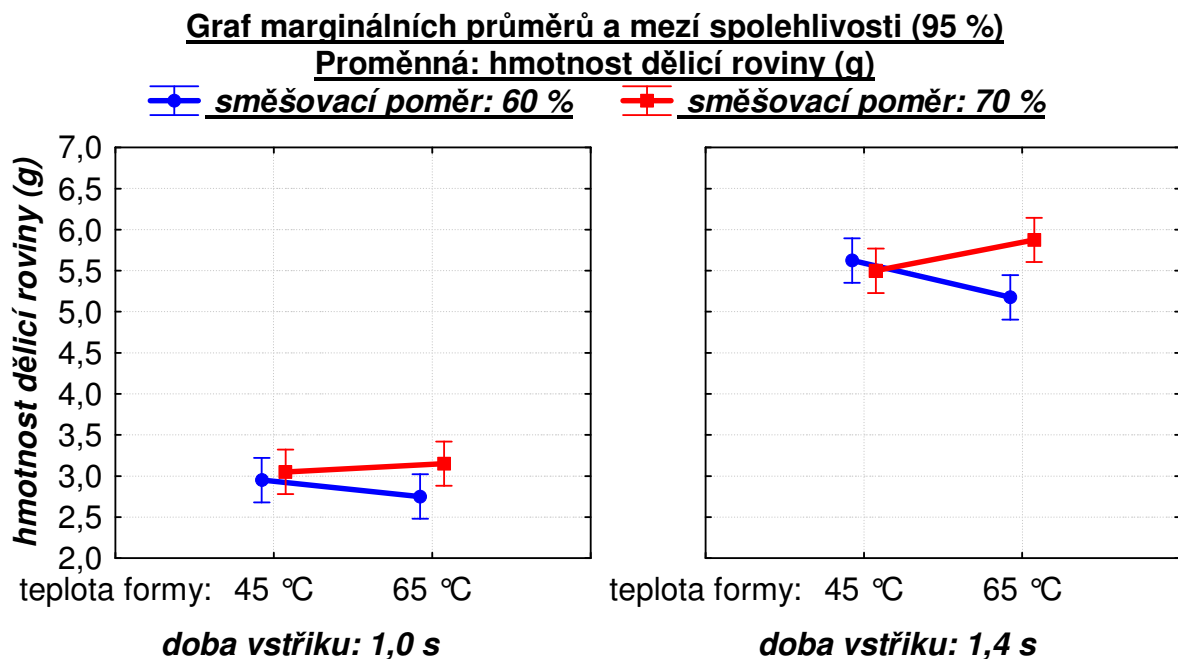
Pozorované vs. předpovědi
Proměnná: hmotnost dělicí roviny (g)



Obrázek 34 - Normální pravděpodobnostní diagram pro hmotnost přetoku do dělicí roviny

Pro bližší zkoumání vzájemných interakcí jednotlivých významných faktorů (1 – směšovací poměr, 2 – teplota formy a 4 – doba vstříku) byl následně vygenerován i graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti, viz obr. 35.

Z grafu je patrné, že směšovací poměr má prokázaný interakční vliv s teplotou formy, přičemž zvýšením doby vstříku, jež má významný pozitivní vliv na sledovaný efekt, navíc dochází i k výraznému zesílení této zmiňované interakce.



Obrázek 35 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro hmotnost přetoku do dělicí roviny

Výsledná rovnice modelu procesu pro sledovaný efekt (**hmotnost přetoku do dělicí roviny**) má v kódovaném tvaru pro danou mez spolehlivosti 95 % znění :

$$\begin{aligned}
 \underline{\text{Efekt (g)}} = & 4,34180 + 0,26875*(f1) + 0,19375*(f3) + 2,56875*(f4) + 0,21875*(f5) \\
 & - 0,52781*(f6) + 0,28125*(f1*f2) - 0,46875*(f4*f6)
 \end{aligned}$$

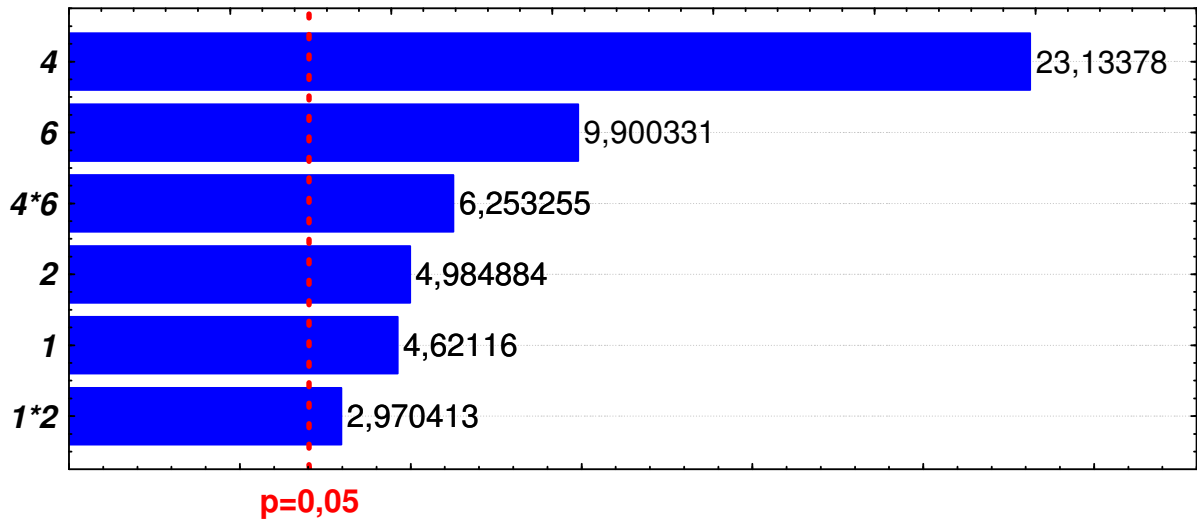
4.5.3 Vyhodnocení hmotnosti přetoku od vzdušněním formy

Měření hmotnosti přetoku od vzdušněním formy bylo, podobně jako v předchozích případech, prováděno pomocí digitální laboratorní váhy. Nadbytečně velké přetoky tohoto charakteru jsou pro výrobní proces nežádoucí a způsobují velké finanční ztráty plýtváním zpracovávaného materiálu. Takto naměřené hodnoty byly také zapsány do tabulky, viz příloha 1.

Pozdějším zpracováním těchto hodnot ve výše zmiňovaném statistickém softwaru, viz příloha 6, a následným vygenerováním Paretova (obr. 36) a normálního pravděpodobnostního diagramu (obr. 37) bylo zjištěno, že na sledovaný efekt mají s 95 % pravděpodobnostní spolehlivostí vliv zejména tyto faktory a jejich interakce:

- 4doba vstříku **pozitivní vliv,**
- 6průřez od vzdušnění..... **pozitivní vliv,**
- 4*6interakce doby vstříku a průřezu od vzdušnění **pozitivní vliv,**
- 2teplota formy **pozitivní vliv,**
- 1směšovací poměr **pozitivní vliv,**
- 1*2interakce směšovacího poměru a teploty formy **pozitivní vliv.**

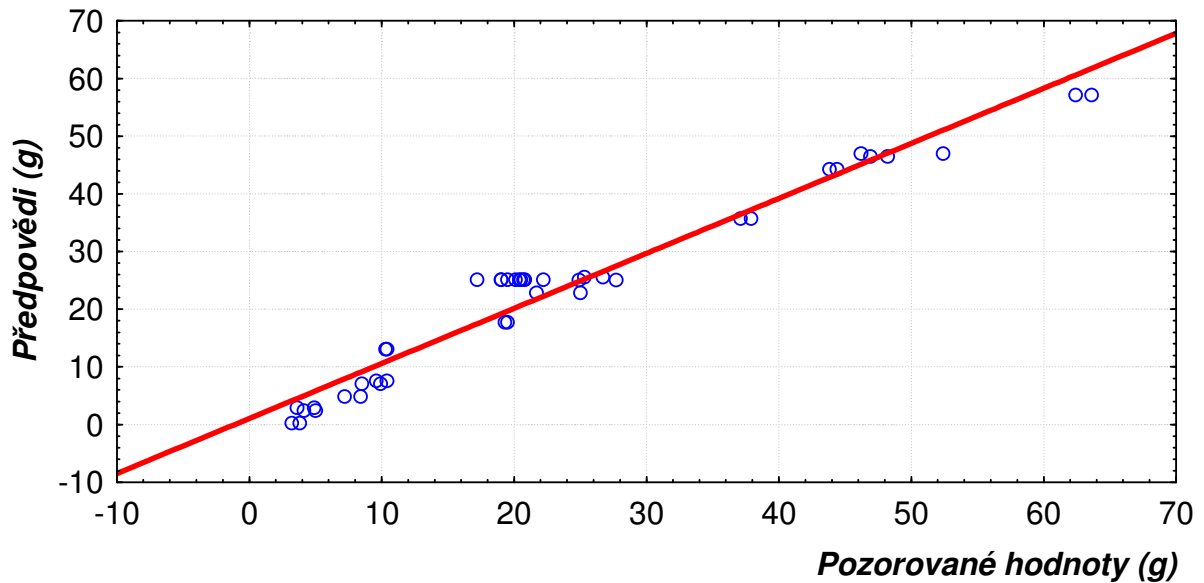
Paretův graf standardizovaných efektů
Proměnná: hmotnost přetoků (g)



Standardizovaný odhad efektu (absolut. hodn.)

Obrázek 36 - Paretův diagram efektu pro hmotnost přetoku odvzdušněním

Pozorované vs. předpovědi
Proměnná: hmotnost přetoků (g)



Obrázek 37 - Normální pravděpodobnostní diagram pro hmotnost přetoku odvzdušněním

Pro bližší zkoumání vzájemných interakcí jednotlivých významných faktorů (2 – teplota formy, 4 – doba vstříku a 6 – průřez odvzdušnění) byl následně vygenerován i graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti, viz obr. 38.

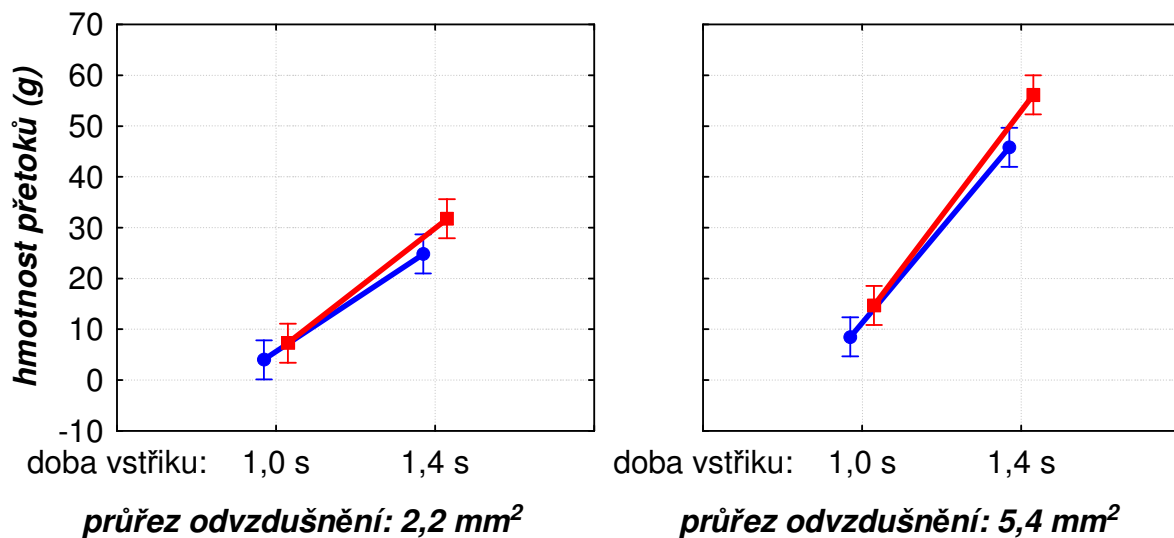
Z grafu je patrné, že teplota formy a doba vstříku nemají významný interakční vliv na sledovaný efekt. Výrazného růstu efektu je oproti tomu dosaženo vzájemnou pozitivní interakcí doby vstříku a průřezu odvzdušnění.

Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti (95 %)

Proměnná: hmotnost přetoků (g)

teplota formy: 45 °C

teplota formy: 65 °C



Obrázek 38 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro hmotnost přetoku odvdz.

Výsledná rovnice modelu procesu pro sledovaný efekt (hmotnost přetoku odvdzdušněním formy) má v kódovaném tvaru pro danou mez spolehlivosti 95 % znění :

$$\begin{aligned} \text{Efekt (g)} = & 22,51554 + 6,19375*(f1) + 6,68125*(f2) + 31,00625*(f4) + 13,02368*(f6) \\ & + 3,98125*(f1*f2) + 8,38125*(f4*f6) \end{aligned}$$

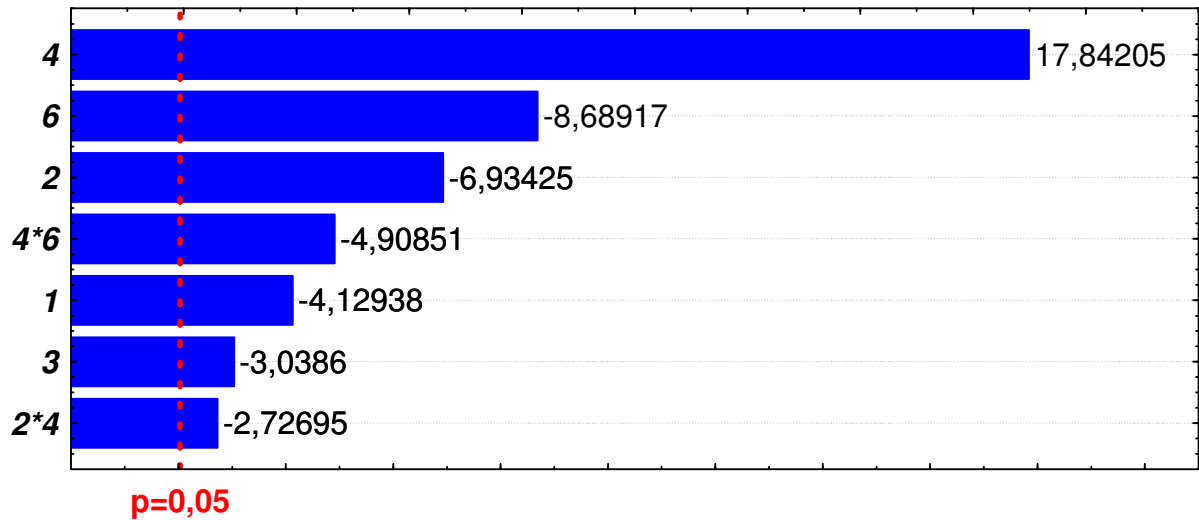
4.5.4 Vyhodnocení hmotnosti vtoku

Měření hmotnosti vtoku bylo, podobně jako v předchozích případech, prováděno pomocí digitální laboratorní váhy. Hmotnost vtokové soustavy, která je umístěna v podélné ose dutiny vstřikovací formy, napomáhá určit faktory ovlivňující schopnost tečení reakční směsi před dokončením polymerační reakce a jejím následným uzamčením v dutině formy. Takto naměřené hodnoty byly také zapsány do tabulky, viz příloha 1.

Pozdějším zpracováním těchto hodnot ve výše zmiňovaném statistickém softwaru, viz příloha 7, a následným vygenerováním Paretova (obr. 39) a normálního pravděpodobnostního diagramu (obr. 40) bylo zjištěno, že na sledovaný efekt mají s 95 % pravděpodobnostní spolehlivostí vliv zejména tyto faktory a jejich interakce:

- 4doba vstřiku**pozitivní vliv,**
- 6průřez odvodušnění.....**negativní vliv,**
- 2teplota formy**negativní vliv,**
- 4*6interakce doby vstřiku a průřezu odvodušnění**negativní vliv,**
- 1směšovací poměr**negativní vliv,**
- 3nastavení šoupátka vířivé komory**negativní vliv,**
- 2*4interakce teploty formy a doby vstřiku**negativní vliv.**

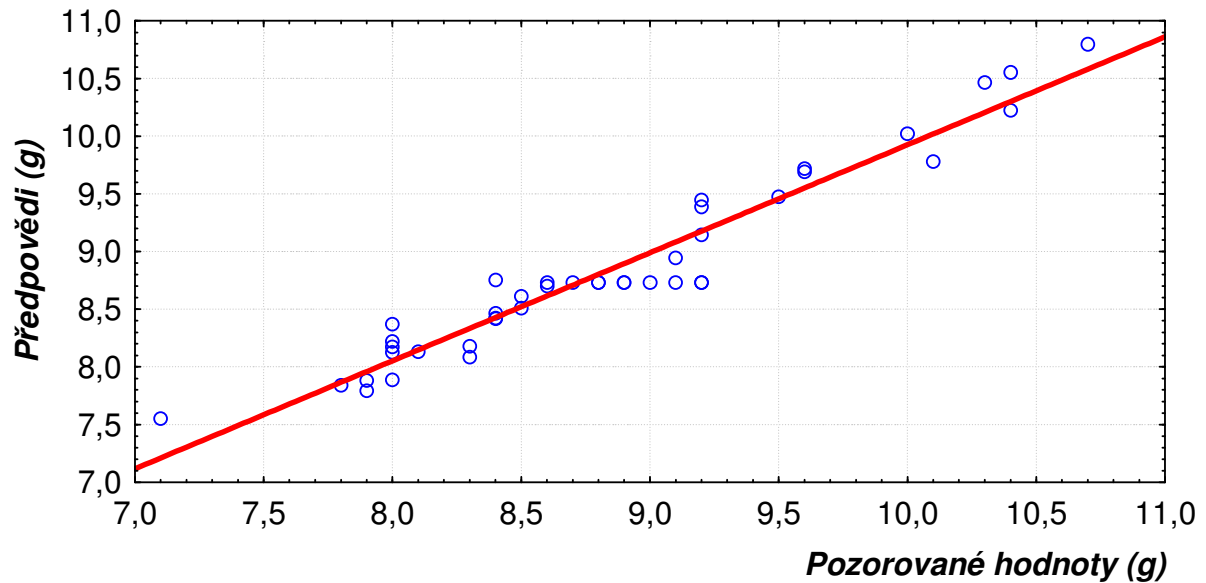
Paretův graf standardizovaných efektů
Proměnná: hmotnost vtoku (g)



Standardizovaný odhad efektu (absolut. hodn.)

Obrázek 39 - Paretův diagram efektu pro hmotnost vtoku

Pozorované vs. předpovědi
Proměnná: hmotnost vtoku (g)



Obrázek 40 - Normální pravděpodobnostní diagram pro hmotnost vtoku

Pro bližší zkoumání vzájemných interakcí jednotlivých významných faktorů (2 – teplota formy, 4 – doba vstřiku a 6 – průřez odvodušnění) byl následně vygenerován i graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti, viz obr. 41.

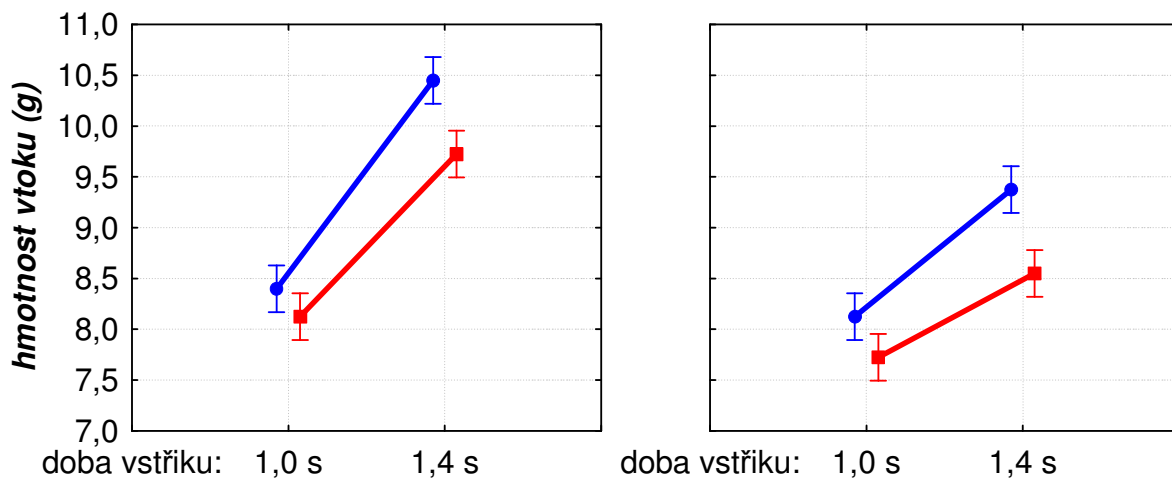
Z grafu jsou na první pohled patrné stejné interakční vlivy, které byly již dříve popsány u vyhodnocení hmotnosti vzorků.

Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti (95 %)

Proměnná: hmotnost vtoku (g)

—●— teplota formy: 45 °C

—■— teplota formy: 65 °C



průřez odvzdušnění: 2,2 mm²

průřez odvzdušnění: 5,4 mm²

Obrázek 41 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro hmotnost vtoku

Výsledná rovnice modelu procesu pro sledovaný efekt (hmotnost vtoku) má v kódovaném tvaru pro danou mez spolehlivosti 95 % znění :

$$\begin{aligned} \underline{\text{Efekt (g)}} = & 8,868291 - 0,33125*(f1) - 0,55625*(f2) - 0,24375*(f3) + 1,43125*(f4) \\ & - 0,684117*(f6) - 0,21875*(f2*f4) - 0,39375*(f4*f6) \end{aligned}$$

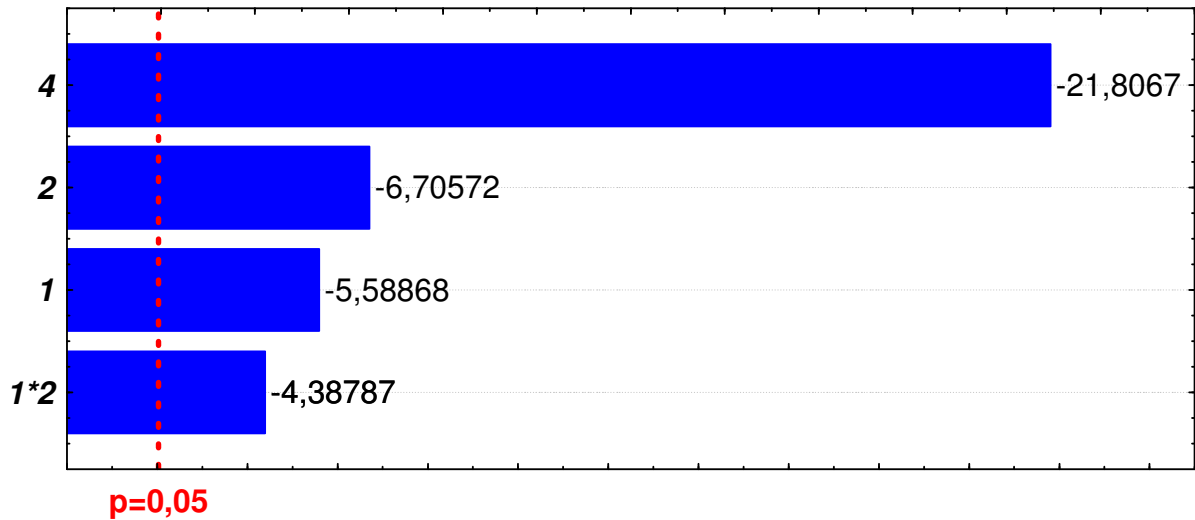
4.5.5 Vyhodnocení času přetoku pěny

Měření času přetoku pěny, tzn. časového intervalu od otevření vstřikovacích trysek po okamžik přetečení reakční směsi odvzdušněním dutiny formy, bylo prováděno pomocí stopek dvěma pracovníky při nultém a oficiálním nástřiku vzorku. Výsledná hodnota je uváděna jako aritmetický průměr těchto dvou dílčích hodnot, přičemž takto zjištěný údaj vypovídá o rychlosti vyplnění dutiny formy vstřikovaným materiálem. Tyto hodnoty byly také zapsány do tabulky, viz příloha 1.

Pozdějším zpracováním těchto hodnot ve výše zmiňovaném statistickém softwaru, viz příloha 8, a následným vygenerováním Paretova (obr. 42) a normálního pravděpodobnostního diagramu (obr. 43) bylo zjištěno, že na sledovaný efekt mají s 95 % pravděpodobnostní spolehlivostí vliv zejména tyto faktory a jejich interakce:

- 4doba vstřiku**negativní vliv,**
- 2teplota formy**negativní vliv,**
- 1směšovací poměr**negativní vliv,**
- 1*2interakce směšovacího poměru a teploty formy**negativní vliv.**

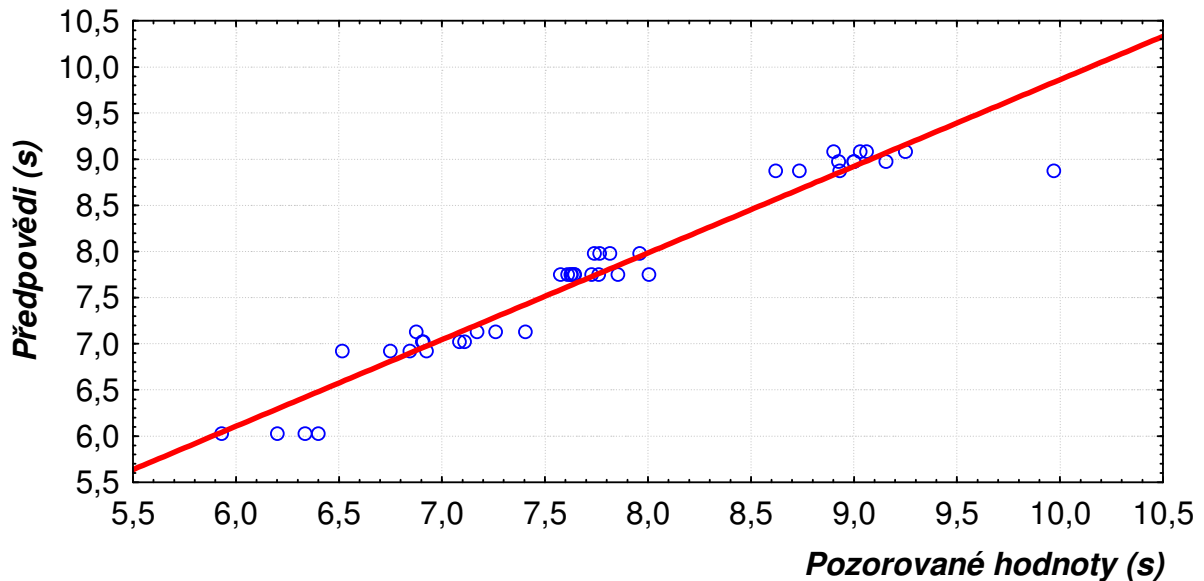
Paretův graf standardizovaných efektů
Proměnná: čas přetoku pěny (s)



Standardizovaný odhad efektu (absolut. hodn.)

Obrázek 42 - Paretův diagram efektu pro čas přetoku pěny

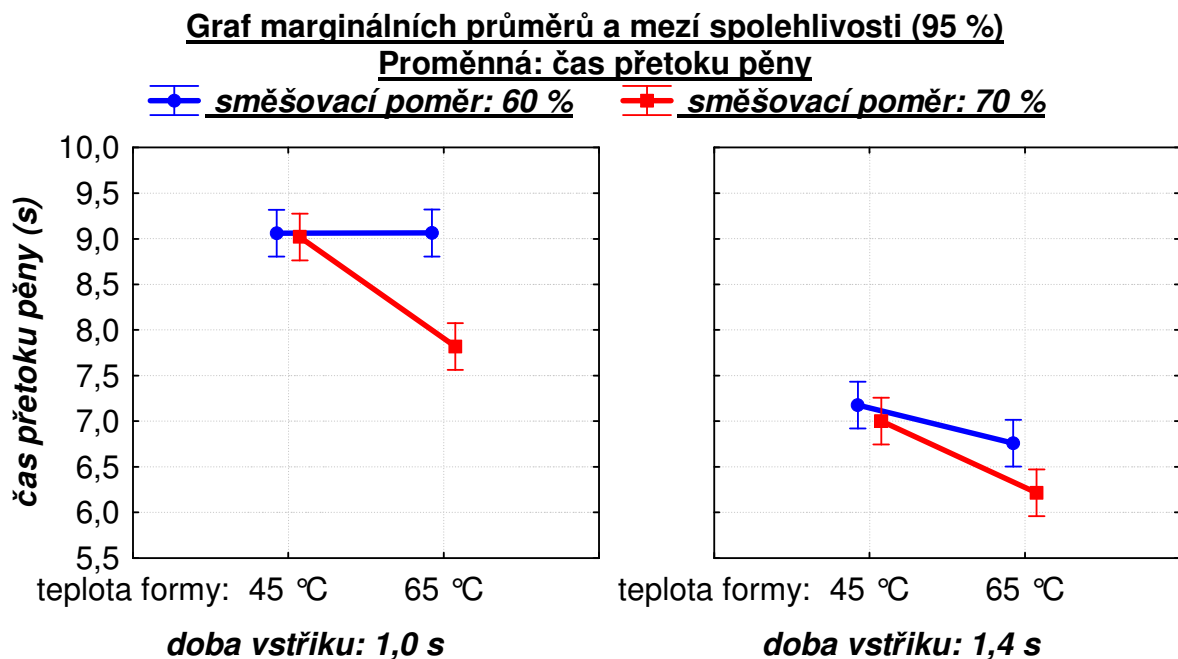
Pozorované vs. předpovědi
Proměnná: čas přetoku pěny (s)



Obrázek 43 - Normální pravděpodobnostní diagram pro čas přetoku pěny

Pro bližší zkoumání vzájemných interakcí jednotlivých významných faktorů (1 – směšovací poměr, 2 – teplota formy a 4 – doba vstřiku) byl následně vygenerován i graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti, viz obr. 44.

Z grafu je na první pohled patrné, že k výraznému snížení času přetoku pěny dochází zvýšením doby vstřiku. Svou roli samozřejmě hraje i výrazná interakce směšovacího poměru a teploty formy, kdy zvýšením těchto dvou parametrů dochází ke snížení času potřebného k vyplnění dutiny formy.



Obrázek 44 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro čas přetoku pěny

Výsledná rovnice modelu procesu pro sledovaný efekt (**čas přetoku pěny**) má v kódovaném tvaru pro danou mez spolehlivosti 95 % znění :

$$\underline{\text{Efekt (s)}} = 7,75107 - 0,50031*(f1) - 0,60031*(f2) - 1,95219*(f4) - 0,39281*(f1*f2)$$

4.5.6 Vyhodnocení součinitele délkového smrštění

Pro zjištění hodnot součinitele délkového smrštění bylo nezbytné dané vzorky nejprve, co možná nejpřesněji, přeměřit. Za tímto účelem byl sestaven program na 3D souřadnicovém měřicím stroji, viz příloha 16, s jehož pomocí bylo možné vytvořit přesný 3D model každého vzorku a následně tak vyhodnotit veškeré hledané rozměry.

Součinitel délkového smrštění byl spočten na základě vztahu:

$$\alpha = \frac{L_F - L_V}{L_F}, \quad [49]$$

kde: αsoučinitel délkového smrštění.....(-)

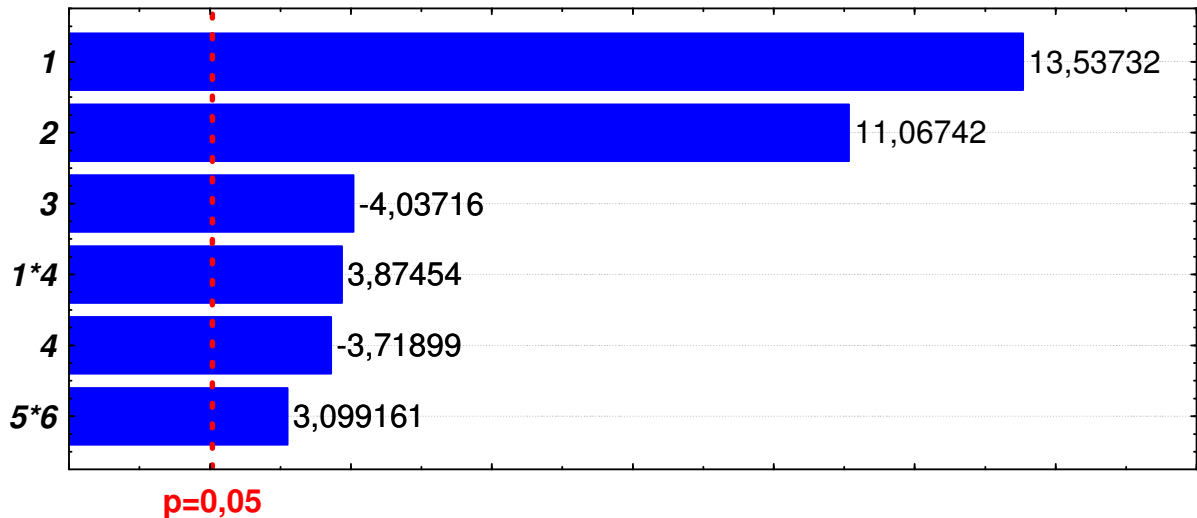
L_Fdélka dutiny formy(m)

L_Vdélka polyuretanového vzorku(m)

Tyto hodnoty byly také zapsány do tabulky, viz příloha 1. Pozdějším zpracováním těchto hodnot ve výše zmiňovaném statistickém softwaru, viz příloha 9, a následným vygenerováním Paretova (obr. 45) a normálního pravděpodobnostního diagramu (obr. 46) bylo zjištěno, že na sledovaný efekt mají s 95 % pravděpodobnostní spolehlivostí vliv zejména tyto faktory a jejich interakce:

- 1směšovací poměr**pozitivní vliv,**
- 2teplota formy**pozitivní vliv,**
- 3nastavení šoupátka vířivé komory**negativní vliv,**
- 1*4interakce směšovacího poměru a doby vstříku**pozitivní vliv,**
- 4doba vstříku**negativní vliv,**
- 5*6interakce doby náklonu a průřezu odzdušnění**pozitivní vliv.**

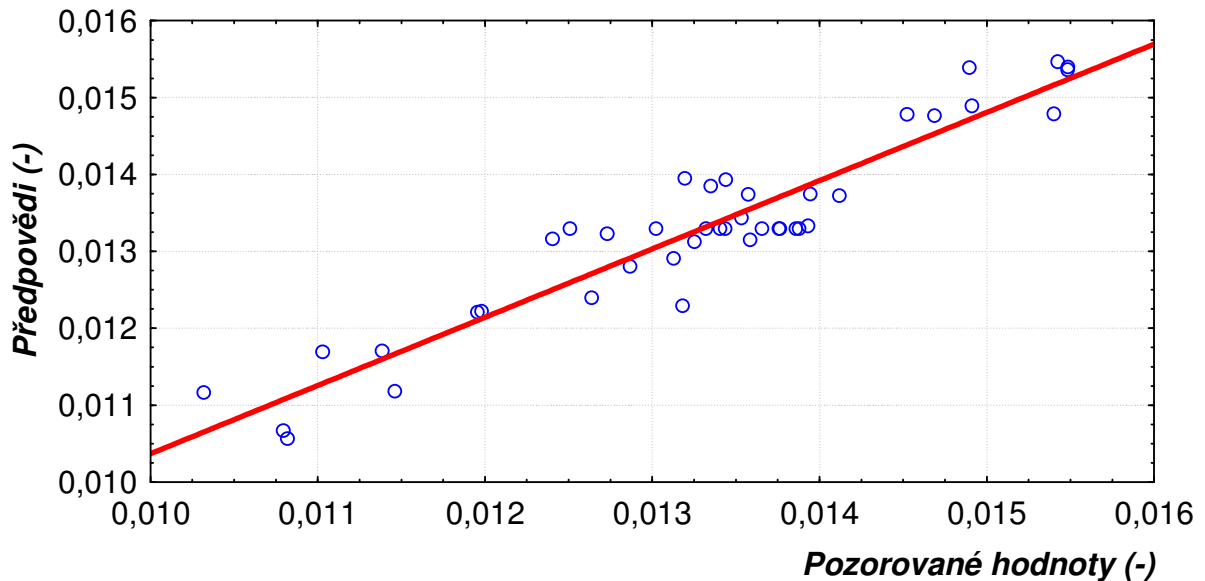
Paretův graf standardizovaných efektů
Proměnná: součinitel délkového smrštění (-)



Standardizovaný odhad efektu (absolut. hodn.)

Obrázek 45 - Paretův diagram efektu pro součinitel délkového smrštění

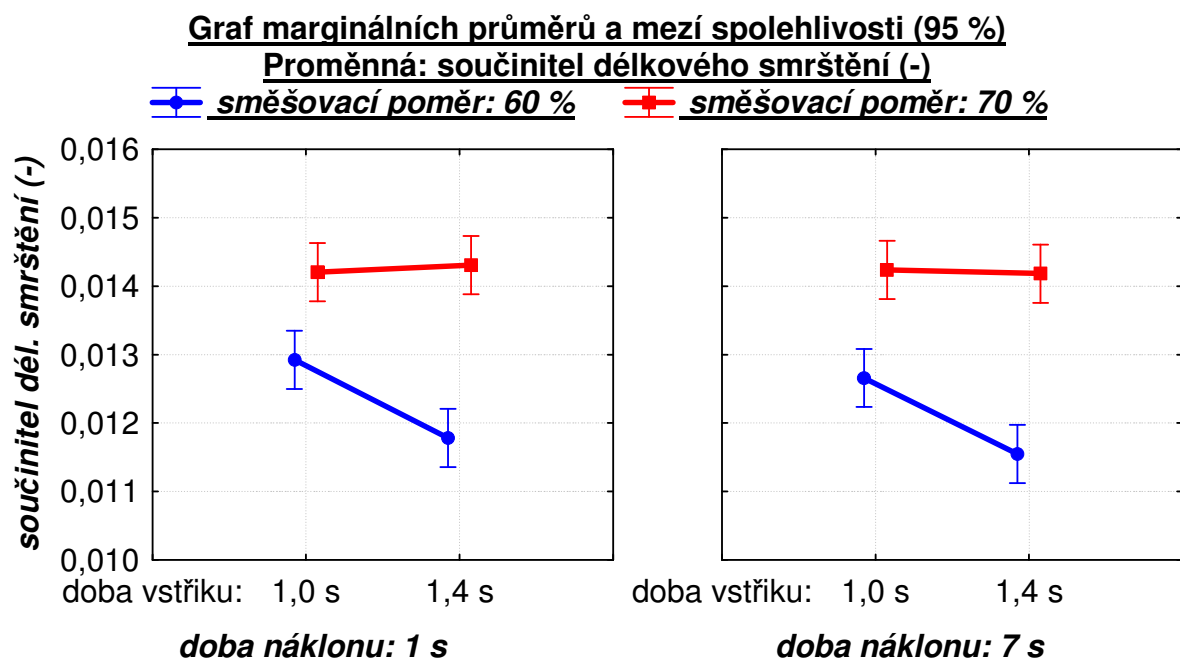
Pozorované vs. předpovědi
Proměnná: součinitel délkového smrštění (-)



Obrázek 46 - Normální pravděpodobnostní diagram pro součinitel délkového smrštění

Pro bližší zkoumání vzájemných interakcí jednotlivých významných faktorů (1 – směšovací poměr, 4 – doba vstřiku a 5 – doba náklonu) byl následně vygenerován i graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti, viz obr. 47.

Z grafu je patrné, že výrazně nižších hodnot součinitele délkového smrštění je možné dosáhnout snížením směšovacího poměru a zvýšením doby vstřiku. Nevýhodou tohoto nastavení je ale poměrně výrazná interakce těchto faktorů v porovnání s nastavením vyššího směšovacího poměru, kdy změna doby vstřiku nemá na sledovaný efekt téměř žádný významný vliv.



Obrázek 47 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro součinitel délkového smrštění

Výsledná rovnice modelu procesu pro sledovaný efekt (**součinitel délkového smrštění**) má v kódovaném tvaru pro danou mez spolehlivosti 95 % znění :

$$\begin{aligned}
 \text{Efekt (-)} = & 0,013286 + 0,002007*(f1) + 0,001641*(f2) - 0,000599*(f3) - 0,000551*(f4) \\
 & + 0,000574*(f1*f4) + 0,000460*(f5*f6)
 \end{aligned}$$

4.5.7 Vyhodnocení součinitele objemového smrštění

Na základě již vytvořených 3D modelů polyuretanových vzorků a modelu dutiny formy bylo již snadné určit i součinitel objemového smrštění. Dnešní CAD softwary mají obvykle pro tyto případy, kromě funkcí pro obecné měření v prostoru, i funkci automatického určení objemu uzavřených těles.

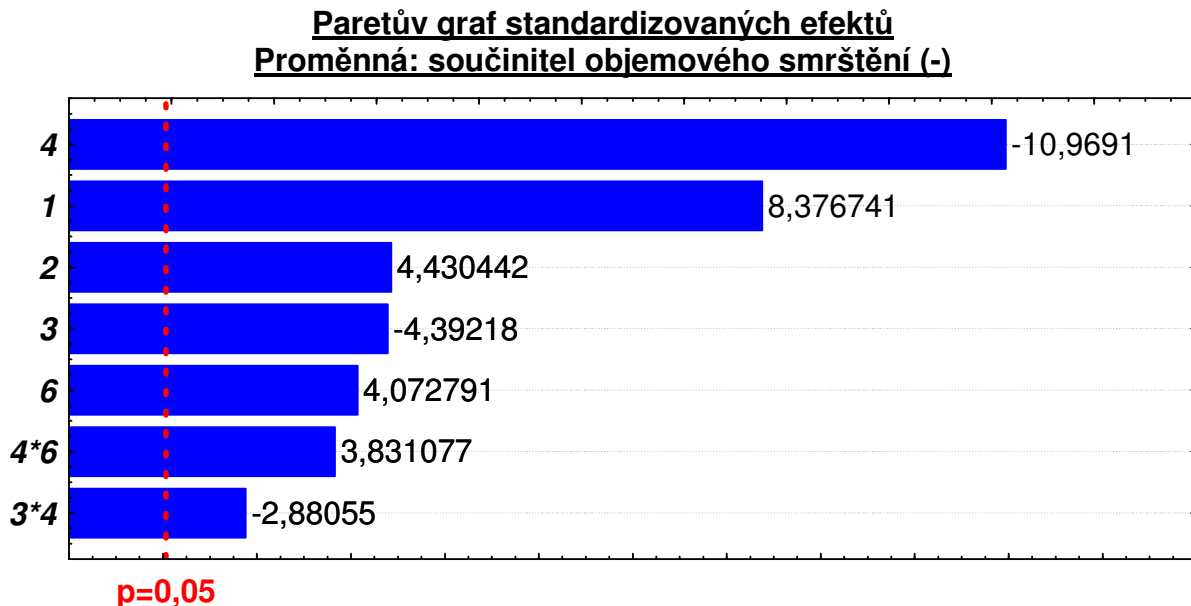
Součinitel objemového smrštění byl spočten na základě vztahu:

$$\beta = \frac{V_F - V_V}{V_F}, \quad [49]$$

kde: β součinitel objemového smrštění (-)
 V_F objem dutiny formy (m^3)
 V_V objem polyuretanového vzorku (m^3)

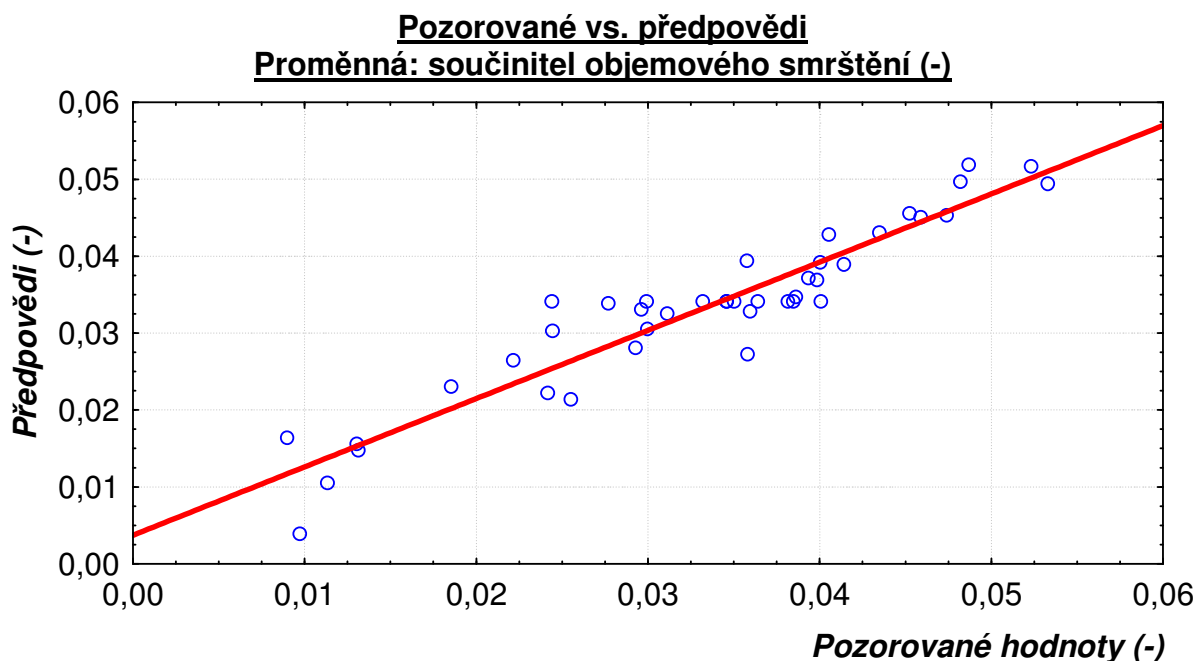
Tyto hodnoty byly také zapsány do tabulky, viz příloha 1. Pozdějším zpracováním těchto hodnot ve výše zmiňovaném statistickém softwaru, viz příloha 10, a následným vygenerováním Paretova (obr. 48) a normálního pravděpodobnostního diagramu (obr. 49) bylo zjištěno, že na sledovaný efekt mají s 95 % pravděpodobnostní spolehlivostí vliv zejména tyto faktory a jejich interakce:

- 4 doba vstřiku **negativní vliv,**
- 1 směšovací poměr **pozitivní vliv,**
- 2 teplota formy **pozitivní vliv,**
- 3 nastavení šoupátka vířivé komory **negativní vliv,**
- 6 průřez odvzdušnění **pozitivní vliv,**
- 4*6 interakce doby vstřiku a průřezu odvzdušnění **pozitivní vliv,**
- 3*4 interakce nastavení šoupátka v. k. a doby vstřiku **negativní vliv.**



Standardizovaný odhad efektu (absolut. hodn.)

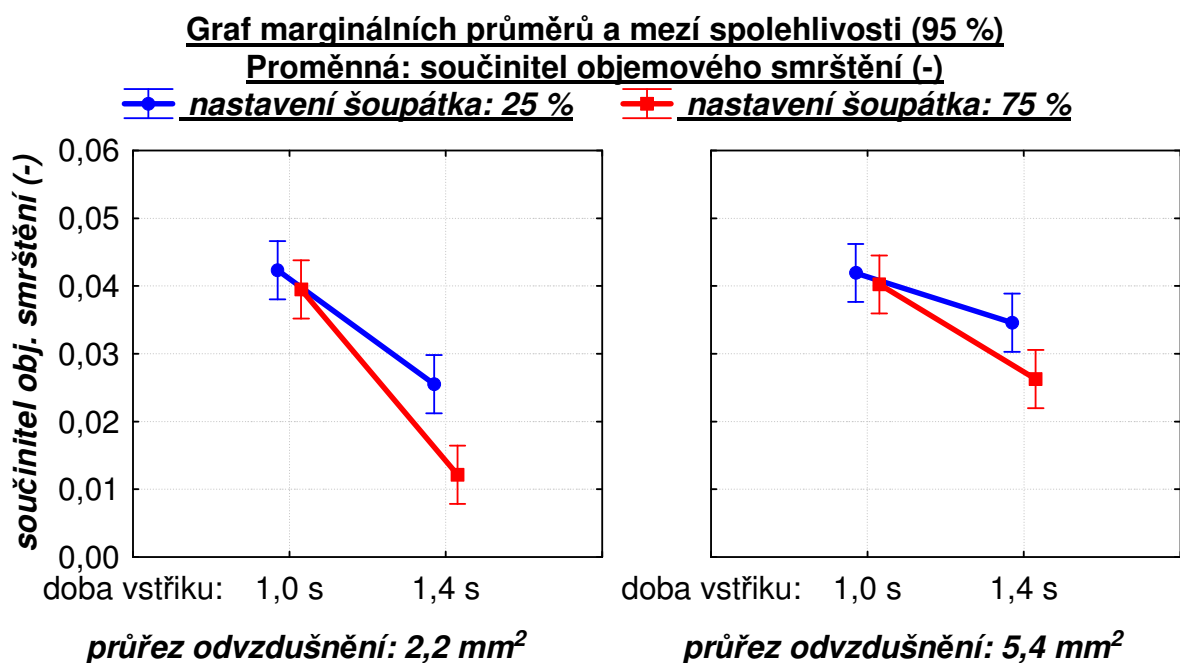
Obrázek 48 - Paretův diagram efektu pro součinitel objemového smrštění



Obrázek 49 - Normální pravděpodobnostní diagram pro součinitel objemového smrštění

Pro bližší zkoumání vzájemných interakcí jednotlivých významných faktorů (3 – nastavení šoupátka vířivé komory, 4 – doba vstřiku a 6 – průřez odvodušnění) byl následně vygenerován i graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti, viz obr. 50.

Z grafu je patrné, že ke snížení součinitele objemového smrštění výrazně přispívá polymerace materiálu za zvýšeného tlaku. Ten je vyvolán zejména snížením průřezu odvodušnění, delší dobou vstřiku a vyšším nastavením šoupátka vířivé komory, čímž zřejmě dochází k urychlení polymerační reakce a k rychlejšímu zástřiku odvodušňovacích otvorů.



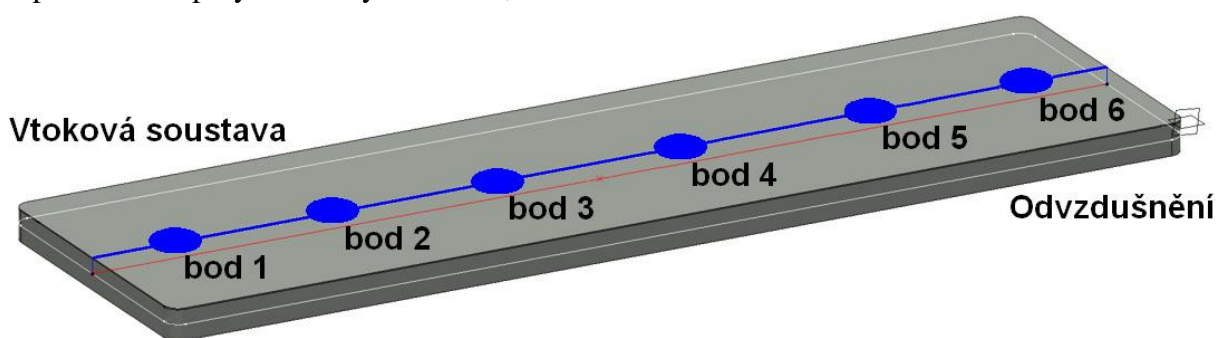
Obrázek 50 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro součinitel obj. smrštění

Výsledná rovnice modelu procesu pro sledovaný efekt (součinitel objemového smrštění) má v kódovaném tvaru pro danou mez spolehlivosti 95 % znění :

$$\underline{\text{Efekt (-)}} = 0,032932 + 0,012508*(f1) + 0,006615*(f2) - 0,006558*(f3) - 0,016379*(f4) + 0,005969*(f6) - 0,004301*(f3*f4) + 0,005720*(f4*f6)$$

4.5.8 Vyhodnocení průměrné tvrdosti vzorku

K měření tvrdosti vzorků byl použit digitální Shoreův tvrdoměr typu C pro měření pryží, pěnových či jiných porézních materiálů (viz příloha 17), předem nastavený na mód 3 (= prodleva od okamžiku přitisknutí tvrdoměru k povrchu měřeného vzorku a změření hodnoty tvrdosti je 3 sekundy). Měření probíhalo vždy v šesti přesně definovaných bodech v podélné ose polyuretanových vzorků, viz obr. 51.

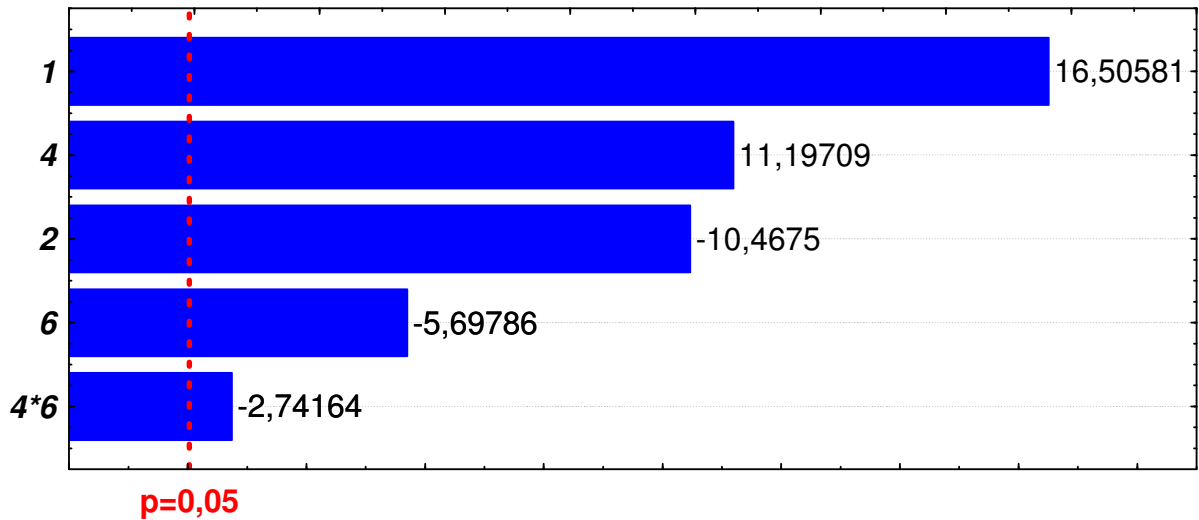


Obrázek 51 - Rozmístění měrných bodů tvrdosti

Tyto hodnoty byly postupně zapsány do tabulky, viz příloha 1. Pro zpracování ve statistickém softwaru byla v tomto případě použita jen průměrná hodnota těchto dílčích, viz příloha 11. Následným vygenerováním Paretova (obr. 52) a normálního pravděpodobnostního diagramu (obr. 53) bylo zjištěno, že na sledovaný efekt mají s 95 % pravděpodobnostní spolehlivostí vliv zejména tyto faktory a jejich interakce:

- 1směšovací poměr**pozitivní vliv,**
- 4doba vstříku**pozitivní vliv,**
- 2teplota formy**negativní vliv,**
- 6průřez odvzdušnění.....**negativní vliv,**
- 4*6interakce doby vstříku a průřezu odvzdušnění**negativní vliv.**

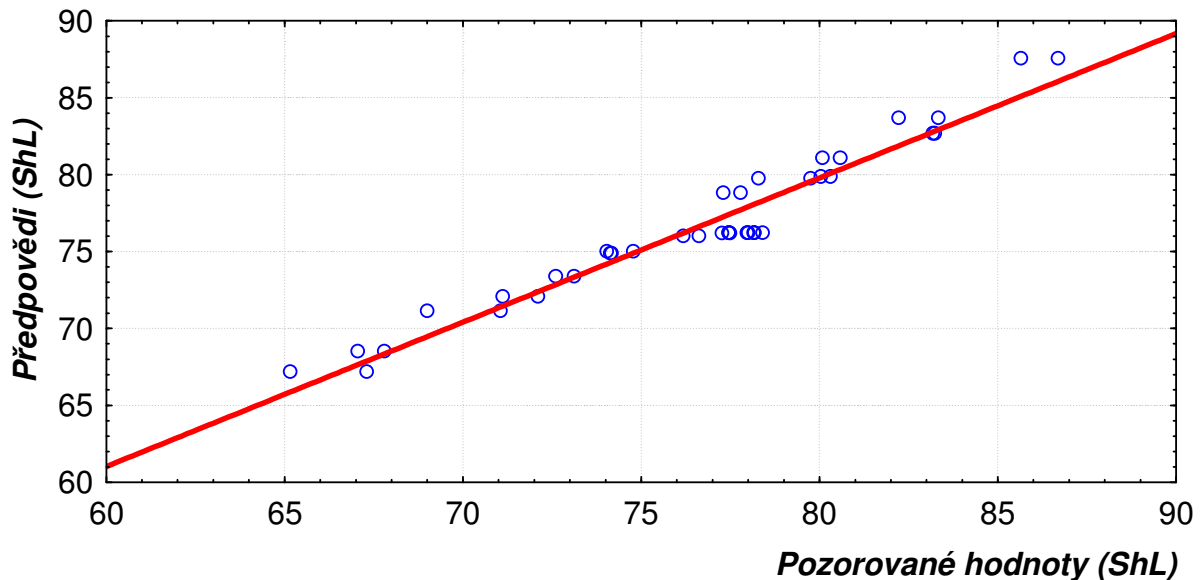
Paretův graf standardizovaných efektů
Proměnná: Tvrdost (ShL)



Standardizovaný odhad efektu (absolut. hodn.)

Obrázek 52 - Paretův diagram efektu pro tvrdost vzorků

Pozorované vs. předpovědi
Proměnná: Tvrdost (ShL)



Obrázek 53 - Normální pravděpodobnostní diagram pro tvrdost vzorků

Pro bližší zkoumání vzájemných interakcí jednotlivých významných faktorů (2 – teplota formy, 4 – doba vstřiku a 6 – průřez odvodušnění) byl následně vygenerován i graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti, viz obr. 54.

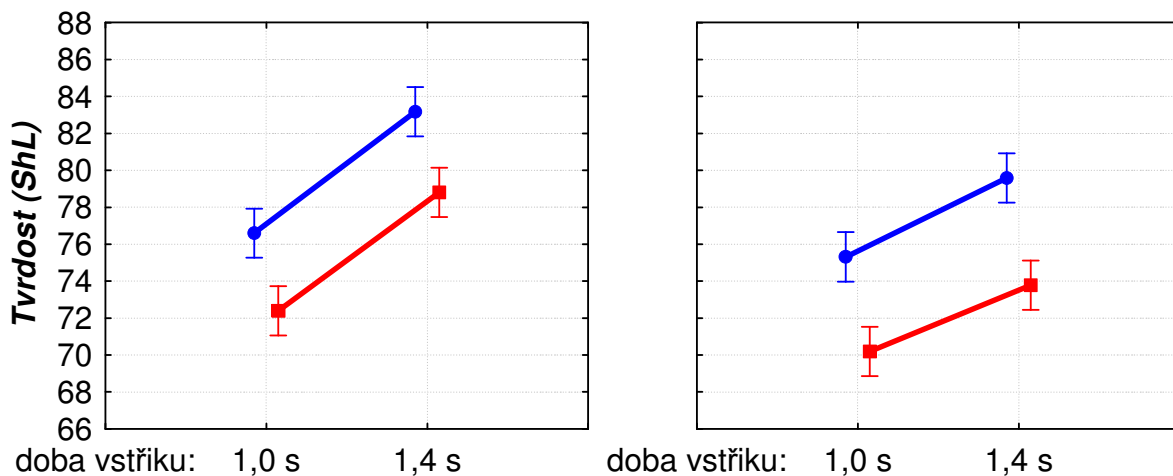
Tento graf potvrzuje, že skutečně dochází k mírné interakci doby vstřiku, jež má pozitivní vliv, a průřezu odvodušnění, který má naopak vliv na sledovaný efekt negativní.

Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti (95 %)

Proměnná: Tvrdost (ShL)

teplota formy: 45 °C

teplota formy: 65 °C



průřez odvzdušnění: 2,2 mm²

průřez odvzdušnění: 5,4 mm²

Obrázek 54 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro tvrdost vzorků

Výsledná rovnice modelu procesu pro sledovaný efekt (**průměrná tvrdost vzorku**) má v kódovaném tvaru pro danou mez spolehlivosti 95 % znění :

$$\text{Efekt (-)} = 76,75609 + 7,68229*(f1) - 4,87188*(f2) + 5,21146*(f4) - 2,60284*(f6) - 1,27604*(f4*f6)$$

4.5.9 Vyhodnocení průběhu tvrdosti vzorku

Na základě předchozího vyhodnocení byl dále zkoumán i průběh tvrdosti v podélné ose polyuretanových vzorků. Lineární regresí jednotlivých, po sobě naměřených hodnot (viz obr. 51), byla určena směrnice regresní přímky „k“, která charakterizuje průběh tvrdosti vzorků měřených od vtokové soustavy k odvzdušňovacím otvorům vstřikovací formy.

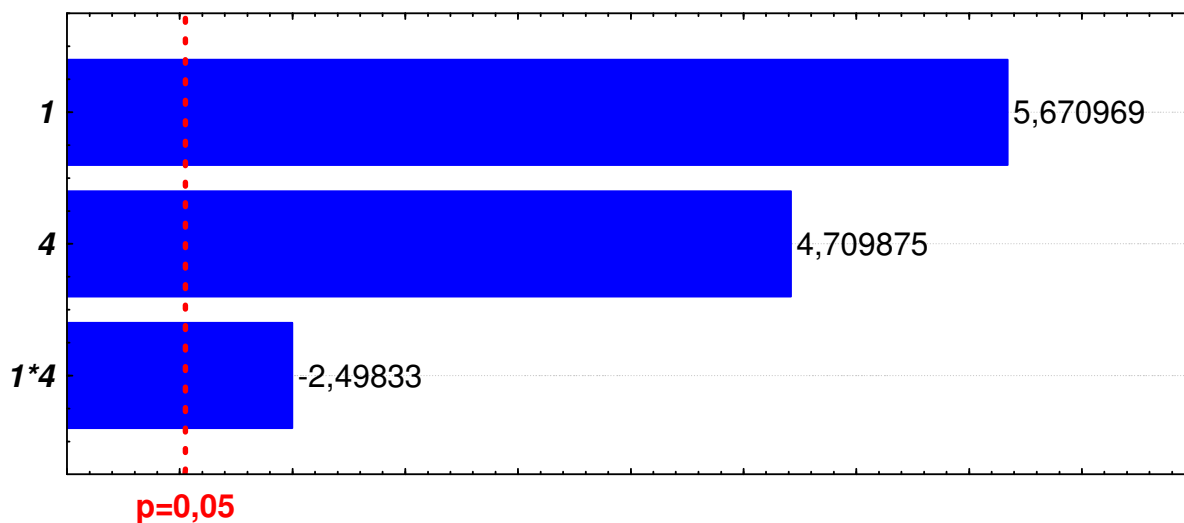
Pro směrnici přímky obecně platí:

- **k < 0**.....přímka má klesající průběh,
- **k = 0**.....přímka má konstantní průběh (rovnoběžná s osou x),
- **k > 0**.....přímka má stoupající průběh.

Tyto hodnoty byly také zapsány do tabulky, viz příloha 1. Následným zpracováním těchto hodnot ve statistickém softwaru (viz příloha 12), vygenerováním Paretova (obr. 55) a normálního pravděpodobnostního diagramu (obr. 56) bylo zjištěno, že na sledovaný efekt mají s 95 % pravděpodobnostní spolehlivostí vliv zejména tyto faktory a jejich interakce:

- 1směšovací poměr**pozitivní vliv,**
- 4doba vstřiku**pozitivní vliv,**
- 1*4interakce směšovacího poměru a doby vstřiku**negativní vliv.**

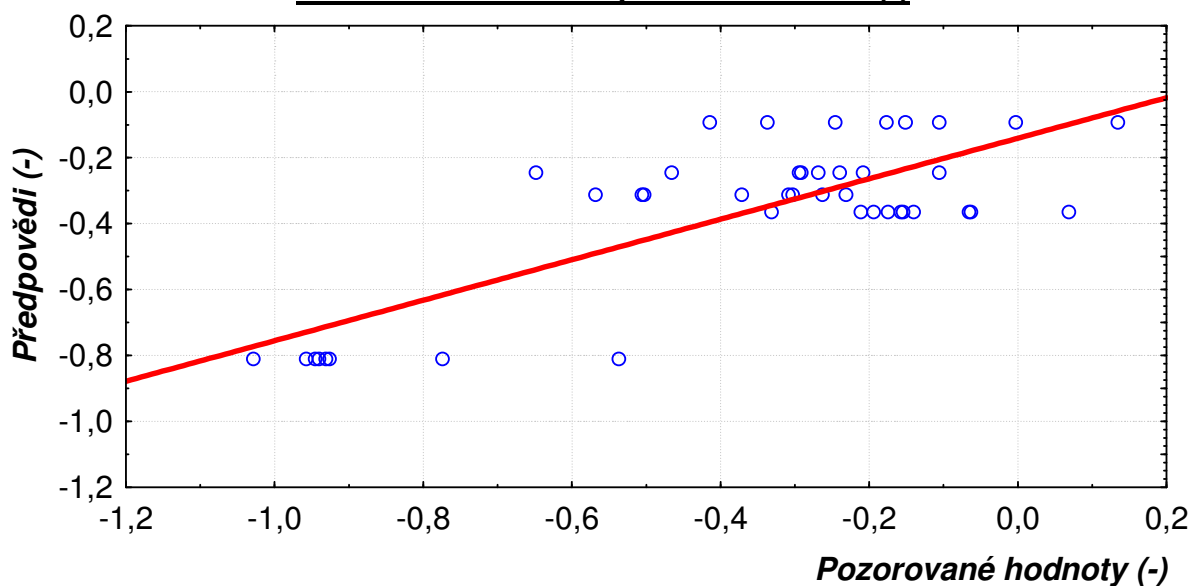
Paretův graf standardizovaných efektů
Proměnná: směrnice průběhu tvrdosti (-)



Standardizovaný odhad efektu (absolut. hodn.)

Obrázek 55 - Paretův diagram efektu pro směrnicí průběhu tvrdosti

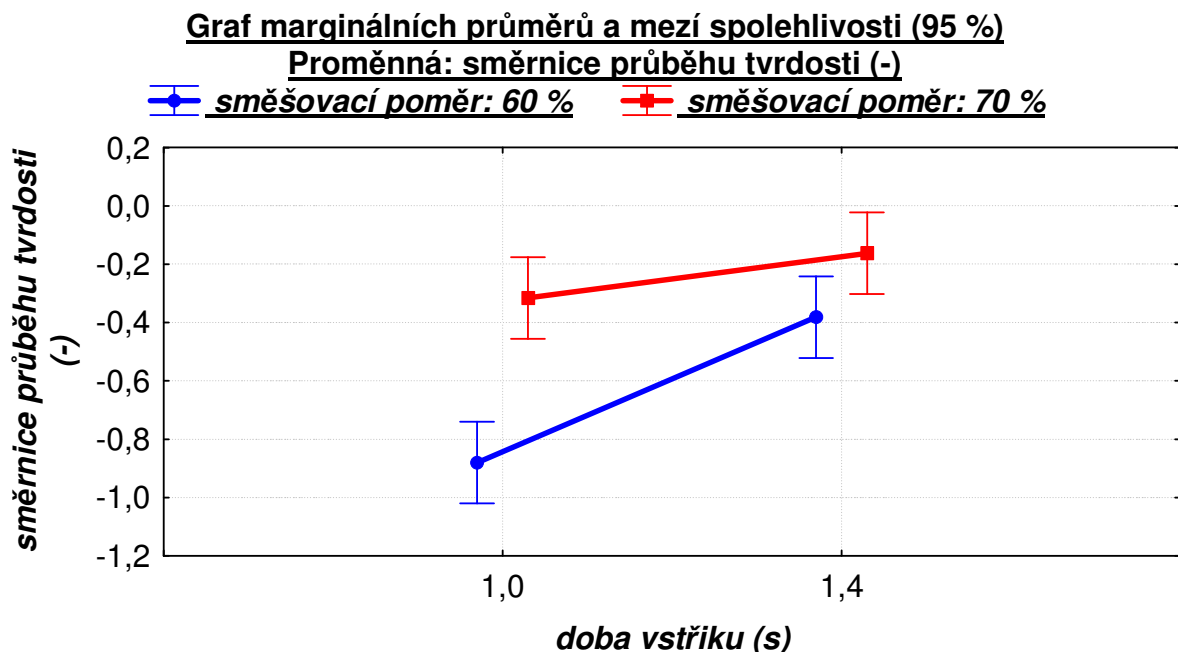
Pozorované vs. předpovědi
Proměnná: směrnice průběhu tvrdosti (-)



Obrázek 56 - Normální pravděpodobnostní diagram pro směrnicí průběhu tvrdosti

Pro bližší zkoumání vzájemných interakcí jednotlivých významných faktorů (1 – směšovací poměr a 4 – doba vstřiku) byl následně vygenerován i graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti, viz obr. 57.

Z grafu je patrná mírná interakce sledovaných faktorů, přičemž volbou vyššího směšovacího poměru a delší doby vstřiku dosáhneme rovnoměrnějšího průběhu tvrdosti v podélné ose vzorku. Výsledný efekt je navíc při nastavení vyššího směšovacího poměru méně ovlivňován změnou doby vstřiku.



Obrázek 57 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro směrnici průběhu tvrdosti

Výsledná rovnice modelu procesu pro sledovaný efekt (**průběh tvrdosti**) má v kódovaném tvaru pro danou mez spolehlivosti 95 % znění :

$$\underline{\text{Efekt (-)}} = -0,365238 + 0,391964*(f1) + 0,325536*(f4) - 0,172679*(f1*f4)$$

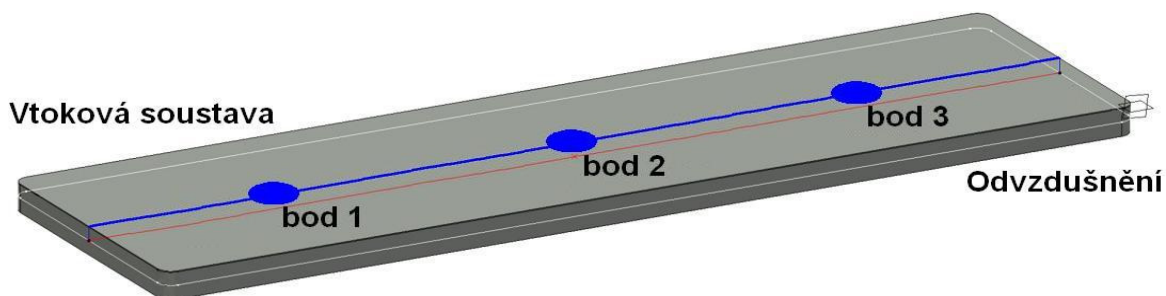
4.5.10 Vyhodnocení barevnosti vzorků

K měření barevnosti vzorků byl použit přenosný spektrofotometr Datacolor Check Plus, viz příloha 18, který byl před samotným měřením zkalibrován dle přiloženého návodu. Výstupem spektrofotometru jsou souřadnice bodu barevnosti ve standardizovaném prostoru, viz příloha 19.

Souřadnice bodu barevnosti:

- L*jas, intenzita
- a*interval spektra: zelená – červená
- b*interval spektra: modrá – žlutá

Barevnost byla vždy měřena ve třech předem definovaných bodech, viz obr. 58, přičemž spektrofotometr automaticky vyhodnotil pro daný vzorek jejich průměrnou hodnotu, viz příloha 1.



Obrázek 58 – Rozmístění měrných bodů barevnosti

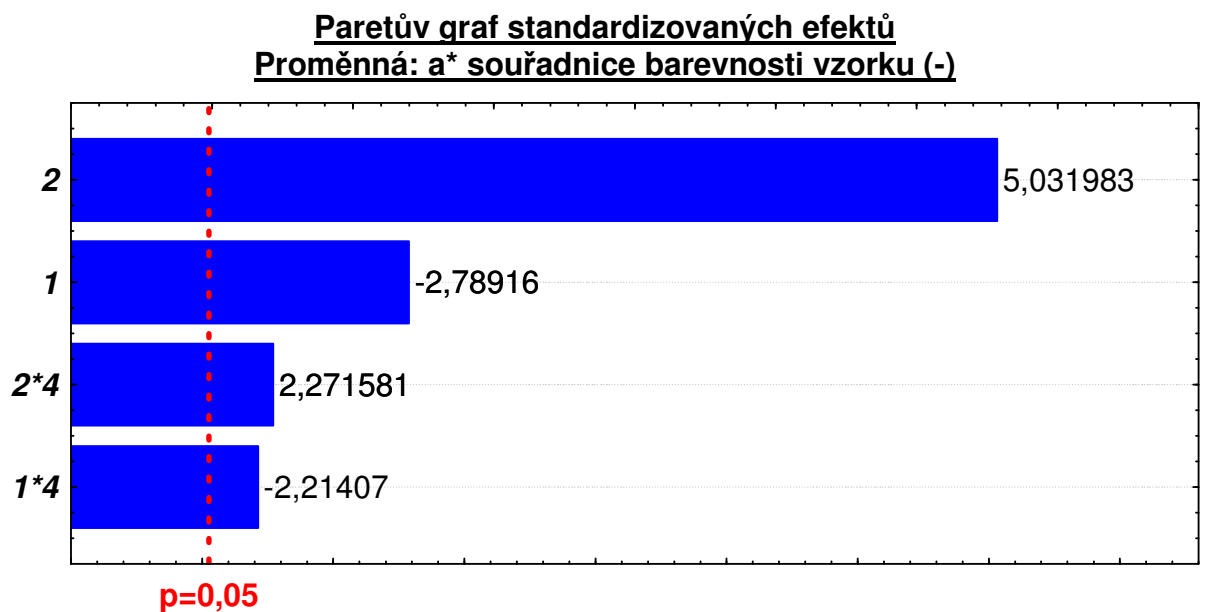
4.5.10.1 Vyhodnocení souřadnice barevnosti L*

Zpracováním hodnot souřadnic barevnosti L* ve statistickém softwaru bylo zjištěno, že s 95 % pravděpodobnostní spolehlivostí nemá na tento sledovaný efekt vliv žádný z nastavovaných faktorů.

4.5.10.2 Vyhodnocení souřadnice barevnosti a*

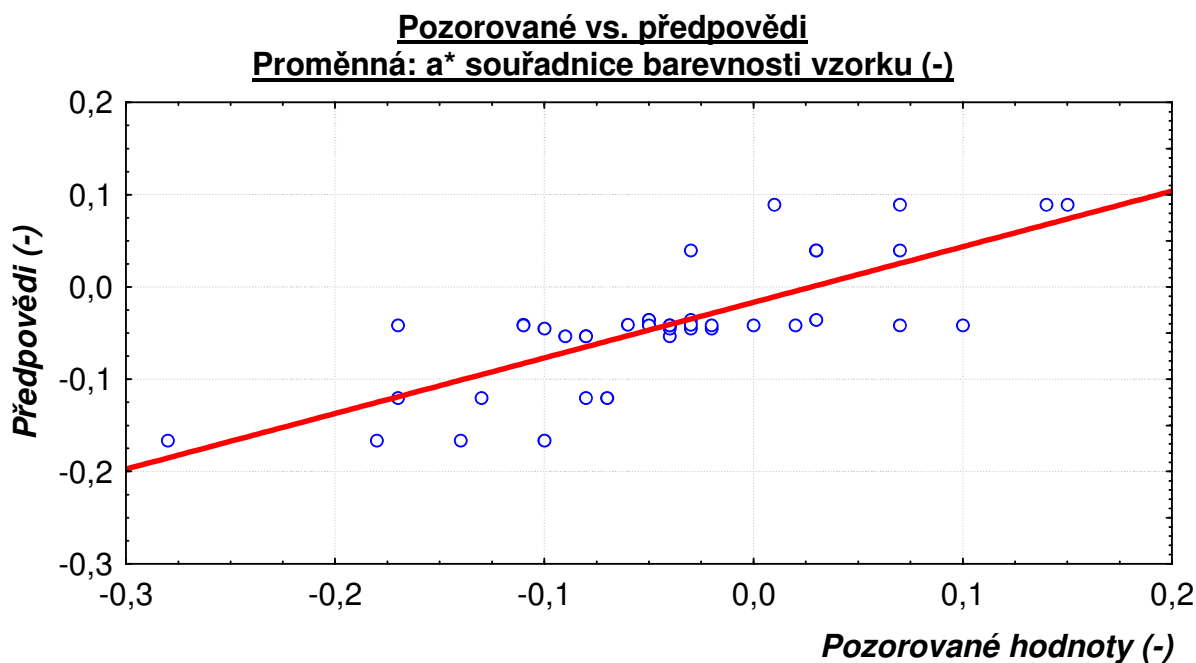
Zpracováním hodnot souřadnic barevnosti a* ve statistickém softwaru, viz příloha 13, vygenerováním Paretova (obr. 59) a normálního pravděpodobnostního diagramu (obr. 60) bylo zjištěno, že na sledovaný efekt mají s 95 % pravděpodobnostní spolehlivostí vliv zejména tyto faktory a jejich interakce:

- 2teplota formy**pozitivní vliv,**
- 1směšovací poměr**negativní vliv,**
- 2*4interakce teploty formy a doby vstřiku**pozitivní vliv,**
- 1*4interakce směšovacího poměru a doby vstřiku**negativní vliv.**



Standardizovaný odhad efektu (absolut. hodn.)

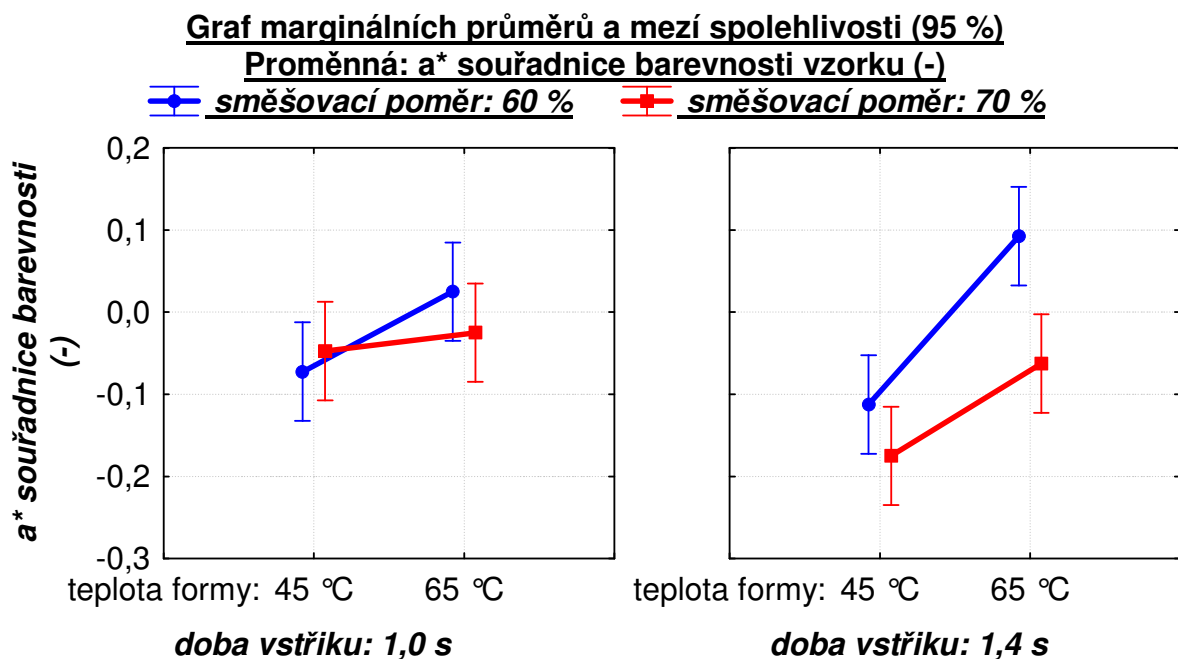
Obrázek 59 - Paretův diagram efektu pro a* souřadnici barevnosti



Obrázek 60 - Normální pravděpodobnostní diagram pro a* souřadnici barevnosti

Pro bližší zkoumání vzájemných interakcí jednotlivých významných faktorů (1 – směšovací poměr, 2 – teplota formy a 4 – doba vstřiku) byl následně vygenerován i graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti, viz obr. 61.

Tento graf především zobrazuje výrazný pozitivní vliv teploty formy a její interakci s dobou vstřiku na sledovaný efekt, dosažené zejména při nastaveném nižším směšovacím poměru. Při kratší době vstřiku je sledovaný efekt méně ovlivnitelný změnou teploty formy.



Obrázek 61 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro a* souřadnici barevnosti

Výsledná rovnice modelu procesu pro sledovaný efekt (a* souřadnice barevnosti) má v kódovaném tvaru pro danou mez spolehlivosti 95 % znění :

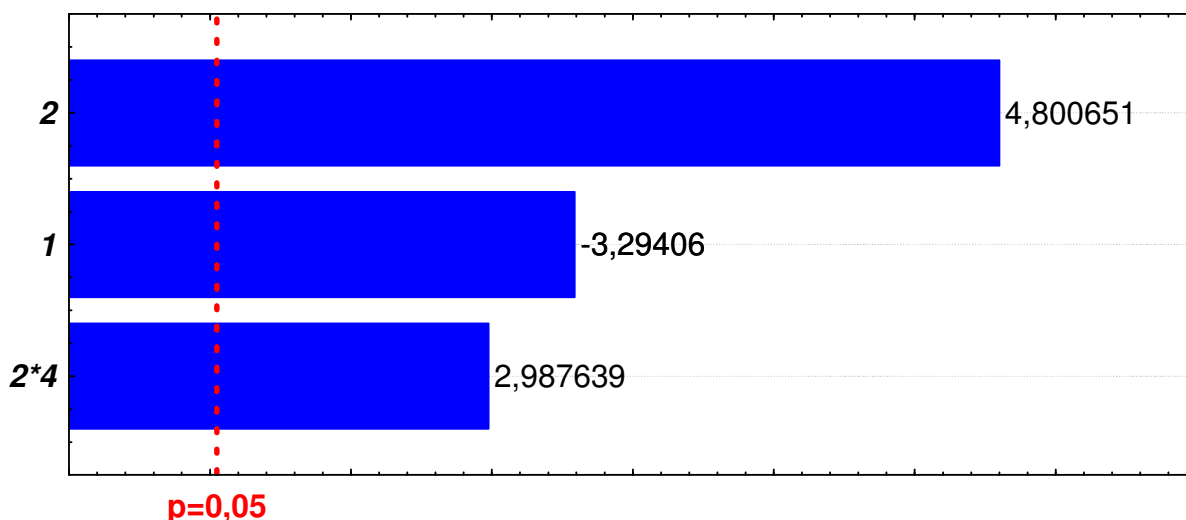
$$\underline{\text{Efekt (-)}} = -0,041667 - 0,060625*(f1) + 0,109375*(f2) - 0,048125*(f1*f4) + 0,049375*(f2*f4)$$

4.5.10.3 Vyhodnocení souřadnice barevnosti b*

Zpracováním hodnot souřadnic barevnosti b* ve statistickém softwaru, viz příloha 14, vygenerováním Paretova (obr. 62) a normálního pravděpodobnostního diagramu (obr. 63) bylo zjištěno, že na sledovaný efekt mají s 95 % pravděpodobnostní spolehlivostí vliv zejména tyto faktory a jejich interakce:

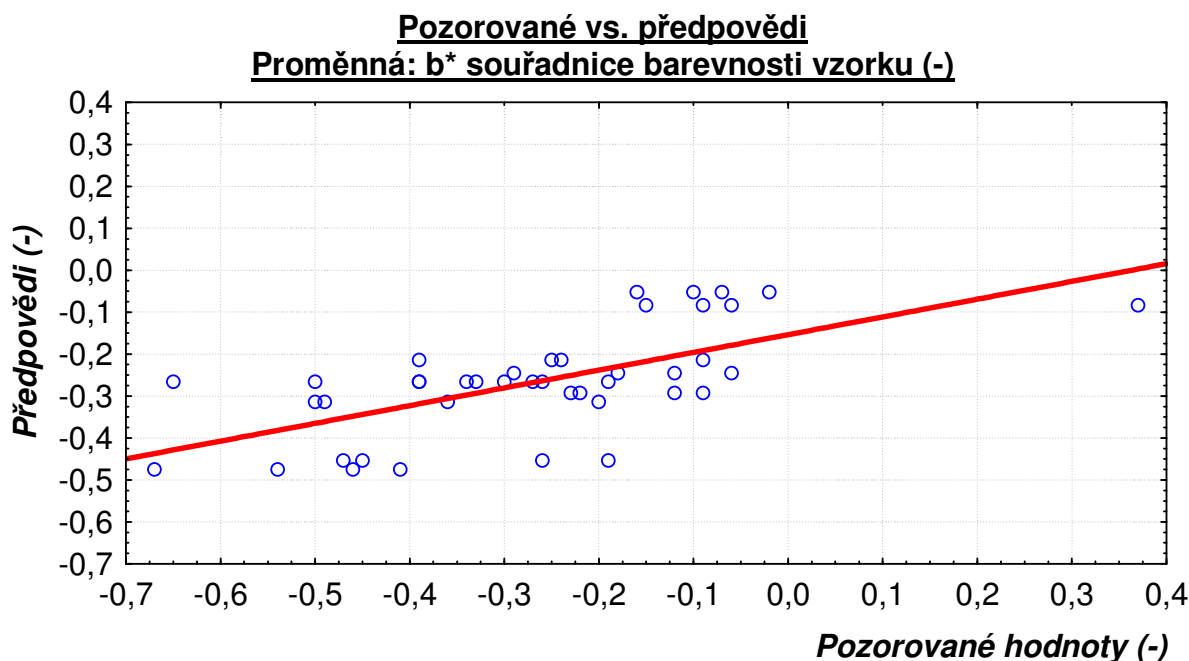
- 2teplota formy**pozitivní vliv,**
- 1směšovací poměr**negativní vliv,**
- 2*4interakce teploty formy a doby vstřiku**pozitivní vliv.**

Paretův graf standardizovaných efektů
Proměnná: b* souřadnice barevnosti vzorku (-)



Standardizovaný odhad efektu (absolut. hodn.)

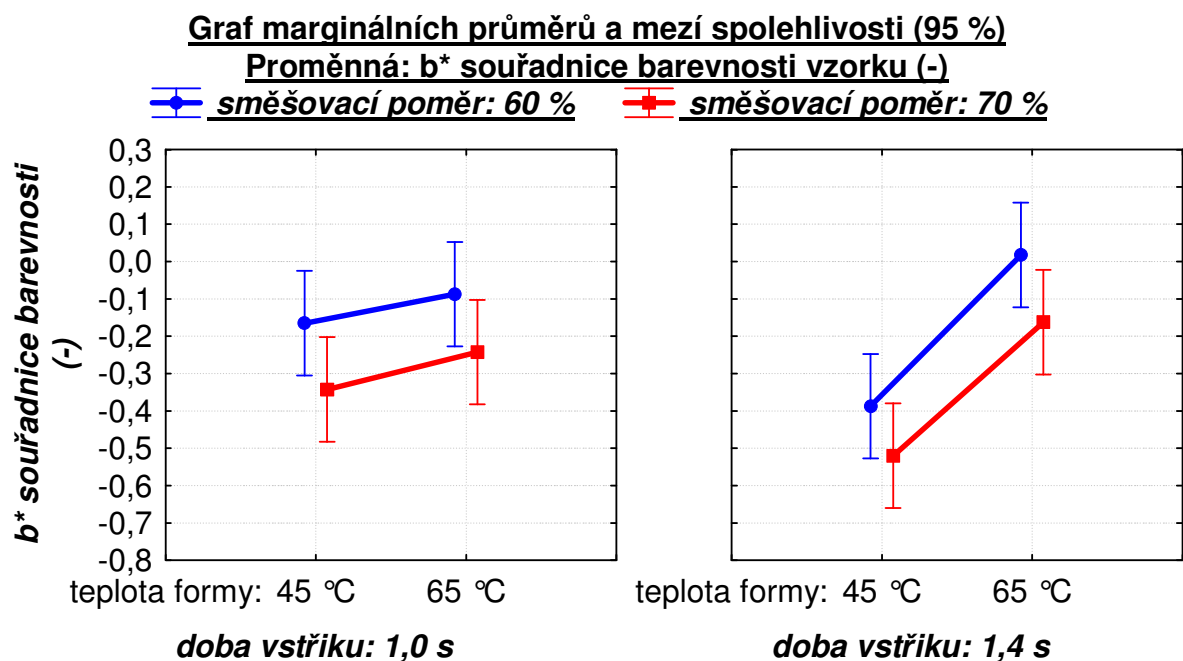
Obrázek 62 - Paretův diagram efektu pro b* souřadnici barevnosti



Obrázek 63 - Normální pravděpodobnostní diagram pro b^* souřadnici barevnosti

Při bližším zkoumání vzájemných interakcí jednotlivých významných faktorů (1 – směšovací poměr, 2 – teplota formy a 4 – doba vstřiku) v grafu marginálních průměrů a mezí spolehlivosti, viz obr. 64, docházíme k podobnému závěru jako v předchozím vyhodnocení a^* souřadnice barevnosti.

I zde je patrný významný pozitivní vliv teploty formy. Dále je zajímavé, že zvýšením doby vstřiku dochází při nižších teplotách formy k negativnímu ovlivnění sledovaného efektu a při vyšších teplotách formy k ovlivnění pozitivnímu.



Obrázek 64 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro b^* souřadnici barevnosti

Výsledná rovnice modelu procesu pro sledovaný efekt (b* souřadnice barevnosti)
má v kódovaném tvaru pro danou mez spolehlivosti 95 % znění :

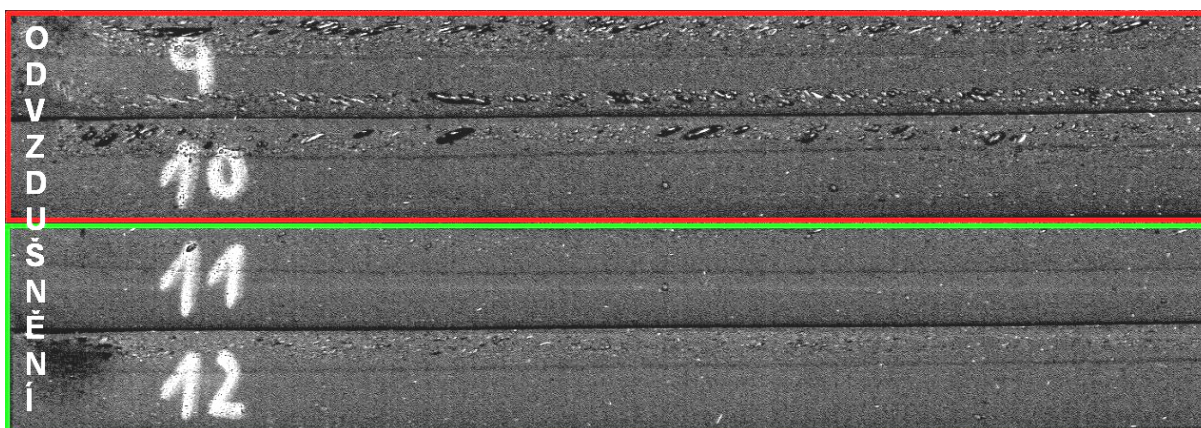
$$\underline{\text{Efekt (-)}} = - 0,266190 - 0,161250*(f1) + 0,235000*(f2) + 0,146250*(f2*f4)$$

4.5.11 Vyhodnocení struktury vzorku

Původně plánovaný záměr, vyhodnotit strukturu vzorků pomocí mikroskopu připojeného k počítači, nebylo možné uskutečnit vzhledem k velké proměnlivosti tvaru a velikosti vzduchových bublin v jakémkoliv řezu zkoumaným vzorkem. Alespoň pro názorný příklad a porovnání byly provedeny mikroskopické snímky příčných řezů dvou vzorků, s nejmenší a největší vypočítanou měrnou hmotností, viz příloha 20.

Z výše uvedeného důvodu bylo po několika dalších neúspěšných pokusech nakonec přistoupeno k metodě subjektivního ohodnocení podélných řezů jednotlivých vzorků třemi kompetentními pracovníky daného podniku, dle předem stanovených kritérií do dvou kategorií, viz obr. 65:

- ▶ **vyhovující struktura:** *kategorie „+I“ (označena zeleně)*
 - relativně jednotná struktura v celém řezu vzorku, kulovitý tvar bublinek, velikost bublinek nepřesahující 1 mm,
- ▶ **nevyhovující struktura:** *kategorie „-I,, (označena červeně)*
 - proměnlivá struktura v celém řezu vzorku, oválný až kapkovitý tvar bublinek, velikost bublinek výrazně přesahující 2 mm,



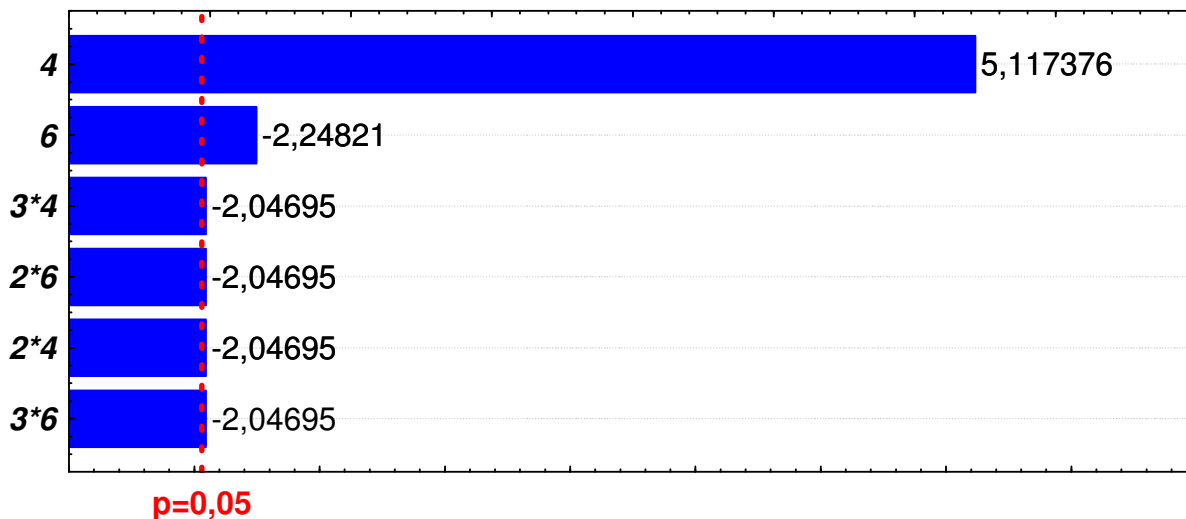
Obrázek 65 - Ukázka rozdělení vzorků při posuzování vnitřní struktury

Tyto hodnoty byly také zapsány do tabulky, viz příloha 1. Následným zpracováním ve statistickém softwaru (viz příloha 15) a vygenerováním Paretova diagramu (obr. 66) bylo zjištěno, že na sledovaný efekt mají s 95 % pravděpodobnostní spolehlivostí vliv zejména tyto faktory a jejich interakce:

- 4doba vstříku**pozitivní vliv,**
- 6průřez odvzdušnění.....**negativní vliv,**
- 3*4interakce nastavení šoupátka v. k. a doby vstříku**negativní vliv,**

- 2*6interakce teploty formy a průřezu odvodušnění.....**negativní vliv,**
- 2*4interakce teploty formy a doby vstřiku**negativní vliv,**
- 3*6interakce nastavení šoupátka a průřezu odvodušnění ..**negativní vliv.**

Paretův graf standardizovaných efektů
Proměnná: struktura vzorku (-)



Standardizovaný odhad efektu (absolut. hodn.)

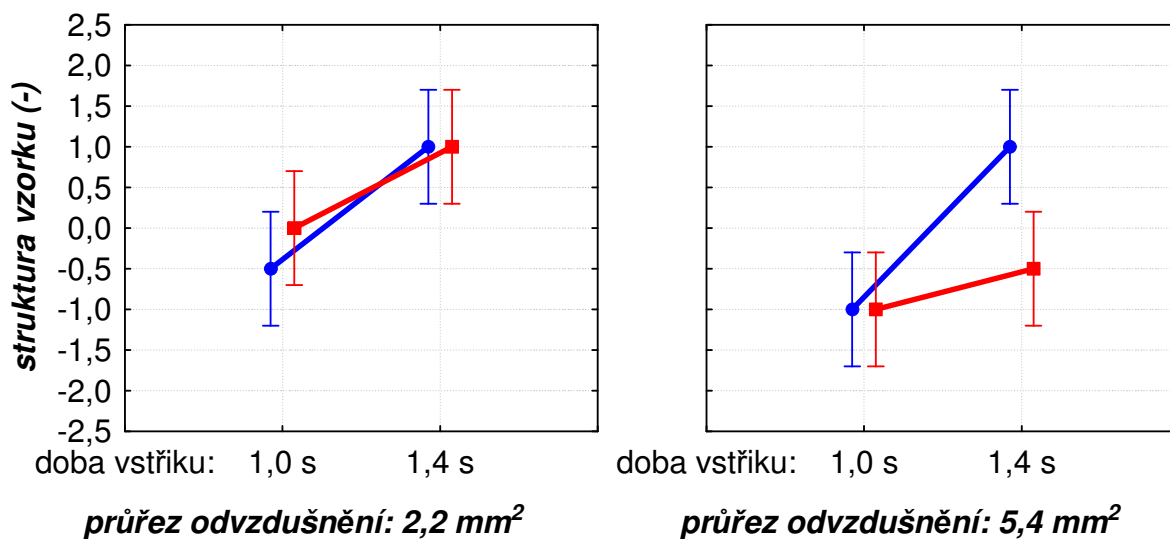
Obrázek 66 - Paretův diagram efektu pro hodnocení struktury vzorku

Pro bližší zkoumání vzájemných interakcí jednotlivých statisticky významných faktorů (2 – teplota formy, 3 – nastavení šoupátka vířivé komory, 4 – doba vstřiku a 6 – průřez odvodušnění) byly následně vygenerovány i grafy marginálních průměrů a mezí spolehlivosti, viz obr. 67 a 68.

Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti (95 %)

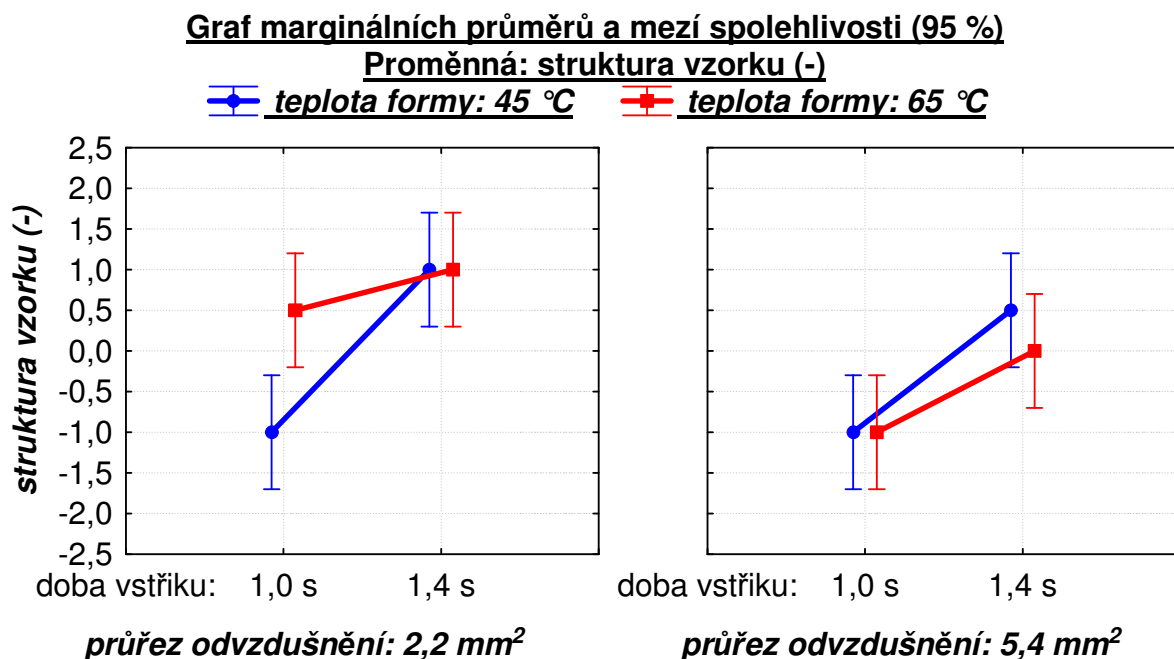
Proměnná: struktura vzorku (-)

—●— **nastavení šoupátka: 25 %**
 —■— **nastavení šoupátka: 75 %**



Obrázek 67 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro hodnocení struktury vzorku

Z grafu na obr. 67 je patrné, že k výraznému zhoršení struktury hodnocených vzorků dochází zejména v případě současného nastavení horní meze šoupátka vířivé komory a většího průřezu odvzdušnění, nebo trvale při současném nastavení spodní meze šoupátka vířivé komory a krátké doby vstřiku.



Obrázek 68 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro hodnocení struktury vzorku

Graf na obr. 68 potvrzuje významný pozitivní vliv doby vstřiku na výslednou kvalitu vnitřní struktury hodnocených vzorků. Dále je patrné, že k výraznému zhoršení tohoto sledovaného efektu dochází zejména při současném nastavení vyšší teploty formy a většího průřezu odvzdušnění.

Výsledná rovnice modelu procesu pro sledovaný efekt (struktura vzorku) má v kódovaném tvaru pro danou mez spolehlivosti 95 % znění :

$$\begin{aligned} \underline{\text{Efekt (-)}} = & 0,263761 + 1,250*(f1) - 0,539*(f6) - 0,500*(f2*f4) - 0,500*(f2*f6) \\ & - 0,500*(f3*f4) - 0,500*(f3*f6) \end{aligned}$$

5. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit komplexní přehled dostupných způsobů a možností provádění optimalizací vstřikovacího procesu polymeru a na základě těchto znalostí následně realizovat statisticky navržený experiment ve vybraném podniku. Jak již bylo popsáno v předchozích kapitolách, stěžejním důvodem provádění veškerých optimalizací je obvykle snaha podniku o minimalizaci výrobních nákladů či zvýšení kvality vyráběného produktu. V případě zmiňovaného podniku bylo hlavním úkolem nejprve ověřit proveditelnost statisticky navrženého experimentu ve výrobním procesu a dále určit vlivy vybraných parametrů procesu na sledované veličiny finálního produktu. Před zahájením samotného experimentu bylo však nezbytné daný proces nejprve dlouhodobě pozorovat ve snaze pochopit veškeré souvislosti různorodých chemicko-fyzikálních dějů.

Po naplánování experimentu, výrobě vzorků a změření hodnot sledovaných veličin nastala fáze vyhodnocování pomocí statistického softwaru. Sumarizací výsledků jednotlivých dílčích analýz bylo formulováno několik následujících závěrů:

Nejvýznamnějším parametrem vstřikovacího procesu je ***doba vstřiku***, která výrazně zvyšuje, dle očekávání, veškeré přetoky materiálu, výslednou hmotnost vzorku, což má za následek i snížení hodnot součinitele objemového smrštění, zlepšení vnitřní struktury a také podstatně zkracuje čas pro naplnění celé dutiny formy. Druhotně, avšak stále významně, pozitivně ovlivňuje průběh a průměrnou hodnotu tvrdosti a interakčně ovlivňuje i barevnost vzorků (pozn. vzorky byly vyrobeny bez nanesení laku do dutiny formy).

Dalším významným parametrem je ***směšovací poměr*** vstupních komponent, jenž má zásadní pozitivní vliv na průběh a průměrnou hodnotu tvrdosti. Naopak jeho snížením dochází výraznou měrou k redukci hodnot součinitele délkového a objemového smrštění. Dále zkracuje čas potřebný pro vyplnění dutiny formy, negativně ovlivňuje barevnost a hmotnost vzorků a mírně zvyšuje přetoky materiálu.

Třetím nejvýznamnějším vstupním parametrem je ***teplota formy***, jejímž zvýšením dochází ke snížení času potřebného pro vyplnění dutiny formy a dále má pozitivní vliv na barevnost vzorků. Jejím snížením jsme naopak schopni výrazně zvýšit průměrnou hodnotu tvrdosti vzorku, velkou měrou snížit hodnotu součinitele délkového a objemového smrštění, nepatrně zvýšit hmotnost a zlepšit stav vnitřní struktury vzorků.

V pořadí dalším nastavovaným faktorem byl ***celkový průřez odzdušnění***. Z dílčích analýz vyplývá, že minimalizací tohoto parametru jsme schopni poměrně snadno zvýšit průměrnou hodnotu tvrdosti vzorku, přispět ke snížení součinitele objemového smrštění, omezit přetoky materiálu vně formy, zvýšit hmotnost vzorků a zlepšit stav jejich vnitřní struktury.

Předposledním sledovaným parametrem bylo ***nastavení šoupátka vířivé komory***, jehož seřízením na vyšší hodnotu jsme především schopni snížit součinitel délkového a

objemového smrštění a snížit výslednou hmotnost vtoku. Zároveň však dochází ke zhoršení stavu vnitřní struktury vzorků a ke zvýšení přetoku do dělicí roviny.

Posledním ze sledovaných parametrů je *doba náklonu* vstřikovací formy, přičemž tento faktor má pro danou 95 % pravděpodobnostní spolehlivost prokázaný pouze mírný pozitivní vliv na přetok materiálu do dělicí roviny a slabou pozitivní interakci s průřezem odvzdušnění na součinitel délkového smrštění. V praxi se tento parametr využívá spíše pro snazší odplynění dutiny formy náklonem celé vstřikovací formy.

Z důvodu počátečního návrhu experimentu s nižším stupněm rozlišení, sloužícího především k primárnímu zmapování vstřikovacího procesu, však nebylo možné v závěru sestavit jeho výsledný model s odpovídající pravděpodobnostní spolehlivostí. Řešením je navržení dalšího experimentu, tentokrát s vyšším stupněm rozlišení, který nám umožní zkoumat i případné interakce vyšších řádů a najít optimální nastavení veškerých říditelných faktorů pro daný vstřikovací proces.

6. Seznam použité literatury

- [1] KRATOCHVÍL B., ŠVORČÍK V. VOJTĚCH D.: *Úvod do studia materiálů*, 1. vydání, Praha: VŠCHT, 2005, 190 stran, ISBN 80-7080-568-4
- [2] RAGAN E., RUŽBARSKÝ J. a kolektiv: *Vstrikovanie a spracovanie plastických hmot*, 1. vydání, Prešov, 2008, 559 stran, ISBN 978-80-553-0102-0
- [3] MILLER Ivan: *DOE – Návrh a analýza experimentu s pomocí MINITAB®*, 1. vydání, Praha: Interquality, 2010, 122 stran, ISBN 978-80-902770-5-2
- [4] LEPPKES Reinhard: *Polyurethane*, 1. vydání, Verlag moderne industrie: Elastogran, 72 stran, ISBN 3-478-93100-2
- [5] MM Průmyslové spektrum: *Plastové části strojů a strojírenských zařízení*
Publikováno 12.4.2006 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/specialni-priloha-cast-i-plastove-casti-stroju-a-strojirenskych-zarizeni>
- [6] MM Průmyslové spektrum: *Svět plastů*
Publikováno 16.2.2011 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/svet-plastu>
- [7] MM Průmyslové spektrum: *Od plastů se v roce 2010 očekávalo více*
Publikováno 16.2.2011 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/od-plastu-se-v-roce-2010-ocekavalo-vice>
- [8] Plastics – Make it possible: *Driving Innovation*
Publikováno 1.10.2009 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://plasticmakeitpossible.com/2009/11/driving-innovation-how-plastics-are-making-vehicles-more-fuel-efficient/>
- [9] Sabic – *High-Tech Solutions in Aircraft and Rail*
Publikováno 1.3.2010 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://www.sabic-europe.com/k2010/media/SABIC%20Innovative%20Plastics-Mass%20Transportation%20Presentation.pdf>
- [10] MM Průmyslové spektrum: *Výroba plastů ve světě roste*
Publikováno 2.2.2005 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/vyroba-plastu-ve-svete-roste>
- [11] MM Průmyslové spektrum: *Řízení jakosti v souvislosti se vstupem do EU*
Publikováno 15.6.2005 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/rizeni-jakosti-v-souvislosti-se-vstupem-do-eu-2>
- [12] MM Průmyslové spektrum: *Požadavky na kvalitu a reálné možnosti vstřikování*
Publikováno 3.2.2010 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/pozadavky-na-kvalitu-a-realne-moznosti-technologie-vstrikovani>
- [13] MM Průmyslové spektrum: *Snižování výrobních nákladů pomocí simulační analýzy*
Publikováno 3.2.2010 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/snizovani-vyrobnich-nakladu-pomoci-simulacni-analyzy>

- [14] Smartplast: *Snižování výrobních nákladů pomocí analýzy vstříkovacího procesu*
Publikováno 15.4.2010 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
http://www.smartplast.cz/data/smartplast/halaska_snizovani_vyrobnych_nakladu_prezen_tace_cz.pdf
- [15] Wikipedie: *Polymer*
Publikováno 17.2.2011 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Polymery>
- [16] VŠCHT – Švorčík Václav: *Polymery*
Publikováno 1.10.2009 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
http://www.vscht.cz/ipl/osobni/svorcik/skripta/tyden_1.pdf
- [17] University of Connecticut : *Polymers*
Publikováno 10.1.2009 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://www.ims.uconn.edu/~avd/PhysicsGroup/polymers.html>
- [18] Technická univerzita Liberec: *Plasty a jejich zpracovatelské vlastnosti*
Publikováno 1.10.2009 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [19] Wikipedie: *Makromolekulární chemie*
Publikováno 14.1.2011 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
http://cs.wikipedia.org/wiki/Makromolekul%C3%A1rn%C3%AD_chemie
- [20] Wikipedie: *Plast*
Publikováno 11.3.2011 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Plast>
- [21] SWEB: *Rozdělení plastů a jejich průmyslové zpracování*
Publikováno .10.6.2010 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://ucivozs.web.cz/plast2.html>
- [22] Technik: *Začalo století plastů*
Publikováno .12.8.2002 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
http://technik.ihned.cz/c4-10015300-11352820-800000_d-zacalo-stoleti-plastu
- [23] Masarykova univerzita: *Keramika, kompozity, polymery*
Publikováno .10.9.2009 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://www.ped.muni.cz/wphy/FyzV1a/FMkomplet3.htm>
- [24] Technická univerzita Liberec: *Rozdělení technologií na zpracování plastů*
Publikováno 1.10.2009 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/02.htm
- [25] Technická univerzita Liberec: *Úvod do strojírenství*
Publikováno 1.10.2009 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
http://www.ksd.tul.cz/studenti/texty/uvod_do_strojirenstvi/UdS-5pr.pdf
- [26] Technická univerzita Liberec: *Vstříkování plastů*
Publikováno 1.10.2009 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/04.htm

- [27] Wikipedie: *Celuloid*
Publikováno 19.2.2011 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Celuloid>
- [28] Wikipedia: *Injection molding*
Publikováno 12.3.2011 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
http://en.wikipedia.org/wiki/Injection_molding
- [29] MM Průmyslové spektrum: *Historie a rozvoj vstřikování plastů v ČR*
Publikováno 3.2.2010 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://www.mmspektrum.com/clanek/historie-a-rozvoj-vstrikovani-plastu-v-cr>
- [30] Vesmír: *Quo vadete, polymery?*
Publikováno 1.3.2009 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://www.vesmir.cz/files/file/fid/5578/aid/8220>
- [31] Technická univerzita Liberec: *Vstřikování*
Publikováno 1.10.2009 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/tzn/c8/vstrikovani.pdf
- [32] Technická univerzita Liberec: *Speciální způsoby vstřikování plastů*
Publikováno 1.10.2009 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/05.htm
- [33] Technická univerzita Liberec: *Vstřikování reaktoplastů*
Publikováno 1.10.2009 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/05-specialni%20vstrikovani/27-vstrikovani%20reaktoplastu.jpg
- [34] iStrojrenstvi: *Snižování výrobních nákladů pomocí Autodesk® Moldflow® analýzy*
Publikováno 3.3.2010 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://strojrenstvi.beseen.cz/clanky/precist.php?nazev=snizovani-vyrobnich-nakladu-pomoci-autodesk-moldflow-analyzy&id=21&rubric=3&subrubric=19>
- [35] Synext: *Krycí příspěvky a bod zvratu*
Publikováno 1.7.2008 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://www.synext.cz/kryci-prispevky-a-bod-zvratu.html>
- [36] PlasticPortal: *Optimalizace designu dílu a formy pomocí Moldex3D®*
Publikováno 10.6.2010 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://www.plasticportal.eu/sk/optimalizace-designu-dilu-a-formy-pomoci-moldex3d/c/6>
- [37] Inovace: *3D software pro simulaci vstřikování plastů*
Publikováno 10.11.2009 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://www.inovace.cz/for-high-tech/strojrenstvi/clanek/3d-software-pro-simulaci-vstrikovani-plastu/>
- [38] Innomia: *Konformní chlazení forem*
Publikováno 15.5.2010 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://www.innomia.cz/cs/konformni-chlazení-forem>

- [39] Interquality: *DOE – průmyslový experiment*
Publikováno 10.11.2010 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://www.interquality.cz/DOEpr%C5%AFmyslov%C3%BDexperiment/tabid/228/Default.aspx>
- [40] Interquality: *Co je statisticky navržený experiment?*
Publikováno 10.11.2010 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://www.interquality.cz/INTERN%C3%8DKURZY/DOEInterquality/tabid/79/Default.aspx>
- [41] Fórum průmyslového inženýrství: *Metoda DOE*
Publikováno 20.8.2010 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://fpi.i2m.cz/doi>
- [42] Wikipedia: *Design of experiments*
Publikováno 17.3.2011 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
http://en.wikipedia.org/wiki/Design_of_experiments
- [43] Národní informační středisko pro podporu jakosti: *Navrhování experimentů DOE*
Publikováno 20.10.2005 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://www.isq.cz/npj/6%20-%20DOE-NPJ%20-%201.ppt>
- [44] Ozen Engineering: *DOE result*
Publikováno 12.3.2009 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
http://www.ozeninc.com/images/dx1_lg.jpg
- [45] TRW Czech Republic: *Historie*
Publikováno 18.5.2009 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://www.trwczech.cz/horni-pocernice/o-nas/historie>
- [46] Wikipedie: *Polyuretan*
Publikováno 1.2.2011 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Polyuretan>
- [47] Wikipedia: *Polyurethane*
Publikováno 28.3.2011 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Polyurethane>
- [48] GEM-Chem: *High pressure mixing heads – PU RIM Technology*
Publikováno 1.5.2008 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://www.gem-chem.net/mixheads.html>
- [49] ČVUT Fakulta stavební: *Smršťování*
Publikováno 1.10.2010 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
http://ceg.fsv.cvut.cz/CZ/misc/jirka/vyuka/lpg/06_SMRSTOVANI.pdf
- [50] Plastinum: *The global plastics industry: continued growth*
Publikováno 20.7.2009 [cit. 2011-03-20]. Dostupné z:
<http://www.plastinum.com/plastinum/Plastic-Industry-Recycling/The-global-plastics-industry-continued-growth>

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Světová produkce polymerů za období 1950 - 2006 [50].....	1
Obrázek 2 - Opodstatnění optimalizačních procesů ve výrobním podniku [14].....	2
Obrázek 3 - Příklad polymeru (Polyethylen) [17].....	4
Obrázek 4 - Základní klasifikace polymerů z hlediska jejich vlastností [1].....	4
Obrázek 5 - Světová spotřeba plastů ve vybraných průmyslových odvětvích v roce 2003 [1] ..	5
Obrázek 6 - Základní typy struktury polymerů [23].....	6
Obrázek 7 - Časové rozložení objevů nových polymerů v průběhu 20. století [30].....	9
Obrázek 8 - Princip vstřikovacích strojů: a) pístové, b) šnekové [31].....	9
Obrázek 9 - Struktura plastikářského průmyslu ČR v roce 2002 [22].....	10
Obrázek 10 - Vstřikovací cyklus termoplastu [26].....	11
Obrázek 11 - Vstřikovací cyklus – průběh vnitřního tlaku [31].....	12
Obrázek 12 - Způsob odplynění formy jejím pootevřením [33]	13
Obrázek 13 - Příklad použití dílců z vyztužených termoplastů v automobilu [32]	16
Obrázek 14 - Grafické znázornění zvýšení zisku podniku vlivem optimalizace výrobního procesu; (1) – před optimalizací, (2) – po optimalizaci [35].....	18
Obrázek 15 - Týmy realizující vývoj a přípravu výroby plastového dílu [34]	19
Obrázek 16 - Predikce uzavírání vzduchu pomocí simulačního software (vlevo) a porovnání s reálným výliskem (vpravo) [37].....	20
Obrázek 17 - Varianty provedení chladicího okruhu vstřikovací formy [38].....	20
Obrázek 18 - Taguchiho ztrátová funkce [3]	22
Obrázek 19 - Hledání v experimentálním prostoru [40].....	22
Obrázek 20 - Paretův diagram (vlevo) a Normální pravděpodobnostní diagram (vpravo) [3]	23
Obrázek 21 - Interpretace grafů interakcí [43].....	24
Obrázek 22 - Příklad odezvové plochy DoE (A, B, C – vstupní faktory) [44]	24
Obrázek 23 - Strukturní vzorec uretanové skupiny [4]	25
Obrázek 24 - Chemický vzorec reakce izokyanátu s vodou [47].....	26
Obrázek 25 - Fotografické znázornění procesu pění polyuretanu [4]	26
Obrázek 26 - Schematicky znázorněný systém vstřikování polyuretanu [4]	28
Obrázek 27 - Schematicky znázorněný princip a funkce vstřikovací jednotky RIM [48].....	29
Obrázek 28 - Ishikawův diagram [3]	30
Obrázek 29 - Měření dutiny formy	32
Obrázek 30 - Paretův diagram efektu pro hmotnost vzorku.....	34
Obrázek 31 - Normální pravděpodobnostní diagram pro hmotnost vzorku.....	34
Obrázek 32 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro hmotnost vzorku.....	35
Obrázek 33 - Paretův diagram efektu pro hmotnost přetoku do dělicí roviny.....	36
Obrázek 34 - Normální pravděpodobnostní diagram pro hmotnost přetoku do dělicí roviny.	36

Obrázek 35 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro hmotnost přetoku do dělicí roviny.....	37
Obrázek 36 - Paretův diagram efektu pro hmotnost přetoku od vzdušněním	38
Obrázek 37 - Normální pravděpodobnostní diagram pro hmotnost přetoku od vzdušněním ...	38
Obrázek 38 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro hmotnost přetoku od vzd.	39
Obrázek 39 - Paretův diagram efektu pro hmotnost vtoku.....	40
Obrázek 40 - Normální pravděpodobnostní diagram pro hmotnost vtoku.....	40
Obrázek 41 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro hmotnost vtoku.....	41
Obrázek 42 - Paretův diagram efektu pro čas přetoku pěny.....	42
Obrázek 43 - Normální pravděpodobnostní diagram pro čas přetoku pěny.....	42
Obrázek 44 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro čas přetoku pěny	43
Obrázek 45 - Paretův diagram efektu pro součinitel délkového smrštění.....	44
Obrázek 46 - Normální pravděpodobnostní diagram pro součinitel délkového smrštění.....	44
Obrázek 47 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro součinitel dél. smrštění..	45
Obrázek 48 - Paretův diagram efektu pro součinitel objemového smrštění.....	46
Obrázek 49 - Normální pravděpodobnostní diagram pro součinitel objemového smrštění	47
Obrázek 50 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro součinitel obj. smrštění..	47
Obrázek 51 - Rozmístění měrných bodů tvrdosti.....	48
Obrázek 52 - Paretův diagram efektu pro tvrdost vzorků	49
Obrázek 53 - Normální pravděpodobnostní diagram pro tvrdost vzorků	49
Obrázek 54 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro tvrdost vzorků	50
Obrázek 55 - Paretův diagram efektu pro směrnici průběhu tvrdosti.....	51
Obrázek 56 - Normální pravděpodobnostní diagram pro směrnici průběhu tvrdosti.....	51
Obrázek 57 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro směrnici průběhu tvrdosti	52
Obrázek 58 – Rozmístění měrných bodů barevnosti	52
Obrázek 59 - Paretův diagram efektu pro a^* souřadnici barevnosti.....	53
Obrázek 60 - Normální pravděpodobnostní diagram pro a^* souřadnici barevnosti.....	54
Obrázek 61 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro a^* souřadnici barevnosti	54
Obrázek 62 - Paretův diagram efektu pro b^* souřadnici barevnosti.....	55
Obrázek 63 - Normální pravděpodobnostní diagram pro b^* souřadnici barevnosti.....	56
Obrázek 64 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro b^* souřadnici barevnosti	56
Obrázek 65 - Ukázka rozdělení vzorků při posuzování struktury.....	57
Obrázek 66 - Paretův diagram efektu pro hodnocení struktury vzorku	58
Obrázek 67 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro hodnocení struktury vzorku	58
Obrázek 68 - Graf marginálních průměrů a mezí spolehlivosti pro hodnocení struktury vzorku	59

Seznam použitých zkratk

DoE.....	Design of Experiments	Statisticky navržený experiment
RIM.....	Reaction Injection Molding	Reakční vstřikování
GIT	Gas Injection Technology.....	Vstřikování plastů s podporou plynu
WIT.....	Water Injection Technology	Vstřikování plastů s podporou vody
PIM.....	Powder Injection Molding	Vstřikování polymerů s prášky
DMLS	Direct Metal Laser Sintering	Laserové spékání kovových prášků
ANOVA.....	Analysis Of Variance.....	Analýza rozptylu
SWS.....	Steering Wheel Systems	Systémy automobilových volantů
OSS.....	Occupant Safety Systems	Systémy bezpečnosti cestujících
3D	3Dimension.....	Trojrozměrný (prostor)
UF .....	.....	Močovina-formaldehyd
PF.....	.....	Fenol-formaldehyd
PEO.....	.....	Polyethylenoxid
PUR .....	.....	Polyuretan
PIB .....	.....	Polyisobutylen
PET.....	.....	Polyethylentereftalát
PA.....	.....	Polyamid
SBR.....	.....	Butadienstyrenový kaučuk
LDPE .....	.....	Lehčený polyethylen
PMMA.....	.....	Polymethylmethakrylát
BR.....	.....	Butadienový kaučuk
PS.....	.....	Polystyren
PVC .....	.....	Polyvinylchlorid
PPS .....	.....	Polyfenylsulfid
POM .....	.....	Polyoxymethylen
PAR .....	.....	Polyakrylát
PTFE.....	.....	Polytetrafluorethylen
EPM.....	.....	Ethylenpropylenový kaučuk
EPDM.....	.....	Ethylenpropylendien
PP.....	.....	Polypropylen
HDPE.....	.....	Tvrzený polyethylen
ABS .....	.....	Terpolymer akrylonitrilu, butadienu a styrenu
PAN .....	.....	Polyakrylonitril
PBT.....	.....	Polybutylentereftalát
PEEK .....	.....	Polyetheretherketon
PES .....	.....	Polyethersulfon
PIB .....	.....	Polyisobutylen
PEI .....	.....	Polyetherimid

7. Přílohy

Příloha 1 – Tabulka naměřených a dopočtených hodnot	I
Příloha 2 – Průběh obsahu dusíku a teploty polyolu během provádění experimentu	V
Příloha 3 – Průběh klimatických podmínek během provádění experimentu	V
Příloha 4 – Tabulka výsledků statistické analýzy pro: Hmotnost vzorku.....	VI
Příloha 5 – Tabulka výsledků statistické analýzy pro: Hmotnost přetoku do děl. roviny	VI
Příloha 6 – Tabulka výsledků statistické analýzy pro: Hmotnost přetoku odvodušněním ...	VII
Příloha 7 – Tabulka výsledků statistické analýzy pro: Hmotnost vtoku.....	VII
Příloha 8 – Tabulka výsledků statistické analýzy pro: Čas přetoku pěny.....	VIII
Příloha 9 – Tabulka výsledků statistické analýzy pro: Součinitel délkového smrštění	VIII
Příloha 10 – Tabulka výsledků statistické analýzy pro: Součinitel objemového smrštění	IX
Příloha 11 – Tabulka výsledků statistické analýzy pro: Průměrná tvrdost vzorku	IX
Příloha 12 – Tabulka výsledků statistické analýzy pro: Průběh tvrdosti vzorku	X
Příloha 13 – Tabulka výsledků statistické analýzy pro: Souřadnice barevnosti a*	X
Příloha 14 – Tabulka výsledků statistické analýzy pro: Souřadnice barevnosti b*	XI
Příloha 15 – Tabulka výsledků statistické analýzy pro: Struktura vzorku.....	XI
Příloha 16 – Měření vzorků na 3D souřadnicovém měřicím stroji.....	XII
Příloha 17 – Digitální Shoreův tvrdoměr typ C	XIII
Příloha 18 – Přenosný spektrofotometr Datacolor Check Plus.....	XIII
Příloha 19 – Standardizovaný prostor pro měření barevnosti (x-rite®)	XIV
Příloha 20 – Struktura vybraných vzorků	XV

Příloha 1 – Tabulka naměřených a dopočítaných hodnot experimentu (část 1/4)

pokus	centrum	směšovací poměr	teplota formy	nastavení šoupátka vířivé k.	doba vstřiku	doba náklonu	celkový průřez odvodušnění		hmotnost dělicí roviny	hmotnost vtoku	hmotnost přetoku odvoduš.	čas přetoku pěny										
												%	°C	%	sec.	sec.	mm ²	g	g	g	1.	2.
																					sec.	
1	1	60	45	25	1,0	1	2,2		2,7	8,4	3,8	8,89	8,91									
2	1	60	45	25	1,0	7	5,4		2,9	8,4	7,2	8,92	9,20									
3	1	60	45	25	1,4	1	5,4		5,1	9,6	44,4	6,83	6,92									
4	1	60	45	25	1,4	7	2,2		6,1	10,7	21,7	7,23	7,29									
5	1	60	45	75	1,0	1	5,4		2,9	8,0	8,4	9,13	8,93									
6	1	60	45	75	1,0	7	2,2		3,3	8,5	3,2	9,22	9,28									
7	1	60	45	75	1,4	1	2,2		6,1	10,4	25,0	7,12	7,22									
8	1	60	45	75	1,4	7	5,4		5,2	9,5	43,8	7,48	7,33									
9	1	60	65	25	1,0	1	5,4		2,7	8,0	10,4	9,06	8,80									
10	1	60	65	25	1,0	7	2,2		2,7	8,4	3,6	10,03	9,91									
11	1	60	65	25	1,4	1	2,2		5,3	10,0	26,7	7,03	6,82									
12	1	60	65	25	1,4	7	5,4		4,9	9,1	46,2	6,94	6,75									
13	1	60	65	75	1,0	1	2,2		2,8	8,0	4,9	8,73	8,74									
14	1	60	65	75	1,0	7	5,4		2,8	7,9	9,6	8,72	8,52									
15	1	60	65	75	1,4	1	5,4		4,4	8,6	52,4	6,48	6,55									
16	1	60	65	75	1,4	7	2,2		6,1	10,1	25,3	6,72	6,78									
17	1	70	45	25	1,0	1	5,4		2,8	8,1	9,9	9,03	8,97									
18	1	70	45	25	1,0	7	2,2		3,4	8,4	4,1	9,21	9,10									
19	1	70	45	25	1,4	1	2,2		6,0	10,3	27,7	7,02	7,20									
20	1	70	45	25	1,4	7	5,4		4,9	9,2	46,9	7,09	7,08									
21	1	70	45	75	1,0	1	2,2		3,1	8,3	5,0	8,88	8,97									
22	1	70	45	75	1,0	7	5,4		2,9	8,0	8,5	8,99	9,01									
23	1	70	45	75	1,4	1	5,4		4,9	9,2	48,2	6,88	6,94									
24	1	70	45	75	1,4	7	2,2		6,2	10,4	24,9	6,96	6,85									
25	1	70	65	25	1,0	1	2,2		2,7	8,3	10,4	7,89	7,64									
26	1	70	65	25	1,0	7	5,4		3,2	7,9	19,3	7,73	7,75									
27	1	70	65	25	1,4	1	5,4		5,1	8,5	63,6	6,30	6,10									
28	1	70	65	25	1,4	7	2,2		6,1	9,6	37,1	6,55	6,25									
29	1	70	65	75	1,0	1	5,4		3,1	7,1	19,5	7,81	7,82									
30	1	70	65	75	1,0	7	2,2		3,6	7,8	10,3	7,99	7,93									
31	1	70	65	75	1,4	1	2,2		6,7	9,2	37,9	6,45	6,22									
32	1	70	65	75	1,4	7	5,4		5,6	8,0	62,4	5,92	5,94									
33 C	0	65	55	50	1,2	4	3,8		4,4	8,7	19,0	7,90	7,81									
34 C	0	65	55	50	1,2	4	3,8		4,2	8,6	22,2	7,98	8,03									
35 C	0	65	55	50	1,2	4	3,8		4,9	8,8	20,1	7,53	7,62									
36 C	0	65	55	50	1,2	4	3,8		4,8	8,8	20,5	7,73	7,52									
37 C	0	65	55	50	1,2	4	3,8		4,5	9,0	20,4	7,67	7,62									
38 C	0	65	55	50	1,2	4	3,8		4,5	8,9	19,0	7,71	7,81									
39 C	0	65	55	50	1,2	4	3,8		4,6	9,2	19,5	7,76	7,69									
40 C	0	65	55	50	1,2	4	3,8		4,4	9,1	20,7	7,60	7,68									
41 C	0	65	55	50	1,2	4	3,8		4,3	8,9	20,8	7,64	7,58									
42 C	0	65	55	50	1,2	4	3,8		4,4	9,2	17,2	7,66	7,60									

Příloha 1 – Tabulka naměřených a dopočítaných hodnot experimentu (část 2/4)

pokus	teplota komponent		datum a čas výroby vzorku		celkové injekt. množství (CIM)	CIM / 1 sec.	podíl vtok/CIM	podíl přetok/CIM	podíl děl.rov./CIM	odpadový materiál/CIM	čas přetoku pěny	hmotnost vzorku
	POLY	IZO	dd.mm.rrrr	hh:mm								
	°C											
1	37,0	26,5	15.10.2010	11:40	139,4	139,4	6,0%	2,7%	1,9%	10,7%	8,90	125,4
2	36,5	26,5	15.10.2010	11:37	139,0	139,0	6,0%	5,2%	2,1%	13,3%	9,06	121,6
3	36,0	26,5	15.10.2010	11:35	199,5	142,5	4,8%	22,3%	2,6%	29,6%	6,88	141,7
4	36,0	26,5	15.10.2010	11:30	198,2	141,6	5,4%	10,9%	3,1%	19,4%	7,26	161,0
5	35,0	27,0	15.10.2010	11:25	139,3	139,3	5,7%	6,0%	2,1%	13,9%	9,03	121,1
6	34,0	27,0	15.10.2010	11:20	140,3	140,3	6,1%	2,3%	2,4%	10,7%	9,25	126,5
7	33,5	27,0	15.10.2010	11:15	199,3	142,4	5,2%	12,5%	3,1%	20,8%	7,17	159,2
8	33,0	27,0	15.10.2010	11:10	200,1	142,9	4,7%	21,9%	2,6%	29,2%	7,41	142,7
9	34,0	27,0	15.10.2010	9:45	138,0	138,0	5,8%	7,5%	2,0%	15,3%	8,93	117,8
10	35,0	27,0	15.10.2010	9:55	136,3	136,3	6,2%	2,6%	2,0%	10,8%	9,97	122,6
11	36,0	27,0	15.10.2010	10:06	193,8	138,4	5,2%	13,8%	2,7%	21,7%	6,93	153,1
12	37,0	27,0	15.10.2010	10:11	194,4	138,9	4,7%	23,8%	2,5%	31,0%	6,85	135,5
13	38,0	27,0	15.10.2010	10:16	134,7	134,7	5,9%	3,6%	2,1%	11,7%	8,74	119,9
14	38,0	26,5	15.10.2010	10:20	135,8	135,8	5,8%	7,1%	2,1%	14,9%	8,62	116,6
15	38,0	26,5	15.10.2010	10:25	195,0	139,3	4,4%	26,9%	2,3%	33,5%	6,52	130,7
16	38,0	26,5	15.10.2010	10:30	195,0	139,3	5,2%	13,0%	3,1%	21,3%	6,75	155,0
17	34,0	26,5	15.10.2010	12:40	141,8	141,8	5,7%	7,0%	2,0%	14,7%	9,00	121,8
18	35,0	26,5	15.10.2010	12:45	141,2	141,2	5,9%	2,9%	2,4%	11,3%	9,16	126,2
19	35,0	26,5	15.10.2010	12:50	199,4	142,4	5,2%	13,9%	3,0%	22,1%	7,11	156,4
20	36,0	26,5	15.10.2010	12:55	199,0	142,1	4,6%	23,6%	2,5%	30,7%	7,09	138,9
21	36,0	26,0	15.10.2010	12:58	140,3	140,3	5,9%	3,6%	2,2%	11,7%	8,93	124,7
22	37,0	26,0	15.10.2010	13:02	139,1	139,1	5,8%	6,1%	2,1%	13,9%	9,00	120,5
23	37,0	26,0	18.10.2010	13:06	199,1	142,2	4,6%	24,2%	2,5%	31,3%	6,91	137,7
24	37,0	26,0	18.10.2010	13:10	200,9	143,5	5,2%	12,4%	3,1%	20,7%	6,91	160,4
25	42,0	28,0	18.10.2010	10:11	143,1	143,1	5,8%	7,3%	1,9%	15,0%	7,77	122,3
26	41,0	28,0	18.10.2010	10:05	143,0	143,0	5,5%	13,5%	2,2%	21,3%	7,74	113,4
27	40,0	28,0	18.10.2010	10:03	201,2	143,7	4,2%	31,6%	2,5%	38,4%	6,20	125,0
28	39,0	28,5	18.10.2010	10:00	201,0	143,6	4,8%	18,5%	3,0%	26,3%	6,40	149,2
29	39,0	29,0	18.10.2010	9:55	141,0	141,0	5,0%	13,8%	2,2%	21,1%	7,82	112,3
30	40,0	29,5	18.10.2010	9:50	143,4	143,4	5,4%	7,2%	2,5%	15,1%	7,96	122,7
31	42,0	30,0	18.10.2010	9:40	201,2	143,7	4,6%	18,8%	3,3%	26,7%	6,34	148,7
32	43,0	28,0	18.10.2010	9:30	199,7	142,6	4,0%	31,2%	2,8%	38,1%	5,93	125,3
33 C	34,0	28,0	15.10.2010	7:40	167,0	139,2	5,2%	11,4%	2,6%	19,2%	7,86	135,9
34 C	34,0	28,0	15.10.2010	7:45	167,3	139,4	5,1%	13,3%	2,5%	20,9%	8,01	133,3
35 C	34,5	27,5	15.10.2010	7:50	167,3	139,4	5,3%	12,0%	2,9%	20,2%	7,58	134,6
36 C	34,5	27,5	15.10.2010	7:55	166,9	139,1	5,3%	12,3%	2,9%	20,4%	7,63	133,7
37 C	35,0	27,5	15.10.2010	8:00	167,8	139,8	5,4%	12,2%	2,7%	20,2%	7,65	134,9
38 C	35,5	27,5	15.10.2010	8:03	167,0	139,2	5,3%	11,4%	2,7%	19,4%	7,76	135,7
39 C	36,0	27,5	15.10.2010	8:06	167,2	139,3	5,5%	11,7%	2,8%	19,9%	7,73	135,0
40 C	36,5	27,0	15.10.2010	8:09	167,2	139,3	5,4%	12,4%	2,6%	20,5%	7,64	134,0
41 C	37,0	27,0	15.10.2010	8:12	167,4	139,5	5,3%	12,4%	2,6%	20,3%	7,61	134,4
42 C	37,5	27,0	15.10.2010	8:15	166,8	139,0	5,5%	10,3%	2,6%	18,5%	7,63	137,0

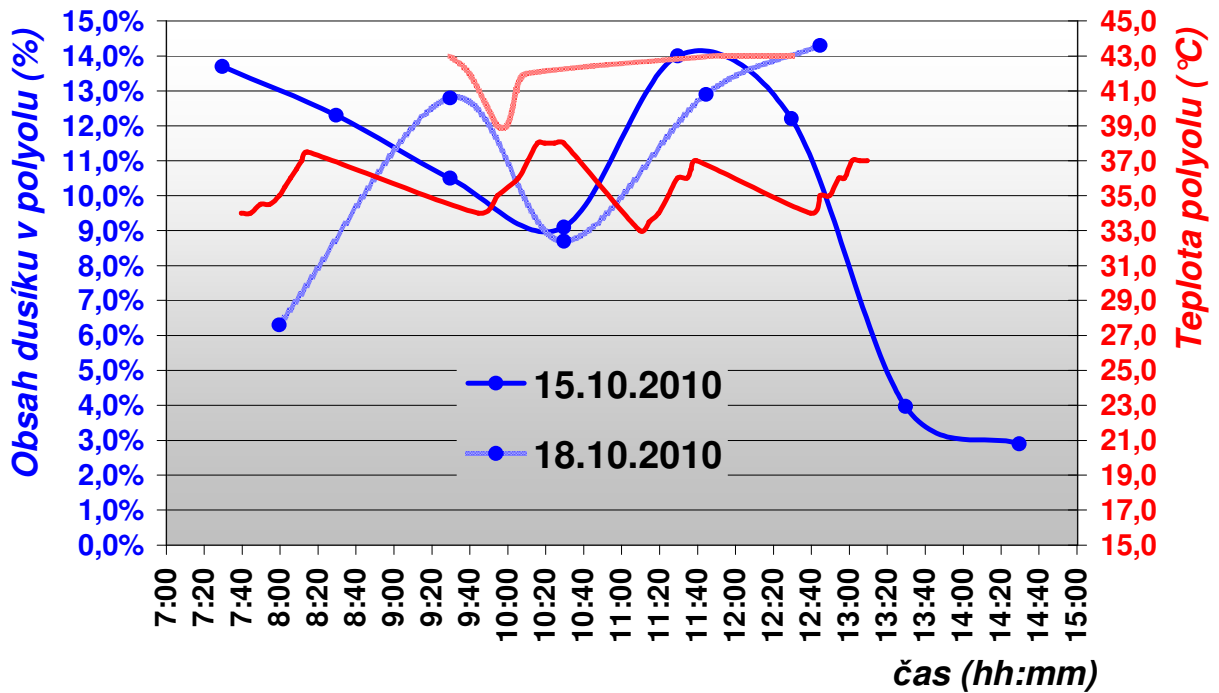
Příloha 1 – Tabulka naměřených a dopočítaných hodnot experimentu (část 3/4)

pokus	objem vzorku	délka vzorku	geom. těžiště vzorku	smrštění délkové	smrštění objemové	měrná hmotnost	barevnost		
	cm ³	mm	mm	%	%	kg.m ⁻³	L*	a*	b*
	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	383,648	352,998	177,440	1,32%	3,11%	326,9	21,49	-0,08	-0,09
2	381,742	353,193	177,729	1,26%	3,59%	318,5	21,42	-0,04	-0,22
3	387,203	353,613	178,201	1,15%	2,21%	366,0	21,75	-0,08	-0,49
4	390,772	354,022	178,558	1,03%	1,31%	412,0	21,82	-0,17	-0,36
5	384,107	353,641	177,998	1,14%	3,00%	315,3	21,38	-0,09	-0,12
6	386,293	353,768	178,043	1,10%	2,44%	327,5	21,86	-0,08	-0,23
7	392,118	353,843	178,854	1,08%	0,97%	406,0	22,78	-0,13	-0,20
8	390,809	353,852	178,729	1,08%	1,30%	365,1	20,94	-0,07	-0,50
9	381,816	352,993	177,177	1,32%	3,58%	308,5	21,22	0,07	-0,10
10	380,122	352,906	176,762	1,34%	4,00%	322,5	20,70	0,03	-0,07
11	385,873	353,111	177,355	1,29%	2,55%	396,8	21,25	0,15	0,37
12	384,244	353,017	177,148	1,31%	2,96%	352,6	21,73	0,01	-0,06
13	380,198	352,730	176,724	1,39%	3,98%	315,4	21,09	-0,03	-0,16
14	380,395	352,872	176,829	1,35%	3,93%	306,5	21,47	0,03	-0,02
15	386,404	353,428	177,552	1,20%	2,42%	338,2	22,00	0,14	-0,15
16	391,490	353,437	178,295	1,20%	1,13%	395,9	21,54	0,07	-0,09
17	377,208	352,858	177,011	1,36%	4,74%	322,9	22,03	-0,02	-0,47
18	377,804	352,663	176,715	1,41%	4,59%	334,0	22,19	-0,10	-0,19
19	381,799	352,725	177,064	1,39%	3,58%	409,6	22,61	-0,18	-0,67
20	379,581	352,938	177,032	1,33%	4,14%	365,9	22,26	-0,10	-0,46
21	379,923	352,973	176,800	1,33%	4,05%	328,2	21,81	-0,03	-0,45
22	378,759	353,159	177,194	1,27%	4,35%	318,1	21,37	-0,04	-0,26
23	384,381	353,276	177,620	1,24%	2,93%	358,2	21,66	-0,28	-0,41
24	392,421	352,854	178,021	1,36%	0,90%	408,7	21,54	-0,14	-0,54
25	375,256	352,175	176,276	1,55%	5,23%	325,9	21,06	0,03	-0,24
26	376,693	352,196	176,889	1,54%	4,87%	301,0	21,44	-0,03	-0,09
27	378,062	352,174	176,444	1,55%	4,52%	330,6	21,15	-0,05	-0,06
28	385,014	352,385	176,609	1,49%	2,77%	387,5	21,05	-0,03	-0,18
29	376,888	352,518	176,692	1,45%	4,82%	298,0	21,92	-0,05	-0,25
30	374,876	352,459	176,490	1,47%	5,33%	327,3	21,16	-0,05	-0,39
31	388,638	352,204	176,727	1,54%	1,85%	382,6	22,00	-0,06	-0,12
32	380,687	352,379	176,799	1,49%	3,86%	329,1	22,48	-0,11	-0,29
33 C	380,874	352,790	176,709	1,38%	3,81%	356,8	24,39	0,10	-0,50
34 C	380,109	352,828	176,768	1,37%	4,01%	350,7	23,87	0,00	-0,33
35 C	382,283	353,239	177,125	1,25%	3,46%	352,1	22,90	0,07	-0,30
36 C	382,110	353,055	177,182	1,30%	3,50%	349,9	23,43	-0,04	-0,26
37 C	381,565	352,749	176,818	1,39%	3,64%	353,5	23,08	0,02	-0,27
38 C	382,829	352,918	176,976	1,34%	3,32%	354,5	21,86	-0,04	-0,34
39 C	386,312	352,948	177,898	1,33%	2,44%	349,5	21,31	-0,02	-0,39
40 C	384,128	352,907	177,461	1,34%	2,99%	348,8	20,40	-0,05	-0,19
41 C	382,276	352,792	176,798	1,38%	3,46%	351,6	20,42	-0,11	-0,65
42 C	380,743	352,756	176,649	1,39%	3,85%	359,8	19,46	-0,17	-0,39

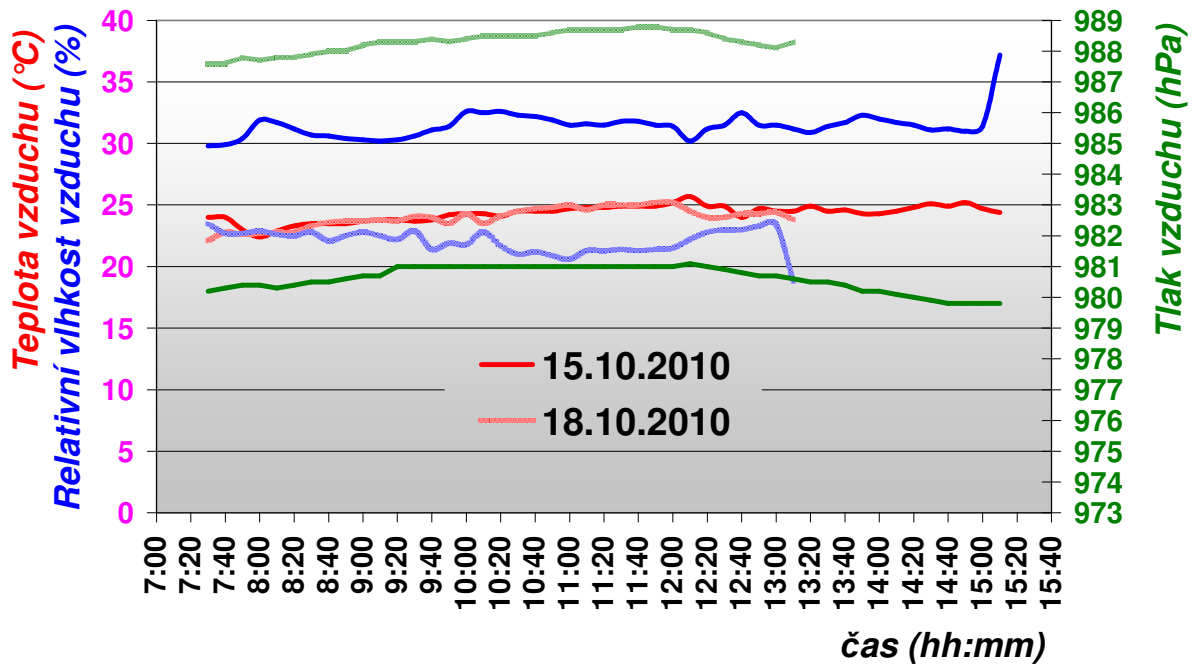
Příloha 1 – Tabulka naměřených a dopočítaných hodnot experimentu (část 4/4)

pokus	Tvrđost ShL/C								struktura
	bod 1	bod 2	bod 3	bod 4	bod 5	bod 6	tvrdost	k	
	ShL	ShL	ShL	ShL	ShL	ShL	ShL	-	
1	75,8	73,8	73,1	73,1	73,8	69,1	73,1	-0,9571	-1
2	74,3	72,5	71,8	71,1	71,8	71,1	72,1	-0,5371	-1
3	78,3	75,4	75,8	75,2	75,9	76,5	76,2	-0,2314	1
4	81,4	80,2	80,4	80,1	79,9	79,8	80,3	-0,2629	1
5	74,4	71,3	71,0	71,5	70,0	68,5	71,1	-0,9400	-1
6	75,5	73,2	73,3	71,9	71,3	70,4	72,6	-0,9314	-1
7	81,6	79,8	79,8	79,7	79,8	79,5	80,0	-0,3029	1
8	78,6	76,6	76,5	76,5	76,2	75,3	76,6	-0,5057	1
9	70,5	67,2	67,3	68,3	65,9	64,6	67,3	-0,9257	-1
10	71,7	68,4	67,7	66,9	66,0	66,1	67,8	-1,0286	-1
11	76,4	74,6	74,5	74,8	74,5	73,8	74,8	-0,3714	1
12	73,0	72,7	70,0	69,8	70,3	70,5	71,1	-0,5686	1
13	70,4	67,2	66,5	66,6	65,8	65,8	67,1	-0,7743	1
14	69,2	65,1	64,8	64,4	64,2	63,2	65,2	-0,9457	-1
15	72,0	69,1	67,9	67,7	68,3	69,0	69,0	-0,5029	-1
16	75,9	73,7	73,6	73,7	73,4	73,9	74,0	-0,3086	1
17	81,1	80,0	80,1	79,8	79,0	78,5	79,8	-0,4657	-1
18	81,1	81,1	80,8	79,7	80,7	80,1	80,6	-0,2086	-1
19	86,5	86,8	86,9	86,5	86,9	86,5	86,7	-0,0029	1
20	83,5	84,0	83,1	83,4	83,5	82,5	83,3	-0,1771	1
21	80,7	80,7	80,0	80,0	80,1	79,0	80,1	-0,2943	-1
22	79,2	79,1	79,6	78,7	77,0	76,1	78,3	-0,6486	-1
23	83,0	81,9	82,4	82,0	82,1	81,9	82,2	-0,1514	-1
24	86,4	85,7	85,1	85,3	85,9	85,5	85,7	-0,1057	1
25	78,2	77,5	77,2	76,9	77,7	77,4	77,5	-0,1057	1
26	75,4	74,2	73,8	73,9	73,7	73,8	74,1	-0,2686	-1
27	78,6	78,2	78,0	78,4	77,4	76,1	77,8	-0,4143	1
28	83,1	82,9	82,6	83,5	83,5	83,5	83,2	0,1343	1
29	75,5	74,1	74,2	73,3	73,6	74,3	74,2	-0,2400	-1
30	78,4	77,5	77,2	76,8	76,9	76,8	77,3	-0,2914	1
31	84,4	83,7	82,9	82,8	83,3	82,3	83,2	-0,3371	1
32	78,5	77,4	76,9	76,9	77,2	76,9	77,3	-0,2457	-1
33 C	79,7	78,2	78,6	78,2	78,3	77,4	78,4	-0,3314	1
34 C	78,2	78,1	78,2	78,6	78,2	77,6	78,2	-0,0657	1
35 C	78,8	77,7	78,1	78,0	78,5	77,9	78,2	-0,0629	1
36 C	78,7	78,0	77,9	78,2	78,1	77,1	78,0	-0,2114	1
37 C	78,7	77,7	78,1	78,1	78,1	77,1	78,0	-0,1943	1
38 C	78,1	77,8	78,2	78,3	78,4	78,2	78,2	0,0686	1
39 C	78,2	77,3	77,1	77,4	77,9	76,8	77,5	-0,1400	1
40 C	78,1	77,4	77,4	77,6	77,3	76,9	77,5	-0,1743	1
41 C	77,4	77,9	77,7	77,9	77,2	76,7	77,5	-0,1543	1
42 C	78,7	77,6	78,3	77,9	77,9	77,5	78,0	-0,1571	1

Příloha 2 – Průběh obsahu dusíku a teploty polyolu během provádění experimentu



Příloha 3 – Průběh klimatických podmínek během provádění experimentu



Příloha 4 – Tabulka výsledků statistické analýzy pro: Hmotnost vzorku

Hmotnost vzorku (g)	Efekt	Sm. chyba	t(35)	p	- 95,0% Lmt. spol.	+ 95,0% Lmt. spol.	koef.	Sm. chyba koef.	- 95,0% Lmt. spol.	+ 95,0% Lmt. spol.
Průměr (absol. hodnota)	132,97477	0,43806	303,55099	0,00000	132,08545	133,86409	132,97477	0,43806	132,08545	133,86409
1 - směšovací poměr	-2,61250	0,99802	-2,61767	0,01299	-4,63860	-0,58640	-1,30625	0,49901	-2,31930	-0,29320
2 - teplota formy	-7,28750	0,99802	-7,30193	0,00000	-9,31360	-5,26140	-3,64375	0,49901	-4,65680	-2,63070
4 - doba vstřiku	23,81250	0,99802	23,85963	0,00000	21,78640	25,83860	11,90625	0,49901	10,89320	12,91930
6 - průřez odvzdušnění	-12,32018	0,97954	-12,57751	0,00000	-14,30876	-10,33161	-6,16009	0,48977	-7,15438	-5,16580
2 * 4	-2,30000	0,99802	-2,30455	0,02724	-4,32610	-0,27390	-1,15000	0,49901	-2,16305	-0,13695
4 * 6	-7,46250	0,99802	-7,47727	0,00000	-9,48860	-5,43640	-3,73125	0,49901	-4,74430	-2,71820
<i>2^(6-1) schéma; MS reziduí =7,968423; R-kv.=0,9604; Upr:0,95361 (Doe)</i>										

VI

Příloha 5 – Tabulka výsledků statistické analýzy pro: Hmotnost přetoku do dělicí roviny

Hmotnost přetoku do dělicí roviny (g)	Efekt	Sm. chyba	t(35)	p	- 95,0% Lmt. spol.	+ 95,0% Lmt. spol.	koef.	Sm. chyba koef.	- 95,0% Lmt. spol.	+ 95,0% Lmt. spol.
Průměr (absol. hodnota)	4,34180	0,04128	105,18769	0,00000	4,25792	4,42568	4,34180	0,04128	4,25792	4,42568
1 - směšovací poměr	0,26875	0,09404	2,85785	0,00723	0,07764	0,45986	0,13437	0,04702	0,03882	0,22993
3 - nastavení šoupátka v. k.	0,19375	0,09404	2,06031	0,04709	0,00264	0,38486	0,09687	0,04702	0,00132	0,19243
4 - doba vstřiku	2,56875	0,09404	27,31576	0,00000	2,37764	2,75986	1,28438	0,04702	1,18882	1,37993
5 - doba náklonu	0,21875	0,09404	2,32616	0,02611	0,02764	0,40986	0,10938	0,04702	0,01382	0,20493
6 - průřez odvzdušnění	-0,52781	0,09230	-5,71857	0,00000	-0,71538	-0,34024	-0,26390	0,04615	-0,35769	-0,17012
1 * 2	0,28125	0,09404	2,99078	0,00515	0,09014	0,47236	0,14063	0,04702	0,04507	0,23618
4 * 6	-0,46875	0,09404	-4,98463	0,00002	-0,65986	-0,27764	-0,23438	0,04702	-0,32993	-0,13882
<i>2^(6-1) schéma; MS reziduí =0,0707468; R-kv.=0,96067; Upr:0,95257 (Doe)</i>										

Příloha 6 – Tabulka výsledků statistické analýzy pro: Hmotnost přetoku odvodušněním

Hmotnost přetoku odvodušněním (g)	Efekt	Sm. chyba	t(35)	p	- 95,0% Lmt. spol.	+ 95,0% Lmt. spol.	koef.	Sm. chyba koef.	- 95,0% Lmt. spol.	+ 95,0% Lmt. spol.
Průměr (absol. hodnota)	22,51554	0,58830	38,27219	0,00000	21,32123	23,70985	22,51554	0,58830	21,32123	23,70985
1 - směšovací poměr	6,19375	1,34030	4,62116	0,00005	3,47279	8,91471	3,09688	0,67015	1,73640	4,45735
2 - teplota formy	6,68125	1,34030	4,98488	0,00002	3,96029	9,40221	3,34063	0,67015	1,98015	4,70110
4 - doba vstřiku	31,00625	1,34030	23,13378	0,00000	28,28529	33,72721	15,50313	0,67015	14,14265	16,86360
6 - průřez odvodušnění	13,02368	1,31548	9,90033	0,00000	10,35312	15,69425	6,51184	0,65774	5,17656	7,84712
1 * 2	3,98125	1,34030	2,97041	0,00534	1,26029	6,70221	1,99063	0,67015	0,63015	3,35110
4 * 6	8,38125	1,34030	6,25326	0,00000	5,66029	11,10221	4,19063	0,67015	2,83015	5,55110
2^(6-1) schéma; MS reziduí =14,37127; R-kv.=0,95409; Upr:0,94622 (Doe)										

II/V

Příloha 7 – Tabulka výsledků statistické analýzy pro: Hmotnost vtoku

Hmotnost vtoku (g)	Efekt	Sm. chyba	t(35)	p	- 95,0% Lmt. spol.	+ 95,0% Lmt. spol.	koef.	Sm. chyba koef.	- 95,0% Lmt. spol.	+ 95,0% Lmt. spol.
Průměr (absol. hodnota)	8,86829	0,03521	251,86787	0,00000	8,79674	8,93985	8,86829	0,03521	8,79674	8,93985
1 - směšovací poměr	-0,33125	0,08022	-4,12938	0,00022	-0,49427	-0,16823	-0,16562	0,04011	-0,24714	-0,08411
2 - teplota formy	-0,55625	0,08022	-6,93425	0,00000	-0,71927	-0,39323	-0,27813	0,04011	-0,35964	-0,19661
3 - nastavení šoupátka v. k.	-0,24375	0,08022	-3,03860	0,00455	-0,40677	-0,08073	-0,12188	0,04011	-0,20339	-0,04036
4 - doba vstřiku	1,43125	0,08022	17,84205	0,00000	1,26823	1,59427	0,71563	0,04011	0,63411	0,79714
6 - průřez odvodušnění	-0,68412	0,07873	-8,68917	0,00000	-0,84412	-0,52411	-0,34206	0,03937	-0,42206	-0,26206
2 * 4	-0,21875	0,08022	-2,72695	0,01004	-0,38177	-0,05573	-0,10938	0,04011	-0,19089	-0,02786
4 * 6	-0,39375	0,08022	-4,90851	0,00002	-0,55677	-0,23073	-0,19688	0,04011	-0,27839	-0,11536
2^(6-1) schéma; MS reziduí =0,0514792; R-kv.=0,9363; Upr:0,92318 (Doe)										

Příloha 8 – Tabulka výsledků statistické analýzy pro: Čas přetoku pěny

Čas přetoku pěny (s)	Efekt	Sm. chyba	t(35)	p	- 95,0% Lmt. spol.	+ 95,0% Lmt. spol.	koef.	Sm. chyba koef.	- 95,0% Lmt. spol.	+ 95,0% Lmt. spol.
Průměr (absol. hodnota)	7,75107	0,03907	198,38527	0,00000	7,67191	7,83024	7,75107	0,03907	7,67191	7,83024
1 - směšovací poměr	-0,50031	0,08952	-5,58868	0,00000	-0,68170	-0,31892	-0,25016	0,04476	-0,34085	-0,15946
2 - teplota formy	-0,60031	0,08952	-6,70572	0,00000	-0,78170	-0,41892	-0,30016	0,04476	-0,39085	-0,20946
4 - doba vstřiku	-1,95219	0,08952	-21,80668	0,00000	-2,13358	-1,77080	-0,97609	0,04476	-1,06679	-0,88540
1 * 2	-0,39281	0,08952	-4,38787	0,00009	-0,57420	-0,21142	-0,19641	0,04476	-0,28710	-0,10571

2^(6-1) schéma; MS reziduí =0,0641142; R-kv.=0,93914; Upr:0,93256 (Doe)

Příloha 9 – Tabulka výsledků statistické analýzy pro: Součinitel délkového smrštění

Součinitel dél. smrštění (-)	Efekt	Sm. chyba	t(35)	p	- 95,0% Lmt. spol.	+ 95,0% Lmt. spol.	koef.	Sm. chyba koef.	- 95,0% Lmt. spol.	+ 95,0% Lmt. spol.
Průměr (absol. hodnota)	0,01329	0,00006	205,30897	0,00000	0,01315	0,01342	0,01329	0,00006	0,01315	0,01342
1 - směšovací poměr	0,00201	0,00015	13,53732	0,00000	0,00171	0,00231	0,00100	0,00007	0,00085	0,00115
2 - teplota formy	0,00164	0,00015	11,06742	0,00000	0,00134	0,00194	0,00082	0,00007	0,00067	0,00097
3 - nastavení šoupátka v. k.	-0,00060	0,00015	-4,03716	0,00028	-0,00090	-0,00030	-0,00030	0,00007	-0,00045	-0,00015
4 - doba vstřiku	-0,00055	0,00015	-3,71899	0,00070	-0,00085	-0,00025	-0,00028	0,00007	-0,00043	-0,00013
1 * 4	0,00057	0,00015	3,87454	0,00045	0,00027	0,00088	0,00029	0,00007	0,00014	0,00044
5 * 6	0,00046	0,00015	3,09916	0,00382	0,00016	0,00076	0,00023	0,00007	0,00008	0,00038

2^(6-1) schéma; MS reziduí =0,0000002; R-kv.=0,9115; Upr:0,89633 (Doe)

Příloha 10 – Tabulka výsledků statistické analýzy pro: Součinitel objemového smrštění

Součinitel obj. smrštění (-)	Efekt	Sm. chyba	t(35)	p	- 95,0% Lmt. spol.	+ 95,0% Lmt. spol.	koef.	Sm. chyba koef.	- 95,0% Lmt. spol.	+ 95,0% Lmt. spol.
Průměr (absol. hodnota)	0,03293	0,00066	50,24753	0,00000	0,03160	0,03426	0,03293	0,00066	0,03160	0,03426
1 - směšovací poměr	0,01251	0,00149	8,37674	0,00000	0,00947	0,01554	0,00625	0,00075	0,00474	0,00777
2 - teplota formy	0,00662	0,00149	4,43044	0,00009	0,00358	0,00965	0,00331	0,00075	0,00179	0,00482
3 - nastavení šoupátka v. k.	-0,00656	0,00149	-4,39218	0,00010	-0,00959	-0,00352	-0,00328	0,00075	-0,00480	-0,00176
4 - doba vstřiku	-0,01638	0,00149	-10,96913	0,00000	-0,01941	-0,01334	-0,00819	0,00075	-0,00971	-0,00667
6 - průřez od vzdušnění	0,00597	0,00147	4,07279	0,00026	0,00299	0,00895	0,00298	0,00073	0,00150	0,00447
3 * 4	-0,00430	0,00149	-2,88055	0,00683	-0,00734	-0,00127	-0,00215	0,00075	-0,00367	-0,00063
4 * 6	0,00572	0,00149	3,83108	0,00052	0,00269	0,00875	0,00286	0,00075	0,00134	0,00438

2⁶(6-1) schéma; MS reziduí = 0,0000178; R-kv. = 0,88778; Upr: 0,86467 (Doe)

XI

Příloha 11 – Tabulka výsledků statistické analýzy pro: Průměrná tvrdost vzorku

Průměrná tvrdost (ShL)	Efekt	Sm. chyba	t(35)	p	- 95,0% Lmt. spol.	+ 95,0% Lmt. spol.	koef.	Sm. chyba koef.	- 95,0% Lmt. spol.	+ 95,0% Lmt. spol.
Průměr (absol. hodnota)	76,75609	0,20429	375,71839	0,00000	76,34177	77,17041	76,75609	0,20429	76,34177	77,17041
1 - směšovací poměr	7,68229	0,46543	16,50581	0,00000	6,73836	8,62623	3,84115	0,23271	3,36918	4,31311
2 - teplota formy	-4,87188	0,46543	-10,46748	0,00000	-5,81581	-3,92794	-2,43594	0,23271	-2,90790	-1,96397
4 - doba vstřiku	5,21146	0,46543	11,19709	0,00000	4,26752	6,15539	2,60573	0,23271	2,13376	3,07770
6 - průřez od vzdušnění	-2,60284	0,45681	-5,69786	0,00000	-3,52929	-1,67639	-1,30142	0,22840	-1,76465	-0,83819
4 * 6	-1,27604	0,46543	-2,74164	0,00946	-2,21998	-0,33211	-0,63802	0,23271	-1,10999	-0,16605

2⁶(6-1) schéma; MS reziduí = 1,732998; R-kv. = 0,93829; Upr: 0,92972 (Doe)

Příloha 12 – Tabulka výsledků statistické analýzy pro: Průběh tvrdosti vzorku

Průběh tvrdosti (-)	Efekt	Sm. chyba	t(35)	p	- 95,0% Lmt. spol.	+ 95,0% Lmt. spol.	koef.	Sm. chyba koef.	- 95,0% Lmt. spol.	+ 95,0% Lmt. spol.
Průměr (absol. hodnota)	-0,36524	0,03017	-12,10783	0,00000	-0,42630	-0,30417	-0,36524	0,03017	-0,42630	-0,30417
1 - směšovací poměr	0,39196	0,06912	5,67097	0,00000	0,25204	0,53189	0,19598	0,03456	0,12602	0,26594
4 - doba vstřiku	0,32554	0,06912	4,70988	0,00003	0,18561	0,46546	0,16277	0,03456	0,09281	0,23273
1 * 4	-0,17268	0,06912	-2,49833	0,01692	-0,31260	-0,03276	-0,08634	0,03456	-0,15630	-0,01638
<i>2⁶(6-1) schéma; MS reziduí =0,038218; R-kv.=0,61454; Upr:0,58411 (Doe)</i>										

Příloha 13 – Tabulka výsledků statistické analýzy pro: Souřadnice barevnosti a*

Souřadnice barevnosti a* (-)	Efekt	Sm. chyba	t(35)	p	- 95,0% Lmt. spol.	+ 95,0% Lmt. spol.	koef.	Sm. chyba koef.	- 95,0% Lmt. spol.	+ 95,0% Lmt. spol.
Průměr (absol. hodnota)	-0,04167	0,00949	-4,39227	0,00009	-0,06089	-0,02245	-0,04167	0,00949	-0,06089	-0,02245
1 - směšovací poměr	-0,06063	0,02174	-2,78916	0,00830	-0,10467	-0,01658	-0,03031	0,01087	-0,05233	-0,00829
2 - teplota formy	0,10938	0,02174	5,03198	0,00001	0,06533	0,15342	0,05469	0,01087	0,03267	0,07671
1 * 4	-0,04813	0,02174	-2,21407	0,03307	-0,09217	-0,00408	-0,02406	0,01087	-0,04608	-0,00204
2 * 4	0,04938	0,02174	2,27158	0,02902	0,00533	0,09342	0,02469	0,01087	0,00267	0,04671
<i>2⁶(6-1) schéma; MS reziduí =0,0037796; R-kv.=0,53844; Upr:0,48854 (Doe)</i>										

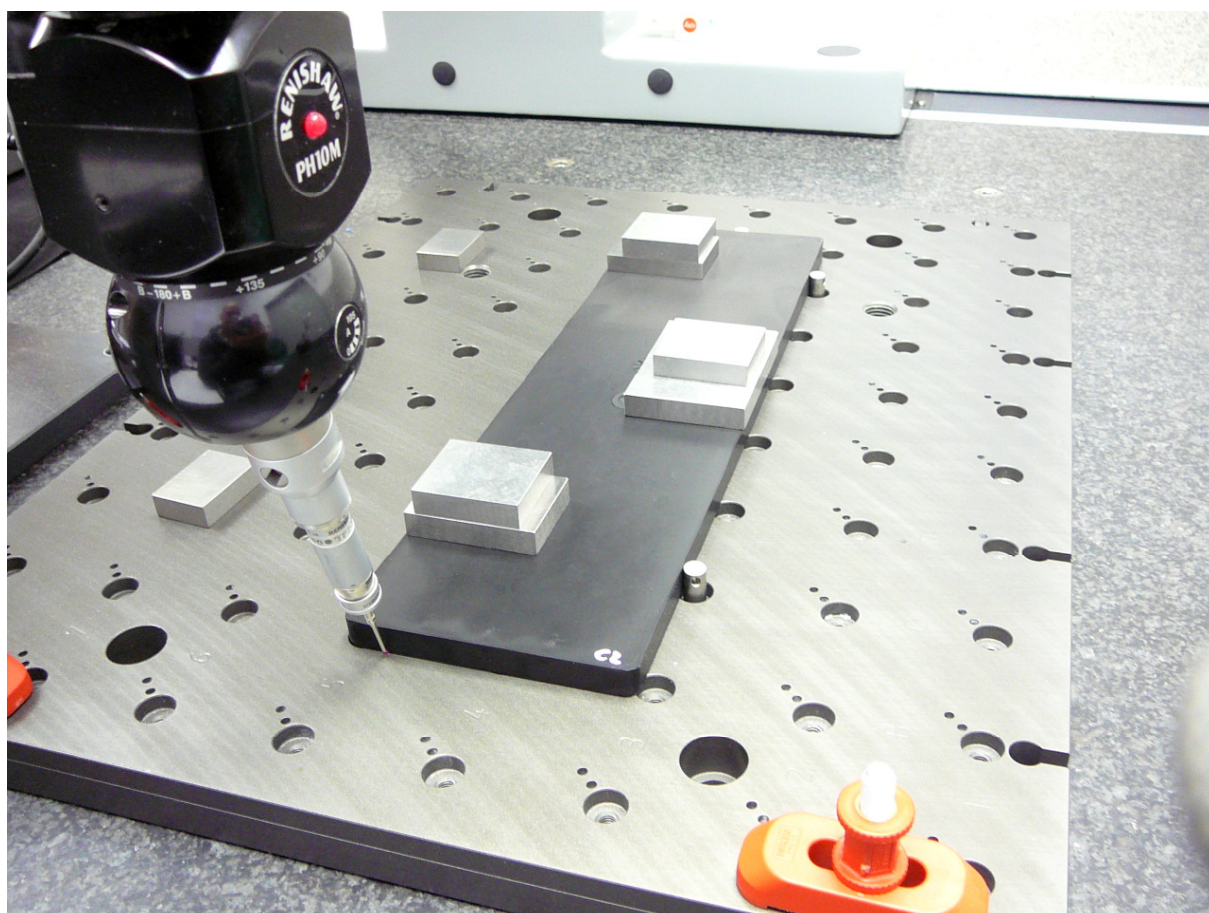
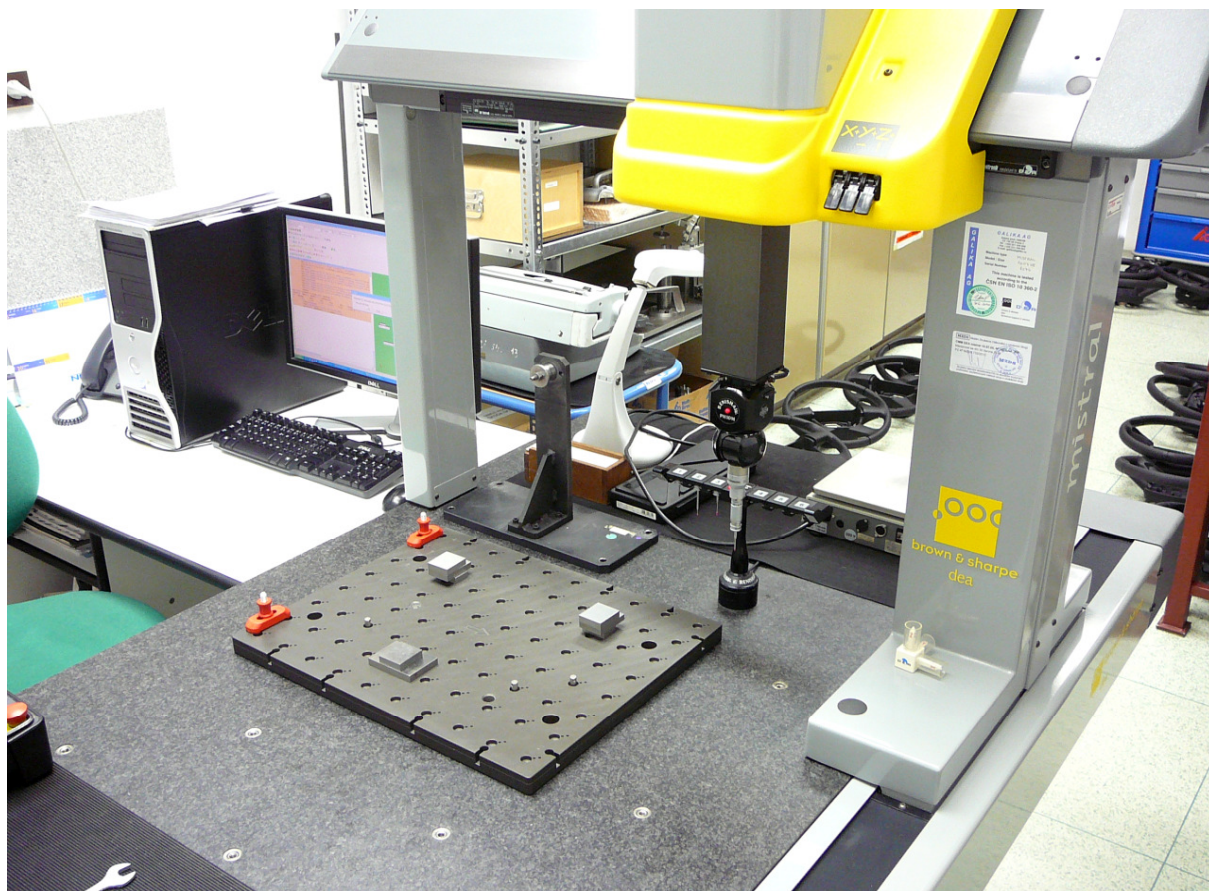
Příloha 14 – Tabulka výsledků statistické analýzy pro: Souřadnice barevnosti b*

b* souřadnice barevnosti (-)	Efekt	Sm. chyba	t(35)	p	- 95,0% Lmt. spol.	+ 95,0% Lmt. spol.	koef.	Sm. chyba koef.	- 95,0% Lmt. spol.	+ 95,0% Lmt. spol.
Průměr (absol. hodnota)	-0,26619	0,02136	-12,45961	0,00000	-0,30944	-0,22294	-0,26619	0,02136	-0,30944	-0,22294
1 - směšovací poměr	-0,16125	0,04895	-3,29406	0,00214	-0,26035	-0,06215	-0,08063	0,02448	-0,13017	-0,03108
2 - teplota formy	0,23500	0,04895	4,80065	0,00002	0,13590	0,33410	0,11750	0,02448	0,06795	0,16705
2 * 4	0,14625	0,04895	2,98764	0,00490	0,04715	0,24535	0,07313	0,02448	0,02358	0,12267
<i>2⁴(6-1) schéma; MS reziduí =0,0191701; R-kv.=0,52984; Upr:0,49272 (Doe)</i>										

Příloha 15 – Tabulka výsledků statistické analýzy pro: Struktura vzorku

Struktura vzorku (-)	Efekt	Sm. chyba	t(35)	p	- 95,0% Lmt. spol.	+ 95,0% Lmt. spol.	koef.	Sm. chyba koef.	- 95,0% Lmt. spol.	+ 95,0% Lmt. spol.
Průměr (absol. hodnota)	0,26376	0,10722	2,46010	0,01897	0,04610	0,48142	0,26376	0,10722	0,04610	0,48142
4 - doba vstřiku	1,25000	0,24427	5,11738	0,00001	0,75411	1,74589	0,62500	0,12213	0,37706	0,87294
6 - průřez odvzdušnění	-0,53899	0,23974	-2,24821	0,03096	-1,02569	-0,05229	-0,26950	0,11987	-0,51285	-0,02614
2 * 4	-0,50000	0,24427	-2,04695	0,04823	-0,99589	-0,00411	-0,25000	0,12213	-0,49794	-0,00206
2 * 6	-0,50000	0,24427	-2,04695	0,04823	-0,99589	-0,00411	-0,25000	0,12213	-0,49794	-0,00206
3 * 4	-0,50000	0,24427	-2,04695	0,04823	-0,99589	-0,00411	-0,25000	0,12213	-0,49794	-0,00206
3 * 6	-0,50000	0,24427	-2,04695	0,04823	-0,99589	-0,00411	-0,25000	0,12213	-0,49794	-0,00206
<i>2⁴(6-1) schéma; MS reziduí =0,4773263; R-kv.=0,57832; Upr:0,50604 (Doe)</i>										

Příloha 16 – Měření vzorků na 3D souřadnicovém měřicím stroji



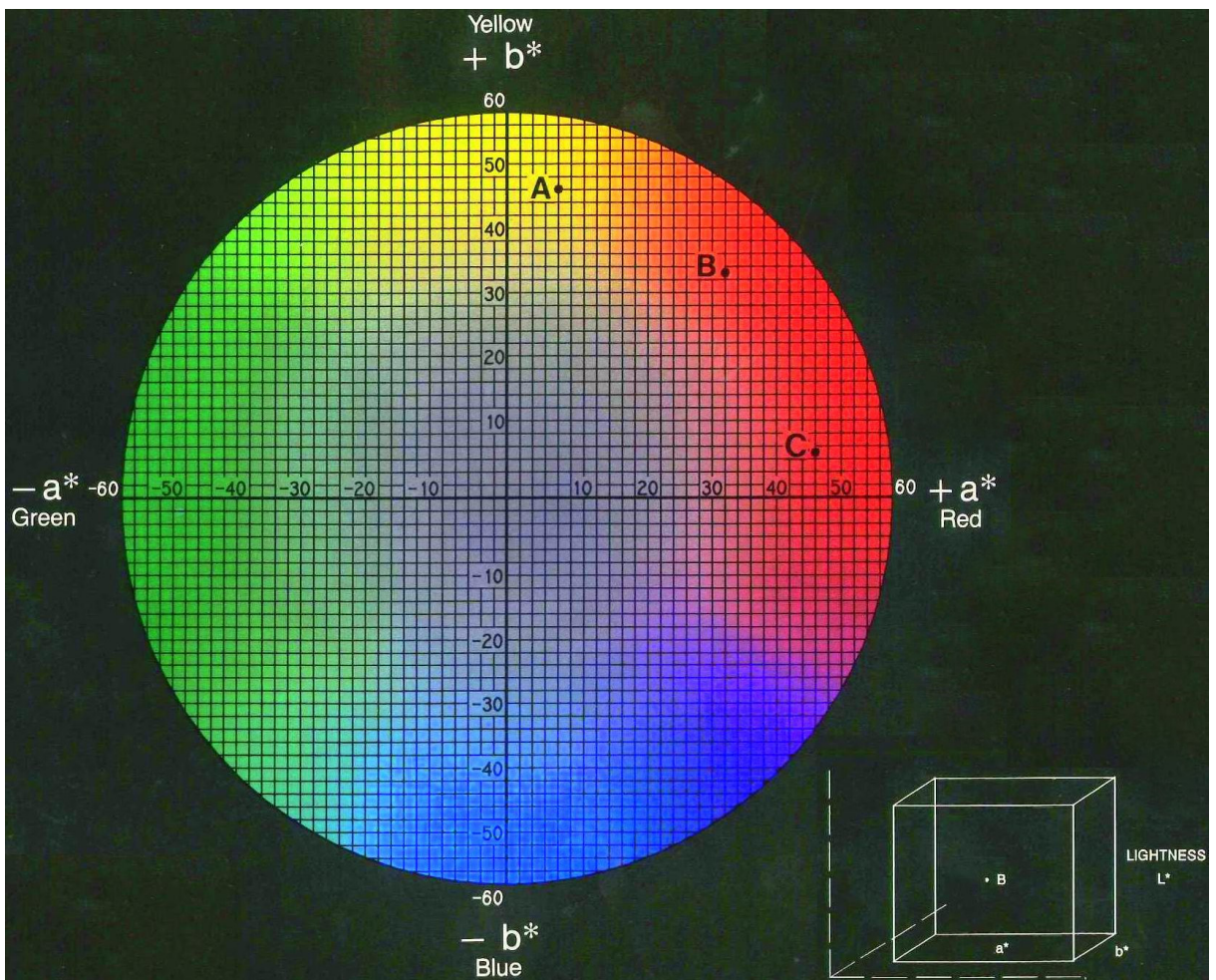
Příloha 17 – Digitální Shoreův tvrdoměr typ C



Příloha 18 – Přenosný spektrofotometr Datacolor Check Plus



Příloha 19 – Standardizovaný prostor pro měření barevnosti (x-rite[®])



Příloha 20 – Struktura vybraných vzorků:

• **s nejmenší měrnou hmotností (nahore)**

• **s největší měrnou hmotností (dole)**

