

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní

Obor 23 – 03V Strojní inženýrství

zaměření
Tváření kovů a plastů

Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů

**MECHANICKÉ VLASTNOSTI STUDENÝCH SPOJŮ VE
VÝSTŘICÍCH Z TERMOPLASTŮ.**

**MECHANICAL PROPERTIES OF WELD LINES IN
THERMOPLASTIC INJECTION MOULDING PARTS**

Ing. Jaroslav Loufek

UNIVERZITNÍ KNIHOVNA
TECHNICKÉ UNIVERZITY V LIBERCI



3146071312

Školitel: Doc. Ing. Josef Krebs, CSc.

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	127
Počet obrázků:	88
Počet tabulek:	35
Počet příloh:	16
Počet výkresů:	1

Keywords – Klíčová Slova

weld lines (knitting line) – studené spoje, macromolecule – makromolekula,
mechanical properties – mechanické vlastnosti, fracture – lom,
injection mold – vstřikovací forma,
injection moulded part – výstřik (díl vyrobený vstřikováním),
separate flowing streams of melt – oddělené proudy taveniny,
macromolecular configuration - makromolekulární struktura,
viscosity – viskozita, crystallographic lattice – krystalografická mřížka,
transition temperature – přechodová teplota,
free volume – volný objem,
the Gibbs function – Gibbsova rovnice,
energy barrier – energetická bariéra,
frequency factor – funkce přeskoků vyjádřená frekvencí,
local motion – lokální pohyby,
configurational entropy – strukturní entropie,
activation energy – aktivační energie,
vacant sites – volná místa,
fraction – segment makromolekuly,
diffusion - difuze,
tool – nástroj,
test specimen – zkušební těleso,
insert – tvarová vložka,
tensile strength – pevnost v tahu,
impact and notched strength – rázová a vrubová houževnatost,
technological parameters – technologické parametry,
construction parameters – konstrukční parametry,
mold temperature – teplota formy,
melting temperature – teplota taveniny,
injection pressure – vstřikovací tlak,
setup of injection cycle – nastavení vstřikovacího cyklu,
distance from sprues – vzdálenost od ústí vtoku,
PVT – diagram - schéma vstřikovacího cyklu vyjádřený v pvt parametrech,
factor's analysis – faktorová analýza,
distribution – rozdělení,
range – rozpětí,
moldflow analysis - analýza toku,
filling - plnění,
cooling – chlazení,
stress analysis – napěťová analýza,
semi – crystalline polymer – semikrystalický polymer,
polymer morphology – morfologie polymerů.

Anotace

Téma práce: Mechanické vlastnosti studeného spoje ve výstřicích z termoplastů.

Disertační práce pojednává o vzniku studených spojů při obtékání kovových vložek různého tvaru a velikosti ve vybrané vstřikovací formě a jejich účinku na mechanické vlastnosti. Pomocí simulace tokových podmínek a experimentálního měření byly hodnoceny účinky jednotlivých konstrukčních a technologických parametrů na výsledné mechanické hodnoty studeného spoje. K získání zkušebních vzorků a těles bylo potřeba vyrobit a odzkoušet potřebné nástroje. Experimentální měření a CAD/CAM simulace pomůže udělat si představu o vlivu zvolených parametrů na studené spoje při obtékání různých tvarů a tím minimalizovat problémy s jeho vznikem a jeho mechanickými hodnotami.

Theme of presented work: Mechanical properties of weld lines in thermoplastic injection moulding parts.

Thesis deals with formation of weld lines during flowing melt front around cores of different shapes and sizes in chosen injection mould and their impact on the mechanical properties. Measurements were carried out by means of experiments and simulation. There were evaluated effects of individual construction and technological parameters in relation to resulting mechanical properties of weld lines. It was necessary to produce and test a mould and instruments in order to obtain test specimens. Large range of measurement together with CAD/CAM simulation help us to make conclusion about influence of particular parameters and then optimise problems with weld line rising and its mechanical properties.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	5
1. ÚVOD	7
2. TEORETICKÁ ČÁST	9
2.1 Současný stav sledování vad plastů	9
2.2 Fyzikální popis procesu vstřikování	9
2.2.1 Vady při vstřikování	11
2.2.2 Studeného spoje	11
2.2.2.1 Vznik studeného spoje při vstřikování termoplastů	12
2.2.2.2 Typy a strukturní vady studeného spoje	15
2.2.2.3 Teorie vzniku studených spojů	18
2.2.2.4 Vliv technologických podmínek na studené spoje	23
2.2.2.5 Odstranění studeného spoje	25
2.3 Experimentální metody	26
2.3.1 Tahová zkouška	27
2.3.2 Rázová zkouška	28
2.4 Faktorová analýza	30
2.5 Simulační programy	32
2.5.1 Charakteristika simulačního programu STRIMFLOW	32
2.5.1.1 Popis systému STRIMFLOW	33
2.5.1.2 STRIMFLOW/Fill	34
3. EXPERIMENT	35
3.1 Záměr experimentů	35
3.1.1 Podmínky zkoušky a použité zařízení	38
3.2 Použité termoplasty	40
3.3 Vstřikovací forma	43
3.4 Naměřené hodnoty a grafy pro pevnost studeného spoje v tahu	43
3.4.1 Porovnání SP v tahu pro tvary a používané materiály	76
3.5 Naměřené hodnoty a grafy pro houževnatost studené spoje	76
3.6 Faktorová analýza	97
4. Konstrukce modelu a výsledky simulace	98
5. DISKUSE VÝSLEDKŮ	106
5.1 Hodnocení dosažených výsledků	106

5.2 Simulační výpočty	117
5.3 Faktorová analýza	121
6. ZÁVĚR	124
7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	126

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

SP	-studené spoje,
P _{sp}	-počet studených spojů,
P ₁	-počet tvarových jader,
P ₂	-počet vtoků,
η_0	-viskozita jako funkce tlaku a teploty [Pa.s],
$\dot{\gamma}$	smyková rychlost [s ⁻¹],
τ	smykové napětí [MPa],
V	rychlost reakce,
Q	aktivační energie pochodu [J],
k	Boltzmanova konstanta [J/K],
T	absolutní teplota, resp. teplota [K],
α	pozice atomu při přechodu z jednoho rovnovážného stavu do druhého,
β	pozice atomu při přechodu z jednoho rovnovážného stavu do druhého,
α^*	aktivovaný komplex,
kk'	přímka přechodu atomu z jedné pozice do druhé,
ΔE_c	energie na vytvoření volných míst [J],
P _{cf}	pravděpodobnost konfigurace volného objemu,
ΔE_f	energie vztažená k uzlům a pohyblivým částem makromolekul [J],
f	pružné pohyblivé oblasti,
c	volná místa,
$\nu_{\alpha\beta}$	střední doba setrvání v potenciální jámě [s],
ν_0	počet pokusů atomů, aby se dostal přes potenciální bariéru [s ⁻¹],
ΔG	změna Gibbsovy energie [J],
ΔH	změna aktivační entalpie [J],
ΔS	změna entropie [J/K],
J ₀	frekvenční faktor [s ⁻¹],
γ	typ pohybu makromolekuly,
δ	typ pohybu makromolekuly,
ν_g	frekvenční faktor při teplotě T _g [s ⁻¹],
C ₁ , C ₂	konstanty WLF rovnice,
θ	teplota [K],
T _f	teplota formy [K],
T _t	teplota taveniny [K],
p _{vst}	vstřikovací tlak [MPa],
a_{kl}	faktor studeného spoje,
σ_Y, σ_B	tahové napětí při maximálním zatížení studeného spoje [MPa],
σ_1, σ_2	hlavní normálové napětí [MPa],
F	hodnota Fischerova rozdělení,
F _{krit}	kritická hodnota Fischerova rozdělení,
A, B, C	označení pro velikost tvarových jader,
A	faktor velikosti tvarových jader ve faktorové analýze,
B	faktor technologického nastavení ve faktorové analýze,
C	faktor vzdálenosti od ústí vtoku ve faktorové analýze,
α	hladina významnosti,
d	rozdíl hodnot mechanických vlastností při přechodu z jedné úrovně na druhou,
t _{α}	hodnota Studentova rozdělení na hladině α ,
S _r	reziduální čtverec,

μ	celkový průměr,
ε	experimentální nebo náhodá chyba,
τ_i	efekt (vlivu) i-té úrovně faktoru,
q	sloupcový faktor,
T_1 až T_5	technologické nastavení stroje,
PA	polyamid,
PE	polyetylén,
PS	polystyrén,
ABS	akrylonitrilbutadienstyren,
CAD	počítačová podpora konstruování,
CAM	počítačová podpora výroby,
MKP	metoda konečných prvků.

1. Úvod

Plasty jsou dnes materiálem, který má uplatnění v mnoha odvětvích především v automobilovém průmyslu, jsou výchozí hmotou mnoha finálních výrobků a například moderní design našich užitných předmětů je bez nich nemyslitelný. Vývoj plastů je však provázen i obavami, jak bude nakládáno s těmito materiály po době jejich životnosti z nich vyrobených produktů. Recyklace termoplastů zvyšují možnosti vyrobených dílů. Poslední výsledky technologií umožňují recyklaci a čeká je další perspektiva. Překotný nástup nových, po léta u nás jen těžko dostupných technologií zpracování plastů otevřelo sice nové možnosti podnikání, na druhé straně však přineslo i určitou stagnaci vlastního vývoje.

Výroba kvalitního spotřebního zboží sebou nese nároky na výrobce. Neustále inovace sortimentu, jeho úplnost v typorozměrových řadách vyžaduje investice do nových technologií, technologických zařízení, modernizaci. Konkurence nutí k vysoké produktivitě práce při minimalizaci provozních nákladů a samozřejmě také k certifikaci dle ISO i jiných norem. Obstojí, buď firmy s výrobky ze špičkových materiálů, které mají výhodné užitné vlastnosti, ale také zvládnutou technologii, nebo firmy s vysokými požadavky na kvalitu výrobků, které jsou napojeny na montážní práce a následné operace. Všichni technici, kteří se podílejí na výrobě součástí z plastů, počínaje konstruktérem výrobku, konstruktérem formy až po technology ve výrobním závodě usilují o to, aby výrobky vykazovaly co nejvyšší funkční spolehlivost a dostatečnou životnost. Proto se věnuje velká pozornost zajištění maximální kvality. V praxi kvalita není ve většině případů dána pouze jedním kritériem, nýbrž se zpravidla jedná o souhrn několika vlastností, které vyplývají ze specifického poslání výrobku.

Základním předpokladem uplatňování plastů je zvládnutí technologie výroby. Nejrozšířenější technologií výroby plastů je vstřikování, kde je možno kvalitu hodnotit ve dvou základních skupinách: a) hodnocení procesu vstřikování a b) hodnocení výstřiku. Obvykle se kombinují oba způsoby, protože s touto technologií je spojena řada aspektů. Jsou to především: návrh dílů, výběr vhodného materiálu, správná konstrukce formy a v neposlední řadě zpracovatelské podmínky. Vstřikovací proces je tvořen mnoha parametry a tudíž i při velmi kvalitní přípravě výroby a zvláštního příslušenství stroje, které je zaměřeno na sledování kvality, dochází velmi často ke vzniku vad výstřiku. Tyto vady, pokud nejsou velmi rychle a pružně řešeny, mohou způsobit výpadky výroby a v nejhorším případě, ztrátu odběratelů.

Tato práce je zaměřena na jednu z nejrozšířenějších vad vyskytujících se v technologii vstřikování termoplastů – *studené spoje*. Někteří výrobci i zpracovatelé poskytují určitá doporučení a nezávazné pokyny v případě vzniku v soustavě: **stroj – nástroj – materiál**, existují i algoritmy logických postupů, včetně obrázkové dokumentace. Tyto všeobecné pokyny a návody však nepokrývají dostatečně celkovou problematiku vzniku, vlivu a účinků studených spojů. V mnoha případech výrobci při výskytu této vady mohou měnit jen určitá kritéria např. nastavení stroje, protože materiál je navržen na určité mechanické hodnoty a dodatečná úprava formy sebou přináší další problémy, jako je např. odstávka výroby, narušení vzhledu výrobku aj. Tato práce se zabývá nejenom příčinami vzniku a návrhem řešení, ale pomocí CAD/CAM/CAE softwaru predikcí již v návrhu tvaru a konstrukci formy tuto vadu eliminovat. V některých případech, kdy tvarová složitost a funkčnost výrobku

s mechanickými vlastnostmi a především pevností studeného spoje. Tuto problematiku řeším v experimentální části své práce, kde na základě zvolených technologických, konstrukčních a materiálových kritérií vyhodnocuji mechanické vlastnosti. Výsledkem je stanovení optimálních podmínek při největších hodnotách mechanických vlastností.

Tato práce by měla být přínosem především pro konstruktéry a technologů, kteří se největší měrou podílejí na celkovém tvaru a přípravě výrobku do výroby.

Z předchozích úvah vyplývají stanovené cíle řešení :

1. Teoretický rozbor sledované problematiky studených spojů podle současných poznatků se zaměřením na :

- vstřikování termoplastů,
- vliv technologických podmínek ,
- způsoby řešení v soustavě stroj-nástroj-materiál.

2. Provedení simulace procesu vzniku studeného spoje při obtékání různých typů tvarových jader pro vybranou vstřikovací formu, pro shodné parametry jako u experimentálních měření. Analýza procesu a vytvoření několika variant vtokového systému, které by potlačily vznik studených spojů, nebo by je umístily, do konstrukčně a technologicky vhodnějších míst.

3. Provedení experimentálních měření teplotních polí na vybrané vstřikovací formě.

4. Vyhodnocení vlivu technologických a konstrukčních parametrů, které jsem plánovitě měnil při jednotlivých sadách měření, na zvolené mechanické vlastnosti.

Přehled publikací k této problematice:

- /1/ LOUFEK J. – LENFELD P. : **Mechanické vlastnosti studeného spoje**, In Sborník mezinárodní konference "Plastko 2001", Academium centrum Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně 2001, ISBN 80-7318-009-X.
- /2/ LOUFEK J. - SÚRA R. - ŠOLTÉSOVÁ Z. : **Vliv studeného spoje na mechanické vlastnosti**, In Sborník mezinárodní konference „Nové materiály a technologie“, TU Liberec 2000, s. 110 - 116., ISBN 80-7083-404-8. (Mechanical properties of weld lines, International conference New materials and technology, Liberec 2000)
- /3/ LOUFEK J. - LENFELD P. : **WELD LINES IN MOULDINGS WITH SEVERAL HOLES DIFFERENT SHAPES AND PROCESSING CONDITIONS**, 16. FACHTAGUNG über Verarbeitung und anwendung von polymeren, Technische universität chemnitz, Chemnitz, 1999, (pp 8), ISBN 3 -00 - 004710 – 7.
- /4/ LOUFEK J. – LENFELD P. : **Studium studeného spoje ve výstřiku s různými typy otvorů a různými podmínkami zpracování**. In Sborník konference“ Transfer‘99“, Brno, červen 1999 ISBN 80-214-1341-7, K29 (Studium of weld lines under different processing conditions, Conference - Transfer 99, Brno 1999).
- /5/ LOUFEK J – LENFELD P. – KREBS J. : **Aplikace systému STRIM 100 při vstřikování termoplastů**. In Sborník přednášek z mezinárodní konference „Vstřikování plastů“ Praha 1998, s. 148-155.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. Současný stav sledování vad plastů /1/, /2/, /3/

Strojírenské výrobky z plastů tvoří nejen klasické strojní součásti, tj. závitové a nýtované spojovací prvky, kotouče, kladky, lana, ozubená kola, ložiska, tlumící prvky, potrubí, ale i tvarově velmi rozmanité páky, rotory atd. Výrobky jsou většinou individuálně řešené pro konkrétní účely, aby se využilo výhod snadného tvarování nebo tvarování ve formách bez nákladného dodatečného obrábění. Plasty mají vzhledem ke svému polymernímu základu odlišné vlastnosti než kovy, dřevo, keramické materiály aj. Mají také specifické výrobní a zpracovatelské způsoby, což všechno je třeba vzít v úvahu při navrhování tvarů a rozměrů výrobků.

Pod pojmem „vada výstřiku“ se rozumí defekt na výrobku, kterým se liší jeho vzhled, rozměry, tvar a vlastnosti od předem stanoveného normálu (standardu), specifikovaného výkresem, referenčním vzorkem nebo schválenými přejímacími podmínkami. Odchylka od příslušných norem, případně sjednaných technických podmínek, se může týkat tvaru, rozměrů, hmotnosti, vzhledu, vnitřního stavu výrobku nebo jeho mechanických a fyzikálních vlastností. Jejím důsledkem je změna užitných vlastností výrobku, v extrémním případě až ztráta funkčnosti. Norma ČSN 640052 rozděluje viditelné vady do čtyř skupin:

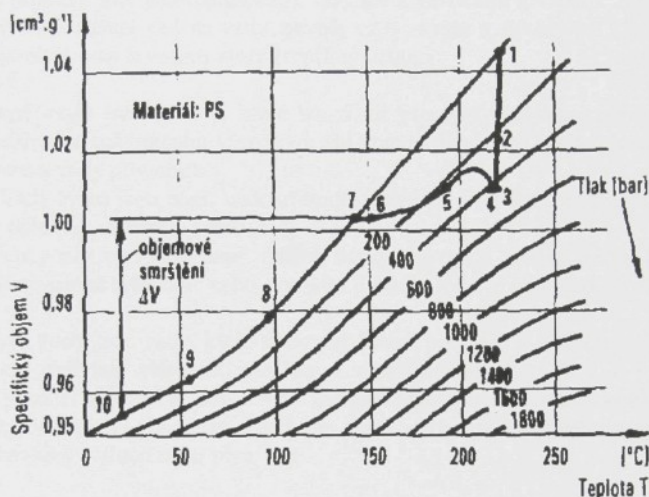
1. Všeobecně přijatelné vady, které nemají vliv na funkci a životnost výrobku.
2. Omezeně přijatelné vady, které neovlivňují použitelnost výrobku, pokud jejich povaha, velikost a množství nepřekročí dohodnutou míru. Jejich rozsah je dán dohodou mezi výrobcem a odběratelem.
3. Opravitelné vady jsou takové odchylky od standardu, jejichž oprava vhodným způsobem je příslušnou normou dovolena nebo není výslovně zakázána. Lze je odstranit, aniž by byla ovlivněna použitelnost výrobku. Způsob opravy musí být předem dohodnut mezi dodavatelem a odběratelem.
4. Nepřijatelné vady, které nelze opravou odstranit buď vůbec, anebo pouze způsobem, který by ovlivnil použitelnost výrobku a který sjednané technické podmínky nepřipouští.

Norma dále rezeznává čtyři hladiny přípustnosti vad, přičemž první hladina stanoví nejprísnejší kritéria a připouští pouze vady 1. skupiny, tj. vady všeobecně přijatelné, zatímco čtvrtá hladina připouští výrobky s omezeně přijatelnými vadami.

2.2. Fyzikální popis procesu vstřikování /4/, /5/

Vstřikovací cyklus z termodynamického pohledu v diagramu p-v-T (viz. obr. 1) je soustava dějů, kde se střídá isochorický, isobarický, probíhají tu i změn všech tří veličin najednou. Znalost časových změn objemu, tlaku a teploty v daném místě taveniny, v dutině vstřikovací formy umožňuje předpovídat i počítačově simulovat např. smrštění konkrétního výstřiku. Výsledkem působení těchto fyzikálních veličin spolu s vlastnostmi zpracovávaného materiálu určí mechanické i vzhledové vlastnosti výsledného produktu. Vzhledem k tomu, že celý proces vstřikování je nestacionární a s vlivem

mnoha parametrů v soustavě stroj-nástroj-materiál, je zdrojem mnoha různých vad, které představuje i studený spoj.



Obr. 1 : P-V-T diagram pro PS.

K jednotlivým pozicím na obrázku je možno přiřadit tyto reálné průběhy vstřikovacího cyklu:

1. začátek plnění formy,
2. dutina formy je objemově naplněna,
3. konec kompresní fáze vstřikovacího cyklu,
4. přepnutí ze vstřikovacího tlaku na dotlak (částečné odlehnutí taveniny od stěny formy, tok taveniny v rozvodných kanálech),
5. průběh dotlaku,
6. vtokové ústí zamrznuo,
7. tlak dosáhl atmosférické hodnoty (počátek vzniku objemového smrštění),
8. střední teplota taveniny až po hodnotu zamrznutí toku,
9. vyhození výstřiku z formy,
10. výstřik dosáhl teploty okolí.

Průběh izobary mezi bodem 7 až 10 je dán teplotním gradientem chlazení ve formě (7 až 9), resp. v okolním prostředí po vyhození výstřiku z formy (9 až 10).

2.2.1 Vady při vstřikování /1/, /6/

Vstřikování termoplastů je nejrozšířenější výrobní způsob vhodný pro výrobu tvarových předmětů. Vstřikování od svých prvopočátků prodělalo veliký vývoj. V současné době se používá různých vstřikovacích procesů: např. dvou nebo více – komponentní vstřikování, kaskádové vstřikování nebo moderní metody vstřikování s pomocí plynu (HELGA proces), či lamelární vstřikovací proces (LIM), přestože jsou tyto moderní procesy plně automatizované, dochází k defektům a vadám. Z praktického hlediska je užitečné dělení vad na **vady zjevné**, **vady skryté** a **závady při vlastním vstřikování**, které ovšem mají k vadám výstřiku přímý vztah.

I. Zjevné vady jsou takové, které lze zjistit prostým vizuálním porovnáním výrobku se schváleným referenčním výrobkem čili standardem. Dělí se do dvou skupin, a to na vady tvaru a vady povrchu.

A. Vady tvaru jsou např. nedostříknuté výrobky, přetoky, otrěpy, propadliny a vtaženiny, zborcení tvaru, atd.

B. Vady povrchu jsou např. změna barvy materiálu, nedostatečný lesk, stříbření, jemně rýhovaný nebo pórovitý povrch, tokové čáry, mikrotrhlínky aj.

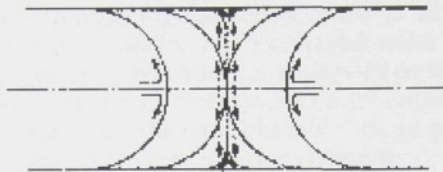
II. Skryté vady jsou vady, které sice není možné postihnout běžnou vizuální kontrolou, ale které ovlivňují vlastnosti výstřiku a zhoršují jejich kvalitu. Lze je zpravidla zjistit teprve pomocí vhodného zkušebního zařízení nebo laboratorními zkouškami, které mohou mít i destrukční charakter. Patří sem např. vnitřní pnutí, *studené spoje*, vakuové bubliny, uzavřený vzduch nebo plyn, atd.

III. Závady při vstřikování mající vztah k vadám výstřiků – k těmto závadám patří např. stopy na výstřicích po vyhazovačích, deformace výstřiku při vyhazování z formy, hlavní vtokový kanál (vtokový kužel) se nedá vytáhnout z otvoru ve vtokové vložce, aj.

Studené spoje lze řadit do *omezeně přijatelných vad* a zároveň do *vad skrytých*.

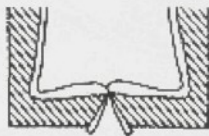
2.2.2 Studené spoje /3/, /5/, /7/, /8/, /9/, /10/

Studené spoje (dále jen SP) ve vstřikovaných výrobcích z termoplastů vznikají v místech styku a spojení proudu taveniny, obvykle bez oboustranného směšování, nebo smyku. Místní podmínky určují detaily tvorby SP. Tento proces toku a tavení způsobuje narušení morfologie a tím i nehomogenitu struktury a změnu mechanických vlastností. V nejlepším případě to mohou být sotva znatelná znamení na výstřiku, v tom nejhorším případě výrobek v těchto místech praská, protože to jsou potenciální místa pro iniciaci a rozšiřování trhlin. Místo styku není tak pevné jako u homogenního polymeru. Pokud dojde k čelnímu spojení dvou oddělených toků taveniny, vzniká SP nejčastěji ve střední části. Tak jak čelo taveniny dále postupuje, rozšiřuje se studený spoj po tloušťce, až dosáhne líce formy. Na obr. 2 je uvedeno schéma postupu čela taveniny při vstřikování. Vzhledem k tomuto jevu existuje riziko vzniku vzduchových bublin a reálné nebezpečí jemných povrchových vad, odvodušňovací šterbiny.



Obr. 2 : Schéma postupu čela taveniny.

Uzavřený vzduch může vést také ke skrytým trhlinám a v extrémních podmínkách při postupu taveniny tlačí vzduch před sebou, zahřívá se a může vést až k tzv. Diesel efektu. Studené spoje se mohou objevit např. ve vyfukování obr. 3 na vnitřní straně tenkostěnných lahví, trubek, profilů.



Obr. 3 : Studený spoj při vyfukování.

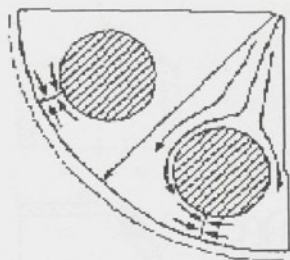
2.2.2.1 Vznik studeného spoje při vstřikování termoplastů /5/, /7/, /8/

Při vstřikování uzavřených a tvarově složitých výrobků je nevyhnutelný vznik několika oddělených proudů taveniny. Studený spoj se pak tvoří z jedné, nebo více následujících příčin:

- tavenina proudí okolo překážek a za nimi dochází ke spojení: mohou to být tvarová jádra ve výstřicích nebo výliscích, vyfukovací trn, atd.
- volba vtoku, vícenásobné vstřikování, nebo vstřikování tryskami odděleně umístěnými ve formě,
- v jednonásobné formě existuje v případě volného toku v tlusté části a omezeného toku v zúžené části, tj. při rozdílných tloušťkách stěn vstřikovaných výrobků,
- v průběhu vstřikování určitých typů výstřiků, za použití úzkého vstupního ústí do vstřikovací formy, který způsobí turbulentní tok,

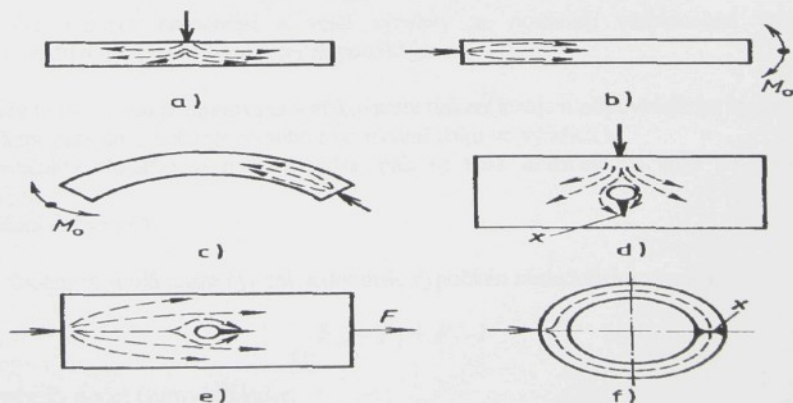
ad (a) Jakékoliv zbrzdění toku materiálu ve formě, lokální omezení toku taveniny (např. náhlými změnami v tloušťce stěny, ostrými vnitřními rohy) zvyšuje riziko tvorby studeného spoje. Přizpůsobení ve formě, volný tok taveniny, správná volba ústí jsou způsoby, kterým lze problém eliminovat, ale hlavním faktorem pro optimální mechanické vlastnosti je nalezení optimálních zpracovatelských podmínek.

podmínek. Překážky v dráze toku hmoty s vlákny mohou tvořící se makrostrukturu ovlivnit rozhodujícím způsobem. Obr. 4 schematicky ukazuje makrostrukturu s kruhovým otvorem. Rozdělený proud hmoty, který se za překážkou toku znovu spojuje, se na stykové ploše nemísí. Tím více vzniká stejně jako na stěně formy ve středu tyče zóna s přísnou podélnou orientací, která podíl podélně orientovaných vláken proti oblasti před překážkou přibližně zdvojnásobuje. Při zatížení v kolmém směru by se tato podélně orientovaná zóna jevila jako slabé místo. Jak na mechanické vlastnosti, tak na stabilitu rozměrů působí směr orientace velmi významně.



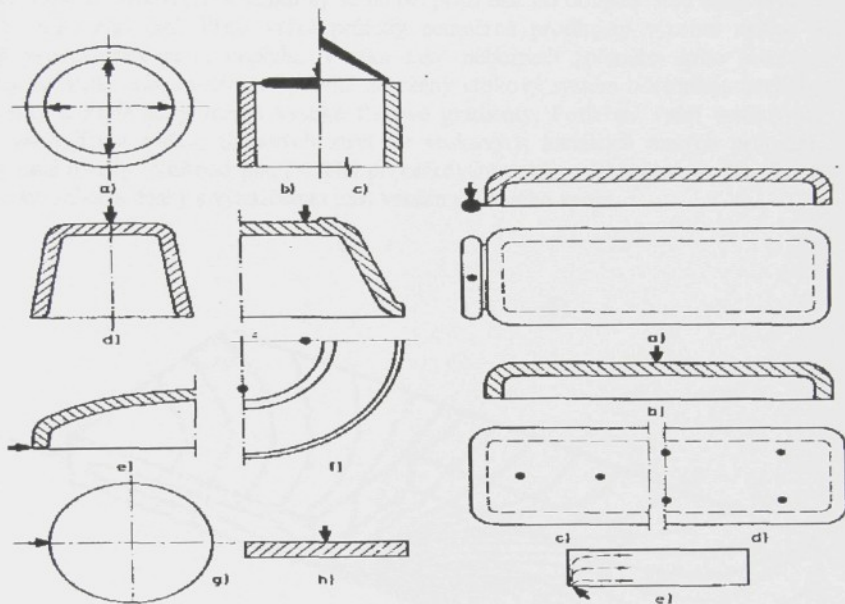
Obr. 4 : Tok taveniny při obtékání překážek.

ad (b) Při vstřikování termoplastů má druh a umístění vtoků podstatný vliv na proudění taveniny ve formě, vytváření SP, orientaci makromolekul a plniva, rovnoměrnost krystalizace, anizotropii vlastností a rozměrů, povrchový vzhled (lesk, tokové čáry) apod. Vtok má být zásadně řešen tak, aby tavenina naplnila formu nejkratší cestou bez teplotních a tlakových ztrát, co nejrychleji a pokud možno v nejkratším čase. Tento cíl je snáze dosažitelný u menších a tvarově jednoduchých výstřiků než u rozměrných a tvarově členitých. Umístění vtoků u výstřiků z termoplastů a vznik SP je na obr. 5 : a) nevhodné pro ohybové namáhání, b), c) správné, d) nevhodné pro namáhání tahem, e) správné, f) nevhodné, vznik SP (označen písmenem X).



Obr. 5 : Umístění vtokových ústí (značeno plnou šipkou). /3/

Boční vtok např. u pouzder, kelímků, rotačních výstřiků je zásadně nevhodný, protože SP vzniká na protilehlé straně a zasahuje prakticky v celou tloušťku stěny. Kromě toho nelze takto dosáhnout přesně kruhového tvaru, výstřik bývá oválný. Vhodné umístění vtoků pro různé geometrické tvary je na obr. 6, jsou tam zobrazeny vtoky: a) čtyři bodová vtoková ústí, b) diskové vtokové ústí, c) deštníkové vtokové ústí, d) středové vtokové ústí do dna, e,g) boční vtokové ústí, f) čtyři vtoková ústí do dna u větších výstřiků, h) středové vtokové ústí u kotoučů.



Obr. 6 : Vhodné umístění vtoků pro různé tvary. /3/

Pro tvarově náročnější a větší výrobky se používají vícenásobné vtoky. Nejčastější důvody, které vedou k jejich použití jsou:

- délka toku, pokud je limitována vstřikovacím tlakem stroje a odpovídajícím vtokem,
- snížení smršťení a nehomogenního rozvrstvení tlaku ve výstřicích,
- proměnlivé tloušťky a tvarová jádra, pak se vtok umísťuje do míst s nejtlustší stěnou,
- snížení doby cyklu.

Počet studených spojů může být pak jednoduše vypočítán následujícím výrazem:

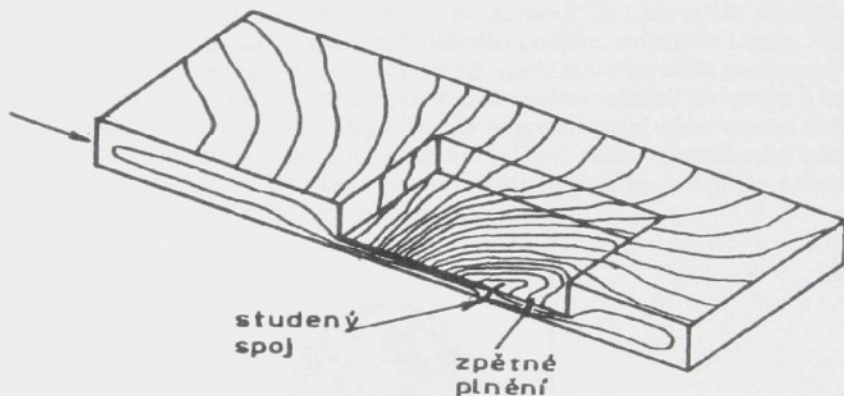
$$P_{sp} = P_1 + P_2 - 1 \quad (1)$$

kde značí: P_1 počet tvarových jader;

P_2 počet vtoků.

Vícenásobné vtoky mohou minimalizovat tlakové gradienty, a pokud tlakové gradienty způsobují významné problémy při vstřikování, je jejich použití oprávněné. Při tomto ději bude studený spoj výrazný v kompozitech s krátkými vlákny, nebo minerálními plnivy pro absenci vláken přemostňující spoj, a pokud materiál obsahuje krátká skleněná vlákna, nebo jiné přídavky, orientace je pak určena jejich vrstvením a polohou v matici.

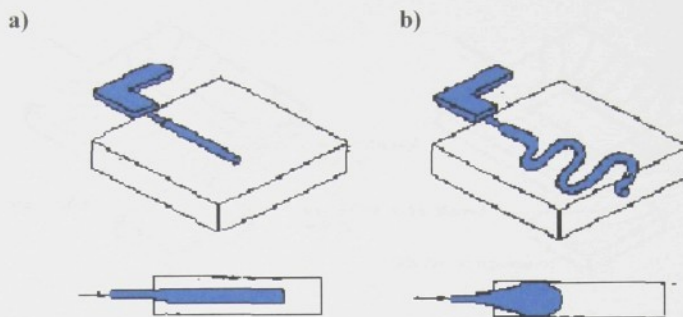
ad (c) Průměr vtokových kanálků by se neměl příliš lišit od tloušťek stěn dílce zvláště v okolí vtokového ústí. Příliš velké průřezy neúměrně prodlužují výrobní cyklus a zvyšují procentuální podíl odpadu. Vzniká také nebezpečí zpětného toku taveniny z dutiny do vtokového systému. Správně navržený vtokový systém odstraňuje uvedené nedostatky a zajišťuje poměrně vysoké tlakové gradienty. Potřebný vyšší vstřikovací tlak, vyplývající z vyšších tlakových ztrát ve vtokových kanálcích malých průměrů, snižuje také rozdíly vnitřního pnutí v dílci při celkovém poklesu jeho úrovně. Na obr. 6 je uvedeno schéma desky s vyznačením míst vzniku studeného spoje.



Obr. 7 : Vznik studeného spoje restrikcí toku taveniny.

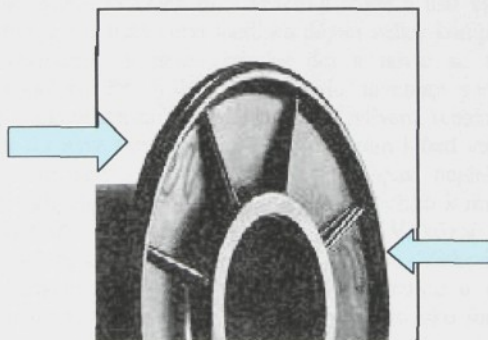
Návrh a konstrukce výrobku můžeme ovlivnit změnou tloušťky stěny, technologickými žebry a dalšími úpravami tvarů umístění SP. Lze to provést velmi jednoduše, například simulací pomocí CAD/CAM programu (CAD - počítačová podpora návrhu, CAM počítačová podpora výroby) vybrat optimální poměr tloušťek a tím volit polohu SP do míst s nejmenším napětovým zatížením.

ad (d) Ve vstřikování, pokud protilehlá stěna je dostatečně vzdálená, poté může dojít také k tzv. „jetting“ taveniny a „bucklingu“ (viz. obr.8).



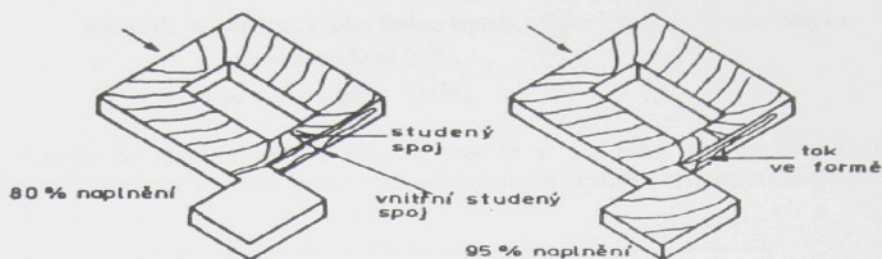
Obr. 8 : Zobrazení proudu při a) „jettingu“ a b) „bucklingu“.

Tavenina při vysoké objemové rychlosti a nízké viskozitě je vstříknuta do dutiny formy bez dotyku se stěnami – „jetting“. Když proud dosáhne protilehlé stěny dalším doplňováním, dojde ke hroucení proudu taveniny a tuhnutí na stěnách – „buckling“. Proud taveniny je přerušen a tavenina vyplní zbytek prostoru diskovitým rozšiřováním tak, jak teče přes ochlazený zhroucený proud, a tím dojde ke vzniku studeného spoje jak je ukázáno šípkami na obr.9. Zhroucený proud a studené spoje oslabují mechanické vlastnosti a zhoršuje vzhled výrobku. Experimentální práce naznačují, že „jetting“ se objevuje, pokud konečný rozměr proudu je menší než minimální tloušťka vtokového kanálu. Výsledný rozměr proudu zahrnuje zvlnění, ačkoliv při vysokém vstřikovacím poměru zvlnění nemusí být plně vyvinuto. Možná náprava je ve zvýšení rozměru ústí vtoku a ve snížení momentu proudu tj. snížení délky toku, aby se proud vlastní vahou nezačal vlnit a vzhledem k postupu taveniny netvořil momentové zatížení, nebo v přesměrování toku tak, aby se při opuštění ústí tavenina rovnoměrně rozprostřela po celé ploše v těsné blízkosti stěn výrobku a ve snížení teploty vstřikovaného plastu.



Obr.9 : Studený spoj na výrobku se zřetelnou stopou „bucklingu“.

V oblastech s výskytem tohoto jevu se vytváří vnitřní studený spoj. V oblastech, ve kterých se tento jev vyskytuje, vytváří vysoké vnitřní pnutí, případně i dutiny obr.10. Umožňuje pochopit předpoklady vzniku toku ve formě. Asi při 80% naplnění se setkávají oba proudy taveniny a vytváří studený spoj. Při dalším plnění se prorazí tento spoj ve vnitřní části stěny (povrch je již zcela ztuhlý) a proudové čáry se deformují.



Obr. 10 : Schéma desek s vyznačením podtékání

Následkem protéká další část hmoty při plnění

2.2.2.2 Typy a strukturální vady studeného spoje /10/, /11/, /12/, /13/, /14/

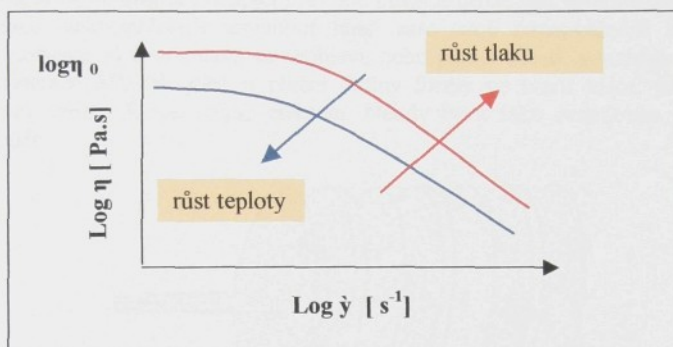
Rozdílné podmínky toku čela taveniny při spojení mají důležitý význam na výsledné vlastnosti SP. V případě vícenásobného vtoku se potkávají nezávislé proudy, avšak v případě toku okolo překážek se základní proud rozdělí a následně spojí v relativně krátké vzdálenosti. BOUNDY A BOYER /11/ našli ve svých analýzách polystyrénu existenci dvou rozdílných mechanismů vzniku SP, které mají rozdílné vlivy na pevnost. Rozlišují mezi tzv. „studeným spojením“ a „horkým spojením“, jenž vzniká při obtékání překážek ve formě. Oba autoři stanovili pevnost vzorků z PS obsahující „horký spoj“ na 75 % a u „studeného spoje“ na 50% celkové pevnosti materiálu bez SP. Z těchto důvodů jsou SP slabinou ve výstřicích z termoplastů. Při použití standardních tahových zkoušek lze velmi jednoduše demonstrovat, že procentuální snížení pevnosti je závislé na zpracovatelských podmínkách a typu použitých termoplastů.

Při vstřikování plastů tavenina přes vtokový kanál a ústí vtoku proudí do formy. Plnění dutiny formy je z teoretického hlediska dějem velice komplikovaným, protože se jedná o děj nestacionární a neizotermický děj a navíc se taveniny chovají jako newtonovské kapaliny. Při styku čela proudů taveniny s vtokovou soustavou a formou dochází k okamžitému zchladnutí, které vlivem tepelné vodivosti polymeru postupuje směrem do nitra taveniny a zároveň směrem k ústí vtoku. Tavenina zůstává ve vysoce viskózním stavu, v nitru kanálu je naopak nejdéle tekutá a poměrně nízkoviskózní. Při pohybu několika proudů taveniny dochází k míšení a spojování, které je závislé na viskozitě, teplotě taveniny a tlaku. Viskózní chování materiálu je nejdůležitější pro určení délky toku, vstřikovacího tlaku. Viskozita je kromě teploty a tlaku závislá na smykovém napětí. Vztah mezi viskozitou a smykovým napětím je nejlépe popsán mocninovým zákonem. Samotná viskozita jako funkce teploty a tlaku se pak nechá popsat jako smyková viskozita - vztah (2).

$$\eta = \frac{\eta_0(T, p)}{1 + \left[\frac{\eta_0 \cdot \dot{\gamma}}{\tau} \right]^{1-n}} \quad (2)$$

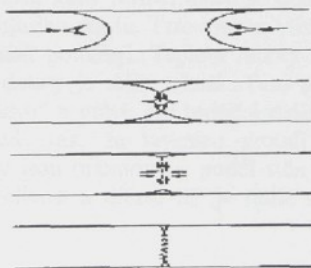
kde značí: η_0 viskozita, jako funkce teploty a tlaku [Pa.s], při absenci smyku,
 $\dot{\gamma}$ smyková rychlost [s^{-1}],
 τ smykové napětí [MPa].

Viskozita se mění s tloušťkou výstřiku, protože se s ní mění také smykový profil působící na taveninu. Snižuje se s rostoucí teplotou a zvyšuje s rostoucím tlakem (viz. obr. 11).



Obr. 11 : Závislost viskozity roztavených polymerů na smykové rychlosti s vyjádřením vlivu tlaku a teploty.

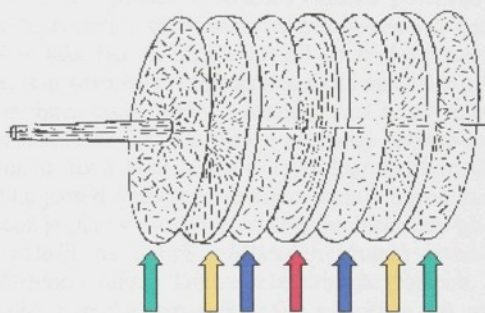
HAGGERMAN AND HOBBS /13/, /14/ ukázali, že pokud se dva oddělené proudy taveniny setkají, pak spojení a smísení vede ke vzniku „V“ vrubu v místě studeného spoje (viz. obr. 12). Tyto vruby se tvoří uzavřením vzduchu ve formě. Vzduch je při toku taveniny tlačěn ze středu proudů směrem ke stěnám formy. V těchto místech je tavenina již zchladlá a začíná se tvořit „V“ vrub, jehož velikost je závislá na množství vytlačeného vzduchu. Vzniká při vícenásobném vtoku, tak i ve výrobcích pravoúhlého tvaru s otvory.



Obr. 12 : Schéma vzniku V vrubu.

Nevytlačený vzduch může vést k místnímu spálení materiálu v důsledku jeho komprese tzv. „Dieselekt“. Pokud jsou tyto výstřiky mechanicky zatěžovány, vrub způsobí koncentraci napětí a následně iniciuje trhlinu, která se rozšiřuje a vede k poruše a lomu. Mechanismus lomu závisí na rychlosti zatěžování a použitém materiálu. Musíme vzít v úvahu, že propagace a šíření trhlín vzniká primárně v místech

strukturních poruch. Struktura SP je odlišná od struktury bez SP. V závislosti na zpracovatelských podmínkách a vlastnostech použitých polymerů dochází v těchto místech víceméně k intenzivní difúzi. Struktura zbývajících míst je dána ochlazením postupující taveniny. Při postupu taveniny dochází k orientaci. Ta spočívá v tom, že rychle chladnoucí viskózní tavenina se protlačuje vysokým tlakem úzkými kanálky a průřezy ve formě, nepravidelně zkroucené makromolekuly se vysokým smykovým napětím narovnávají ve směru toku a v této nerovnovážné poloze ztuhnou. Jestliže smykové napětí vyvolávající orientaci přestane působit dříve, než tavenina ztuhne, snaží se narovnané makromolekuly zaujmout hned zase svoji rovnovážnější zkroucenou polohu (dezorientace) a orientace se neobjeví, nebo jenom zčásti, v nízkém stupni viz. obr.13. Orientace SP, tak jako u plnění dutiny formy ve tvaru válce, je dána tzv. „vulkanovým,“ nebo „fontánovým,“ efektem. Někdy bývá také označován jako Hele-Shaw proudění.



Obr. 13 : Schéma orientace makromolekul v určitých vzdálenostech od ústí vtoku.

První dávka taveniny nejdříve vytvoří kolem ústí vtoku polokouli, jejíž průměr se postupně zvětšuje, až dosáhne vnitřní stěny formy, ihned se ochladí, ztuhne a na stěně se vytvoří tenká vrstvička nepohyblivého plastu. Tato vrstva, však tepelně izoluje vrstvy nacházející se nad ní a ty chladnou pomaleji. Teplota hmoty směrem k ose se tedy zvyšuje a část hmoty ve středu dutiny je stále tekutá. Tato středová zóna s nízkou viskozitou se nazývá „plastické jádro“ a právě jím protéká další část hmoty při plnění dutiny formy. Plnění probíhá tedy tak, že tavenina proudí uvnitř nepohyblivých povrchových vrstev. Vnější vrstvy jsou orientovány podél stěn formy a tvoří pak při oddělených proudech V vruby. Velikost a difuze SP je tudíž závislá na podmínkách vstřikování především pak :

- a) tlakem uvnitř formy,
- b) vstřikovací rychlostí,
- c) teplotou taveniny a teplotou formy,

tak jako konstrukcí nástroje tj. délkou a průřezem tokových čar, odvodu vzdušného tlaku. V **amorfních termoplastech** nejvíce ovlivňuje stupeň a směr orientace makromolekul, které pak ovlivňují strukturu tvářené části a mechanické vlastnosti výstřiku.

V *semikrystalických termoplastech* má mnohem menší vliv orientace a je superponovaná s vznikající krystalickou strukturou. Chladicí podmínky, čas setrvání ve formě, geometrie nástroje a samotného výstřiku jsou mnohem důležitější faktory než u amorfních termoplastů. Tyto vzájemné souvislosti mezi návrhem formy, podmínkami zpracování, geometrií výstřiku budeme sledovat při vzniku SP.

2.2.2.3 Teorie vzniku studených spojů /12/, /15/, /16/, /17/, /18/

Při popisu SP označených typově jako “horké” lze oprávněně vycházet z termodynamických vztahů, které se zabývají rovnovážnými a nerovnovážnými stavy systému, mechanismy a kinetikou pochodů, které k těmto stavům vedou. Lze velmi jednoduše dokázat, že při proudění a pohybu taveniny dochází ke sledu rovnovážných i nerovnovážných dějů, které vyúsťují v termodynamické potenciály. Tyto potenciály upravují vztahy mezi tepelnými a mechanickými proměnnými a další, jež lze z těchto základních odvodit. Lze také říci, že při vzniku SP dochází k fázovému přechodu. Ten je definován jako ustavení rovnovážné termodynamické soustavy při působení vnějších sil tím, že dojde k vyrovnání chemických potenciálů, část hmoty přejde z jedné fáze do druhé. V našem případě se bude jednat o fázové přechody prvního druhu, které zahrnují např. tání, vypařování, u kovů také změnou krystalografické modifikace, aj. Fázové přechody prvního druhu jsou doprovázeny změnou teploty a jsou závislé na tlaku, mění se entropie i objem, což je plně v souladu s procesy probíhajícími při vstřikování. Vznik “horkého” SP lze rozložit na pohyb oddělených proudů taveniny, které obtékají překážku s jejich následnou difúzí. Difúze v tekutinách, plynech, v tuhém stavu má výrazný vliv na kinetiku i mechanismus fázových přeměn a má rozhodující podíl na dalších technicky významných pochodech, jako je např. chemicko tepelné zpracování, spékání kovových prášků, tečení, oxidace, nerovnovážné tuhnutí atd. Difúze resp. koeficient difúze velmi silně závisí na teplotě a je jen zvláštním případem Arrheniovy rovnice, která se uplatňuje pro vyjádření teplotní rychlosti různých pochodů (3).

$$v = A_1 \exp \left(- \frac{Q}{kT} \right) \quad (3)$$

kde značí: V – je rychlost reakce,

A_1 – je konstanta,

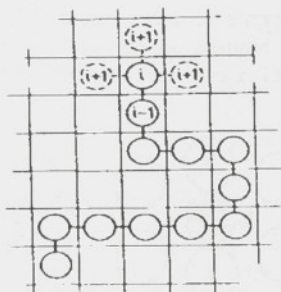
Q – aktivační energie pochodu,

k – je Boltzmanova konstanta,

T – je absolutní teplota.

Fyzikální výklad tohoto vztahu je rovnováha aktivovaných atomů (tj. těch, které reagují chemicky, nebo fyzikálně) s ostatními atomy. Vliv teploty spočívá ve zvýšení počtu aktivovaných atomů, což vede ke zvýšení rychlosti děje. Pro jiný než plynný stav zavádíme místo aktivovaných atomů tzv. aktivovaný komplex (tj. atomy, které jsou v nestabilní poloze na vrcholu potenciální bariéry, o kterém se zmíníme později). Q představuje množství tepla, jež je nutno dodat k aktivaci jednoho molu atomů. Při obecné transformaci $\alpha \rightarrow \beta$, jinak postupuje reakce přes aktivovaný komplex $\alpha - \alpha^* - \beta$.

Při popisu pohybu makromolekul polymeru lze vycházet z teorie volného objemu. V této teorii je nutné vzít v úvahu elastické deformace okolních molekul a energii, která podporuje rotaci. Teorie volného objemu má řadu verzí. Jednou z nejlépe propracovaných je teorie COHENOVA A TURNBULLOVA. /18/ Pro makromolekulární systém je ale vhodnější energetická teorie, která je označována jako GIBBSOVA A DIMARZIA /15/. Makromolekulární řetězce jsou považovány jakoby za mřížkové body a pružné, volné frakce se mohou přemísťovat do stabilnějších pozic viz. obr.14. Tento model také předpokládá existenci volných míst.



Obr. 14 : Struktura makromolekul podle teorie volného objemu.

Energetické vyjádření této teorie je popsáno ve vztahu (4): Jak c , tak f jsou funkcemi teploty a mohou vytvářet amorfni i semikrystalickou strukturu polymerů. Přemísťování a přeskupování segmentů makromolekul je spojeno tedy jako u monoatomického systému s překonáním energetické bariéry. Tento proces povede k trvalým makroskopickým deformacím (v případě působení napětí, teplotních aktivací, nebo navzájem) Studovat difúzi z hlediska přemísťování jednotlivých atomů, nebo makromolekul znamená především navrhnout a vyšetřovat modely pro mechanismus tohoto přemísťování. Tyto modely jsou úzce spjaty s kinetikou a mechanismem přeměny taveniny –tuhá fáze, která má rozhodující vliv na výslednou strukturu. Přeměny jsou doprovázeny změnou objemu, nebo vybavováním skupenského resp. fázového tepla. Označují se různě např. jako „vojenské“ (mají stejné chemické složení výchozí a výsledné fáze, absence difuze na velké vzdálenosti, rychlý pohyb mezifázového rozhraní aj.), nebo „civilní“ (kterých je rychlost deformace teplotně

$$\Delta G = c\Delta E_c + f\Delta E_f - kT \ln(P_{cf}) \quad (4)$$

kde značí: ΔE_c - energie pro vytvoření volných míst;

P_{cf} - pravděpodobnost konfigurace volného objemu vztažená k f , jako pružným, pohyblivým oblastem nebo uzlům makromolekuly a c zastupujícím volné místo;

ΔE_f - energie vztažená k uzlům a pohyblivým částem makromolekul;

k - je Boltzmanova konstanta.;

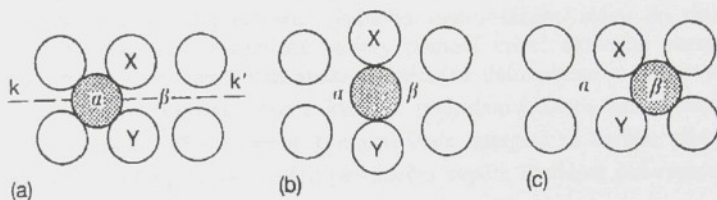
T - teplota [K];

f - pružné pohyblivé oblasti;

c - volná místa.

závislá). Veškeré viskoelastické efekty, které zahrnují deformace, jsou způsobeny teplotní aktivací segmentů makromolekul pod mechanickým napětím. Není tedy pochyb, že pohyb makromolekul taveniny je způsoben mechanickým napětím. (V případě vstřikování je mechanické napětí vyvoláno vstřikovacím tlakem z pohybu šneku.) Transformace (termín označující fázovou přeměnu) vlivem zmiňovaných veličin probíhá koordinovaným pohybem atomů, nebo makromolekul. Pohyb, přeskoky jsou tedy funkcí napětí a vedou k časově závislým deformacím. Vztah teorie plastických deformací s teorií volného objemu je pro makromolekulární systém nejlépe vyjádřen modifikovanou Ree-Eyringovou rovnicí /10/

Základní otázkou tedy je, jakým způsobem se atomy, nebo makromolekuly ze své rovnovážné polohy α , obklopeny svým okolím, posunou do jiné pozice β . Jednoduše si lze vše představit na monoatomickém systému viz. obr. 15.



Obr. 15 : Schématické zobrazení pohybu monoatomického systému z polohy α do β podél přímky k-k'.

Pohyb a změna stavu souvisí se změnou energie, která je charakterizována Gibbsovou volnou energií. Tato energie, která je nutná k tomu, aby soustava přešla ze stavu metastabilního do stabilního. Atom v pozici α osciluje v potenciální jámě, která je definována nejbližším okolím podél přímky kk' do pozice β . Při pohybu musí překročit potenciální bariéru způsobenou atomy X a Y spolu s intenzivními elastickými deformacemi, jak je vidět na obr.15 (a) a (b). Při dodání energie (např. teplotní fluktuací) se atom může dostat na vrchol bariéry do bodu (b) viz. obr.15, tuto polohu nazýváme "aktivovaný komplex". Z bodu (b) se pak přemístí do energeticky stabilnější polohy bodu (c). Vztah mezi zmiňovanými složkami, které se účastní pohybu, lze nejlépe vyjádřit v rovnici (5):

$$\nu_{\alpha\beta} = \nu_0 \exp\left(\frac{-\Delta G}{kT}\right) \quad (5)$$

kde značí: $\nu_{\alpha\beta}$ střední doba setrvání v potenciální jámě, před přeskokem do jiné pozice,

ν_0 počet pokusů, které atom provede za jednotku času, aby se atom dostal přes potenciálovou bariéru,

ΔG je změna Gibbsovy volné energie, kterou je nutno dodat, aby se atom, dostal z rovnovážné polohy (a) na vrchol bariéry (b).

Změna Gibbsovy energie je v tomto případě vyjádřena jako:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (6)$$

ΔH je změna aktivační entalpie a ΔS je změna entropie při přechodu částice do místa maximální výšky potenciální překážky. Po dosazení (6) do vztahu (5) pak dostáváme:

$$v_{\alpha\beta} = v_0 \exp\left(-\frac{\Delta S}{k}\right) \exp\left(\frac{\Delta H}{kT}\right) \quad (7)$$

Vztahem (7) můžeme završit teorii o pohybu monoatomického systému. Teorie pohybu, resp. skokových změn segmentu makromolekul, je založena na stejném principu. Skokové změny při přechodu z jednoho rovnovážného stavu do druhého, mohou nastat při překonání energetické bariery pomocí určité aktivační energie Q . Tento difúzní proces dává vzniknout makroskopickým deformacím v preferovaných směrech. Předpokládáme v_0 jako objem, který je podroben jednoduchému smyku γ_0 během jednoho přeskočení. Při působení τ napětí bude energetická bariéra překonána pomocí těchto veličin ($\tau v_0 \gamma_0$) ve směru působícího napětí. Rychlost deformace $\dot{\gamma}$ je dána:

$$\dot{\gamma} = \gamma_0 J_0 \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \sinh \frac{\gamma_0 v_0 \tau}{kT} \quad (8)$$

kde značí: J_0 je frekvenční faktor.

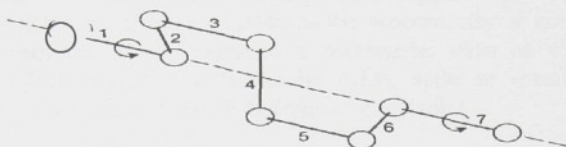
V případě splnění podmínky $\tau v_0 \gamma_0 \gg kT$ můžeme vztah (8) převést na :

$$\frac{\tau}{T} = \frac{k}{\gamma_0 v_0} \left(\ln \dot{\gamma} - \ln \frac{\gamma_0 J_0}{2} + \frac{Q}{kT} \right) \quad (9)$$

Vztah (9) je vyjádřením pohybu a difúze pro makromolekulární systém, vzhledem ke zmiňované teorii volného objemu. Při porovnání dat získaných ze vztahu (9) s experimentálním měřením došlo k velmi dobré shodě v případě dvou typů pohybů, které si označíme jako γ a δ :

-  γ jsou přesuny segmentů makromolekul hlavního řetězce z jedné rovnovážné polohy do druhé. Dochází k vzájemné změně polohy makromolekul,
-  δ procesy souvisí s lokálním pohybem, deformací krátkých úseků makromolekuly otáčením, kýváním z jedné rovnovážné polohy do druhé. Jeden z nich je zobrazen na obr.16, kde je znázorněn pohyb úseku makromolekuly PE. Uzly 1 a 7 jsou kolineární, ostatní čtyři atomy se mohou otáčet okolo těchto uzlů, jako kliková

hřidel. Nedochází k vzájemné změně polohy makromolekul, pohybu se účastní pouze části (segmenty makromolekul).



Obr. 16 : Znázornění pohybu úseku makromolekuly PE.

Vztah (9) má však omezenou platnost pro polymery, obzvláště při pokojových teplotách. Z těchto důvodů byl tento vztah modifikován na vztah (10) záměnou aktivační energie Q za Gibbsovu funkci ΔG :

$$J_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) = v_0 \exp\left(-\frac{\Delta G}{kT}\right) = v_0 \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \exp\left(\frac{\Delta S}{k}\right) \quad (10)$$

kde značí: v_0 frekvenční faktor a ΔS entropii, která může záviset na počáteční struktuře a může se měnit se stárnutím.

Při předpokladu, že ΔS bude ve shodě s WLF (WILLIAMS-LANDELOVA-FERRYHO) rovnicí [18]. Lze vztah (9) spojením s rovnicí (10) přepsat na následující vztah:

$$\dot{\gamma} = v_g \frac{C_1(\theta - T_g)}{C_2 + (\theta - T_g)} \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right) \sinh \frac{\gamma_0 v_0 \tau}{kT} \quad (11)$$

kde značí: v_g frekvenční faktor obsahující entropii při teplotě T_g ,

C_1, C_2 jsou konstanty,

θ teplota [K], při které smykové napětí vyvolá růst entropie, ve sklovitém stavu ji můžeme považovat jako konstantu rovnou T/T_g .

Tato výsledná rovnice vyjadřuje vztah smykového napětí a teploty na výslednou deformaci, která způsobuje různé druhy pohybu makromolekul v průběhu deformačního procesu. Počátek těchto jevů je také jedním vysvětlením viskoelastického chování semikrystalických polymerů. Vlastní pohyb makromolekul je především závislý na přechodových teplotách, jelikož ze stavu sklovitého lze přejít přes kaučukovitou pružnost až do oblasti viskózního toku, kde určujícím jevem se pak stává pohyb makromolekul jako celku, ten je však omezen např. mezimolekulárními silami, substituenty v řetězcích makromolekul, polydisperzitou, atd.

Z rovnice (11) vyplývá, že rozhodujícími faktory pro mechanické vlastnosti SP jsou teplota a působící smykové napětí.

2.2.2.4 Vliv technologických podmínek na studené spoje /34/, /35/, /36/

Rozhodujícími faktory při vzniku SP jak bylo ukázáno v předchozích kapitolách nejsou jen materiálové vlastnosti, geometrie a složitost výstřiku, ale hlavně působící smykové napětí a technologické podmínky. Tato kapitola má sloužit jako stručná informace o dějích a problematice vstřikovacího procesu, aby si konstruktér výrobku mohl udělat představu o jeho složitosti a podstatném vlivu na vlastnosti výstřiku. Nebudu se zabývat rozбором vstřikovacího cyklu, spíše se soustředím na to, jak jednotlivé fáze cyklu a parametry ovlivňují vlastnosti výstřiku.

**Během vstřikovací fáze jsou ovlivňovány:**

- mechanické vlastnosti,
- kvalita povrchu,
- viditelnost studených spojů,
- deformace tvaru.

**V kompresní fázi:**

- úplnost naplnění dutiny formy,
- tvoření přetoků.

**V dotlakové fázi:**

- hmotnost,
- rozměrová stabilita,
- smrštění,
- lunkry,
- propadliny,
- chování při vyjímání z formy,
- pevnost studených spojů,
- tvarová stálost (deformace tvaru).

**Rozhodující parametry procesu jsou:**

- teplota taveniny,
- vnitřní tlak ve formě a dotlak,
- teplota formy,
- vstřikovací rychlost.

**Kontrola těchto veličin:**

- zjednoduší průběh nastavení parametrů,
- umožní ihned rozeznat odchylky ve výrobě.

Tímto se dosáhne významného zlepšení kvality. Pro exaktní obsáhlou informovanost o procesu je třeba umístit do formy čidla. Moderní stroje mohou zachycovat procesní údaje a dále je zpracovávat pro optimalizaci procesu, pro výstražné funkce a statistickou kontrolu a dokumentaci procesu. Tyto podstatné funkce je možné dodatečně adaptovat na starší stroje a pomocí externích přístrojů zaznamenávat procesní

vozní data. Z pohledu řešení problematiky studených spojů a především jejich pevnosti jsou nejdůležitější tyto parametry:

a) Teplota taveniny (T_t); přímo ovlivňuje viskozitu taveniny, velikost a průběh tlaku ve formě, dobu chladnutí výstřiku, stupeň orientace makromolekul aj., a tím i vlastnosti, rozměry výstřiku v jednotlivých výrobních cyklech stroje. Proto je nutná automatická regulace teploty taveniny, kterou jsou vybaveny všechny běžné vstřikovací stroje. Jelikož však měření teploty přímo v tavenině není dosud v provozních podmínkách uspokojivě vyřešeno, měří se a reguluje teplota stěny tavicí komory, což není ideální. U moderních vstřikovacích strojů s optimalizací procesu se pro zlepšení této situace zavádí programování průběhu zpětného tlaku šneku v každém cyklu, protože zpětný tlak určuje odpor proti hnětení materiálu a tím podstatně ovlivňuje vznik a velikost vývinu třecího tepla. Tato metoda je účinná, protože změnu přívodu tepla změnou intenzity elektrického topení tavicí komory nelze tak rychle provést, vzhledem k velké tepelné setrvačnosti masivního ocelového válce a krátkým několikasekundovým výrobním cyklům.

b) Teplota formy (T_f) je další primární technologická veličina. Ovlivňuje zabíhavost taveniny ve formě, a tedy plnění dutiny formy, rychlost ochlazování výrobku, tzn. dobu chlazení a tím i dobu trvání cyklu, vlastnosti výrobku, především krystalických plastů, a konečně i náklady na výrobu. Při volbě teploty formy je třeba si uvědomit následující závislosti: čím je vyšší teplota formy, tím má hmota větší zabíhavost a tím nižší může být vstřikovací tlak nebo delší dráha tečení v dutině formy. Vyšší teplota také pozitivně ovlivňuje rychlost plnění dutiny. Výstřik chladne rovnoměrněji, takže se snižuje vnitřní prnutí a zlepšují se mechanické vlastnosti a zvyšuje se stabilita tvaru a rozměrů. U krystalických plastů stoupá obsah krystalické fáze, a tím jejich hustota i mechanické vlastnosti. Při vyšší teplotě lze použít k dosažení stejné zabíhavosti nižší T_t , a tím snížit nebezpečí tepelné degradace polymerů. Na druhou stranu je vysoká T_f příčinou většího smrštění a vyšší přilnavosti hmoty ve formě. V praxi se volí T_f mezi 30°C – 80°C, u některých konstrukčních plastů to může být až 150°C. Nejvyšší použitelná teplota formy musí být u plastů nižší než je teplota tuhnutí příslušného plastu.

c) Vstřikovací tlak (p_{vs}); optimální závisí především na T_t , přesněji na viskozitě použitého plastu a dále na délce toku taveniny ve formě, na tloušťce stěny a členitosti výstřiku. Zaplnění formy musí proběhnout dostatečně rychle, protože je třeba předejít přílišnému zchladnutí a předčasnému ztuhnutí hmoty. Rychlost taveniny ve formě bývá od 100 do 200 m.s⁻¹, ale nadměrná rychlost způsobuje přehřátí a tepelnou degradaci materiálu. Rychlost čela taveniny má být během fáze plnění konstantní, aby proudění bylo rovnoměrné a ztráty tlaku byly minimální. U výstřiku s rozdílnými průřezy je účelné měnit rychlost posuvu šneku během vstřikovací fáze, aby rychlost proudu byla po celou fázi plnění přibližně stejná. Na začátku a na konci výstřiku je vhodné plynule měnit rychlost, tím je zaručeno, že nevznikne velká orientace makromolekul, velké vnitřní prnutí, tokové čáry na povrchu a je umožněn únik vzduchu z formy. Kolem jader je lepší vyšší rychlost proudění, aby se omezil vznik studených spojů. Z předchozího vyplývá, že u členitých a tvarově složitých výstřiků, u výstřiků s vysokými požadavky na jakost povrchu a při vstřikování tepelně citlivých plastů je účelné programovat

průběh vstřikovací rychlosti v pracovním cyklu tak, aby maximálně vyhovovala konkrétnímu výrobku. Moderní vstřikovací stroje s optimalizací vstřikovacího procesu takové programování umožňují.

2.2.2.5 Odstranění studeného spoje

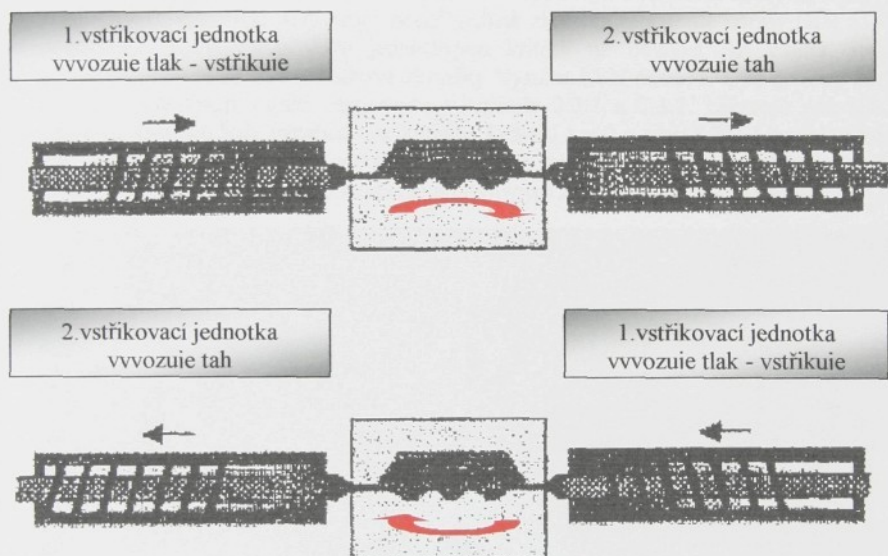
Odstranění vychází z příčin, které je způsobily. Buď se provede simulace procesu, která odhalí SP a vhodnou optimalizací odstraní, nebo se dodatečnou změnou vliv podaří minimalizovat, tj. : technologickými parametry, úpravami ve formě, změnou materiálu. Výhodnější je prvně zmiňované řešení (simulace procesu), jenž je ještě stále v České republice dost opomíjeno, přestože náklady na simulace mnohonásobně vynahradí problémy s výpadky výroby a s hledáním řešení při odstranění vzniklých vad. V konečném důsledku může dojít ke ztrátě důvěry odběratelů a trhu.

Tab. 1: Příčiny vzniku studeného spoje a možnosti jejich odstranění

Závady	Příčina	Odstranění
Materiál (plast)	Nehomogenita materiálu (rozdílná tekutost).	Použít materiál s úzkým rozmezím ITT.
Technologie (nastavení parametrů)	Nízká T_T , T_F , v_S	Zvýšit T_T , T_F , optimalizovat v_S
Vstřikovací stroj	Nízká F_U	Zvýšit F_U
Forma (konstrukce, výroba)	Nevhodná poloha ústí vtoku, nevhodná vtoková soustava. Nedostatečné odvzdušnění v místě styku dvou nebo více proudů taveniny. Použití separátorů (zejména na bázi silikonového oleje).	Změnit polohu ústí (např. na tangenciální), změnit vtok (např. deštníkový, filmový apod.) Zvětšit odvzdušňovací kanálky, event. zajistit přetokovou jamku. Odstranit nevhodné separátory.

Existují také i některé velmi nekonvenční způsoby řešení. Jeden z nich je uveden na obr. 17. a byl odzkoušen na Technické univerzitě v Dánsku /19/. Pro praktickou potřebu

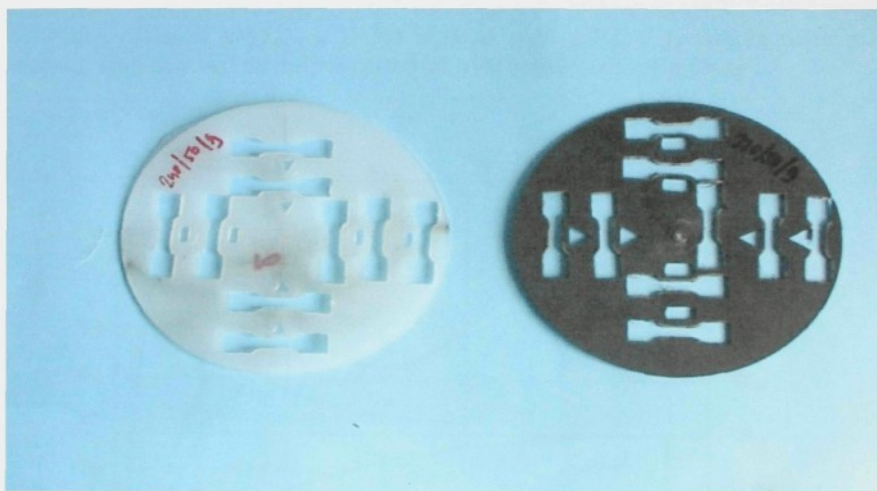
vstřikoven ho lze použít jen velmi omezeně (např. pro vícekomponentní vstřikování, nebo pro vícenásobné vstřikování) z důvodu nutnosti dvou nezávislých oddělených vstřikovacích jednotek. Celkově je také dosti náročný na programování výrobního cyklu, které musí zaručit vzájemnou souhru obou jednotek. Tato relativně nová varianta vstřikování zlepšuje pevnost. Nejdříve je dutina zaplněna první jednotkou a tlačí taveninu do dutiny formy, zatímco naplněná druhá jednotka vyvozuje tah, takže tavenina je v pohybu při ochlazování. Celý proces se pak obrátí a začíná vstřikovat jednotka, která vyvozovala tah, tj. tlačí taveninu do dutiny formy. Výhoda je v molekulární struktuře výstřiku, který je velmi homogenní a u kterého vnitřní „studený“ spoj je eliminován.



Obr. 17: Nekonvenční řešení studených spojů.

2.3. Experimentální metody /20/

V souvislosti s konstrukčními aplikacemi plastů vystupuje zejména u rozměrných výrobků požadavek houževnatosti. Houževnatost je vlastnost, která souvisí s odolností materiálu proti nárazu a proti šíření trhliny. Názory na hodnocení houževnatosti polymerů prodělaly vývoj. Již se zdálo, že klasická rázová kladiva vyklidí pole a budou zcela nahrazena zkušebními metodami lomové mechaniky. V současné době se naopak tradiční rázové zkoušky stále běžně používají k rutinnímu hodnocení jakosti materiálu. Na druhé straně je stále zřejmější, že hodnota rázové a vrubové houževnatosti jako jediné informace z rázové zkoušky je nedostačující. Řešení je dvojí, buď instrumentace rázového kladiva a grafická registrace zkoušky, anebo kombinace rázové zkoušky s jinými metodami, včetně metod lomové mechaniky. Pro sledování vlivu SP na houževnatost materiálu jsem proto použil jednak zkoušku tahem dle normy DIN 53 455 poskytující představu o vlivu jednotlivých kritérií na pevnost SP v tahu, jednak klasickou metodu rázové a vrubové zkoušky Dynstat ČSN 640611. Obě metody budou popsány podrobněji v další části textu v kapitole 2.3.1 a 2.3.2. Nástroje pro získání vzorků z výstřiku byly vyrobeny na katedře Tváření kovů a plastů TU Liberec. Vzorky byly odebírány v místech studených spojů a v místě, které bylo studeným spojem nezatíženo tak, aby došlo k co nejmenšímu ovlivnění ze strany střížníků (viz. obr.18)



Obr. 18 : Ukázka polohy jednotlivých vzorků po odběru z výstřiku.

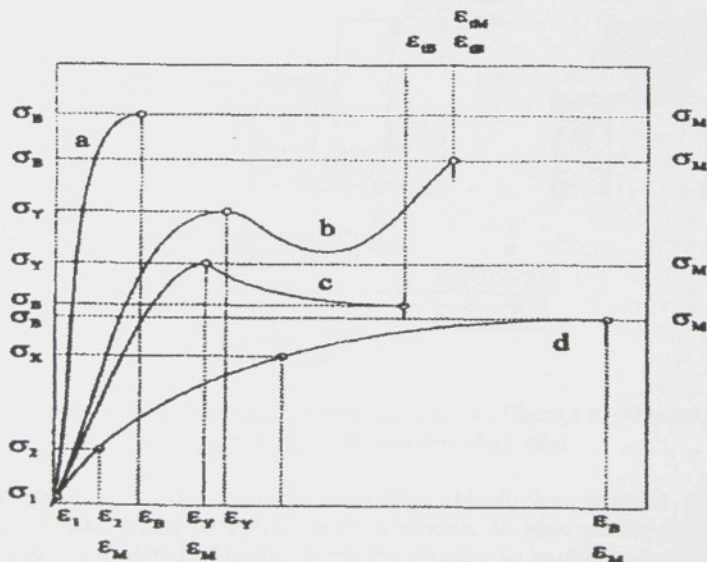
Matematické vyhodnocení vlivu SP může být vyjádřeno buď statistickou hodnotou, naměřenou z uvedených testů, nebo může být vyjádřeno pomocí tzv. „faktoru studeného spoje“ a_{kl} definovaného jako

$$a_{kl} = \frac{\text{výsledná hodnota testu u vzorku se studeným spojem}}{\text{výsledná hodnota testu u vzorku nezatíženého studeným spojem}} \quad (12)$$

Výhoda využití tohoto faktoru je v rychlé a snadné čitelnosti výsledku. Při hodnocení naměřených dat jsem použil obě metody, přičemž jsem hodnotil nejdříve odděleně vliv jednotlivých variací parametrů a pak jsem provedl komplexní vícefaktorovou analýzu. Tato analýza s určitou váhou (5% hladina) stanovila, který faktor při dané kombinaci má největší vliv na výslednou hodnotu mechanických vlastností. Grafy a tabulky výsledků jsou v další části textu.

2.3.1 Tahová zkouška /21/, /22/, /38/

Jestliže je zkušební těleso vystaveno tahovému namáhání, je možno v závislosti na podmínkách zatěžování, tj. na teplotě, na rychlosti deformace a v závislosti na druhu polymeru, získat různé deformační křivky. Obr. 19 ukazuje příklad průběhu *obecných* tahových křivek plastů: a - křehké plasty, b, c - houževnaté plasty s mezí kluzu, d - houževnaté plasty s nevýraznou mezí kluzu. Většina amorfních plastů, zejména se zesíťovanou strukturou, s minerálními plnivý, kompozity mají vysoký modul pružnosti a závislost napětí – deformace je téměř lineární. Lineární amorfní polymery a semikrystalické plasty s vysokým stupněm krystalinity se chovají podle křivky (a). Běžné krystalické polymery vykazují křivku (b, c) a lze zjistit spodní mez kluzu, která je počátkem tvorby krčku a také jeho rozšiřování. Horní mez kluzu je hranicí přípustného napětí při provozu součásti, neboť po jejím překročení vznikají velké trvalé deformace. Poslední křivka (d) je bez výrazné meze kluzu a je typická nejen pro kaučuky. Materiály, se kterými jsem pracoval, vykazovaly obdobné průběhy :

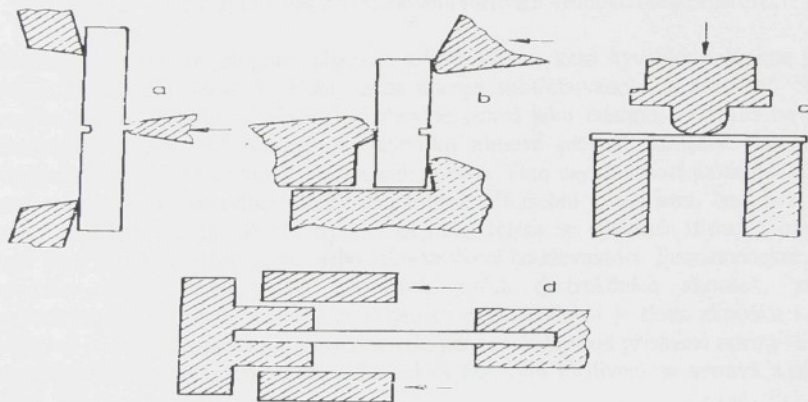


Obr 19 : Průběh obecných tahových křivek pro různé typy polymerů.

PS houževnatý a PE se chovaly podle křivky (c), ABS se jevil jako nejhouževnatější křivka (b), čemuž naměřené hodnoty odpovídají, zatímco PA s 30% plniva vykazoval chování kompozitu a typický průběh zkoušky je shodný s křivkou typu (a). Ze zkoušky tahem lze získat kompletní informace o materiálu od všeobecně používaných křivek napětí – deformace, přes tažnost, modul pružnosti v tahu, kontrakci, zásobu plastičnosti, atd. Pro potřebu experimentu jsem zvolil veličinu, kterou bylo napětí na mezi kluzu studeného spoje. Na obr. 19 je to σ_Y v normě DIN 53 455 je označeno jako σ_S [N/mm²] a to pro materiály PS, PE, ABS. Materiál PA nevykazuje výraznou mez kluzu jako ostatní, proto jsme zvolili jako hodnotící kritérium σ_M v normě označeno jako σ_B [N/mm²].

2.3.2 Rázová zkouška /20/, /23/, /22/

Často se konstatuje, že rázová zkouška patří mezi fyzikálně nejméně srozumitelné zkušební metody materiálů. Přesto se právě tato zkouška velmi často používá a zřejmě si ještě delší dobu zachová svůj význam. Důvodem je nejen experimentální jednoduchost, ale také dobrá korelace mezi experimentálními hodnotami a provozním chováním materiálu, který často selže právě v důsledku mechanického nárazu a také rychlosti zvláště u houževnatých plastů. Běžná rázová zkouška představuje pouhou kvalitativní metodu, která umožňuje vzájemné porovnání různých materiálů, ale výslednou číselnou hodnotu nelze dosadit do konstrukčních výpočtů. Klasická rázová zkouška je obvyklá ve dvou uspořádáních, která jsou schematicky znázorněna na obr. 20.



Obr. 20 : Schéma různého uspořádání rázové zkoušky :a – Charpy; b – Dynstat; c – průřez na padostroji; d – rázová zkouška v tahu

V prvním případě je zkušební těleso namáháno tříbodovým, případně čtyřbodovým ohybem, tedy jako nosník podepřený na obou koncích, do jehož střední části narazí nos kladiva. Jde o tzv. Metodu Charpy. Druhý typ zkoušky se nazývá podle ČSN Dynstat. Zkušební těleso je namáháno na ohyb jako jednostranně vetknutý nosník a stejně jako v uspořádání Charpy se přerazí velmi rychlým nárazem padajícího kyvadla. (viz. obr. 21)



Obr. 21 : Přístroj Dynstat pro stanovení rázové a vrubové houževnatosti.

Unášený ukazatel na stupnici přístroje udává výšku, kam kyvadlo dokmitne jednak volně, jednak po přeražení tělesa, takže energii spotřebovanou na porušení tělesa je možno snadno odečíst. Výsledek se obvykle udává jako energie, vztažená na průřez zkušebního tělesa, tedy energii na jednotku lomové plochy. Konečně třetí způsob vztahuje energii jen na tloušťku zkušebního tělesa. Tato nejednotnost může být zdrojem nedorozumění při reprodukovatelnosti zkoušek. Zkušební tělesa jsou, buď bez vrubu, nebo opatřena vrubem. Podle typu zkušebního tělesa se výsledek zkoušky označuje, buď jako rázová houževnatost, nebo jako vrubová houževnatost. Poznamenejme, že ze zkoušky rázem stejně, jako z každých jiných destrukčních zkoušek, získáme experimentální hodnoty, zatížené značným rozptylem. Proto je třeba zkoušku vždy za stejných podmínek několikrát opakovat tak, jak to předepisují příslušné normy. Energie spotřebovaná na přeražení zkušebního tělesa rázovým kladivem se sestává z několika částí.

Kromě energie, potřebné k vytvoření nové lomové plochy, se může značná část energie kladiva rozptýlit viskoelastickými nebo plastickými disipačními procesy. Zpracovaná experimentální data z rázové zkoušky lze zhodnotit v určitých charakteristických veličinách lomové mechaniky. Lomová houževnatost vyjadřuje chování tělesa strhlinou a zahrnuje jak pevnosti materiálu, tak jeho citlivost na přítomnost trhliny. Přítomnost defektů v materiálu úzce souvisí s jeho křehkostí. V křehkých materiálech lze prokázat výrobní poruchy a defekty: mikroskopické vrypy na povrchu skla, strukturní poruchy v křehkých reaktoplastech, atd. V houževnatých materiálech se musí lomová trhlina nejprve rozvinout do kritické velikosti, ale konečná fáze procesu má i zde křehký a katastrofický charakter.

zde křehký a katastrofický charakter. Křehkost materiálu s trhlinou, nebo defektem má několikere příčiny:

- a) Trhlina působí jako koncentrátor napětí i deformace, takže lomový proces se rozvine při menší celkové vnější deformaci než v homogenním materiálu.
- b) Koncentrace napětí vede k lokálnímu zkřehnutí polymeru na molekulární úrovni, protože deformační procesy mohou v kořenech ostrých trhlinek probíhat rychlostí několikrát vyšší než v ostatním objemu zatíženého tělesa. Při tak vysoké deformační rychlosti polymer přejde do oblasti křehkého chování.
- c) Třetí mechanismus vyplývá z trojosého stavu napjatosti v kořeni trhliny. Tím se v této zóně zvýší mez kluzu proti jednoosému tahu, jak to vyplývá z Trescova kritéria, které stanoví pro nástup plastické deformace podmínku $\sigma_1 - \sigma_2 = \text{konst.}$, tedy $\sigma_1 = \sigma_2 + \text{konst.}$ Změna pořadí meze pevnosti a tažnosti způsobená změnou napěťové geometrie vede k přechodu od tažného ke křehkému lomu.

Další část energie se změní na kinetickou energii odletujících fragmentů a akustickou emisi nebo se pohltí ve zkušebním zařízení. Pouze registrace celého průběhu rázové zkoušky umožní odhadnout podíl nejdůležitějších z uvedených částí.

2.4. Faktorová analýza /24/, /25/

Při hodnocení vlivu dvou nebo více faktorů na sledovaný výsledek je nutné data třdit podle zvolených hledisek, tj. podle úrovní faktorů. Data musí být sestavena tak, aby bylo takové vyhodnocení co nejsnazší. Při třídění podle dvou nebo více faktorů musíme zásadně rozlišovat dva různé typy zpracovaných údajů a z toho vyplývající dvojí způsob vyhodnocování.

1) Data prvního typu se získají v případě, že vycházíme pouze z jednoho pozorování při každé kombinaci úrovní faktorů, tj. máme pouze jeden výsledek pro každou experimentální jednotku. Taková data získáváme z plánovaných pokusů, kterým říkáme *pokusy s jedním opakováním*.

2) Druhý typ dat dostaneme v případě dvojího nebo několikerého opakování celého pokusu. Tento typ dat byl využit v experimentech.

Není-li zřejmé, že mezi faktory, které zahrnujeme do schématu pokusu, neexistují interakce, bude lépe použít tzv. faktorových pokusů. Faktorový pokus je tedy soustavou určitého počtu experimentů, uspořádaných příslušným způsobem. Zatímco u latinských čtverců provádíme pokusy a pozorování jen na některých kombinacích úrovní jednotlivých faktorů, faktorový pokus zahrnuje všechny možné kombinace úrovní všech sledovaných faktorů. Zpracovává tedy dané téma mnohem důkladněji než ostatní schémata a poskytuje i více informací. Vyšší faktorové pokusy jsou všechny pokusy, které mají faktory na více než dvou úrovních. Celý postup je poměrně zdoluhavý, protože je třeba dospět vylučováním jednotlivých faktorů až k dvoufaktorovým podtabulkám, ve kterých stanovíme součty čtverců odchylek pro jednotlivé faktory a jejich interakce. Nebudu zde popisovat matematické operace, kterými celý proces

procházel, ale zobrazíme vzor výsledné tabulky analýzy rozptylu pro materiál a jednotlivé faktory, jak je vidět v tab.2.

Tab. 2 : Analýzy rozptylu pro PS – kruh/čtverec a zvolené faktory.

Analýza rozptylu pro PS - kruh/čtverec					
Pramen proměnlivosti	Součet čtverců	Stupeň volnosti	Průměrný čtverec	F	Fkrit
A	521,22	2	260,61	5,97	3,14
B	1369,30	4	342,33	7,85	2,51
C	83,68	8	10,46	0,24	2,08
AB	832,52	8	104,07	2,39	2,08
AC	181,14	16	11,32	0,26	1,80
BC	127,28	32	3,98	0,09	1,63
Reziduální	282,41	64	43,62		
Celkový	3397,57	134			

Faktory jsou označeny velkými písmeny obvykle z počátku abecedy např. A, B, C, D... Úrovně faktorů se značí tak, že k velkému písmenu připišeme index. V mém případě experiment obsahuje pět faktorů, pro zjednodušení a nalezení optima je pokus převeden na 3-faktorový, slučování je zde nepřipustné z důvodu diskrétního charakteru naměřených veličin. Materiál a tvar jsou jednoduše čitelné na grafech hodnot, proto jsem zvolil tři faktory, které jsem označil následujícím způsobem: A – *velikost tvarových jader* (kovové vložky různých tvarů), B – *technologické nastavení stroje*, C – *faktor vzdálenosti od ústí vtoku*. Zbylé AB, AC, CB jsou jejich interakce, tj.: AB znamená interakci faktoru velikost a technologického nastavení stroje atd. V případě, že výsledná hodnota Fischerova kritéria pro daný faktor je vyšší než kritická hodnota Fischerova rozdělení na hladině $\alpha = 0,05$, pak uvedený faktor můžeme brát jako statisticky významný. Fischerovo kritérium je nejvhodnější, protože umožňuje srovnání součtu čtverců odchylek. Pokud je více faktorů statisticky významných poté se provádí podrobnější rozbor rozkladem na podtabulky spolu se stanovením intervalu spolehlivosti pro rozdíl efektů, který je popsán ve vztahu (11):

$$d \pm t_{\alpha} \cdot s_r \sqrt{\frac{2}{q}} \quad (11)$$

kde značí : d - rozdíl hodnot mechanických vlastností při přechodu z jedné úrovně na druhou,

t_{α} - t rozdělení na hladině α , má vždy tolik stupňů volnosti, kolik jich má s_r ,

s_r – reziduální průměrný čtverec,

q – sloupcový faktor.

2.5. Simulační programy /26/

Simulace je jedním z velmi důležitých oborů nasazení a propojení počítačů s praxí. Pomocí počítače se provádí simulace fyzikálních, chemických a dalších problémů. Simulační programy slouží k realizaci virtuálního modelu za skutečných podmínek. Programy pracují na základě matematických metod (metoda konečných prvků, metoda sítí, metoda hraničních prvků atd.). Jejich výsledky je možné využít při tvorbě výkresové dokumentace a jsou vstupními parametry pro výrobní stroje. Uplatňují se v nejrůznějších odvětvích, kde pomáhají snižovat náklady a vyhnout se kritickým stavům. Tyto programy se také používají pro simulaci vstřikování. V současné době se pro návrh výrobků z plastů a pro návrh a optimalizaci konstrukce vstřikovacích forem používá celá řada simulačních programů jako jsou např. :

- ▶ STRIMFLOW
- ▶ MOLD FLOW
- ▶ ALGOR
- ▶ C MOLD
- ▶ SIMUFLOW
- ▶ CADMOULD

STRIMFLOW je simulační program, který je nejvhodnějším a nejpřístupnějším řešením. Tento program byl úspěšně vyzkoušen na praktických příkladech na naší katedře. V několika podkapitolách podávám obecný popis a jeho charakteristiku.

2.5.1 Charakteristika simulačního programu STRIMFLOW /27/, /28/

Jednoduchá obsluha – interaktivní uživatelský interface, ponechá uživateli kontrolu při každém procesu návrhu. Součástí je rozsáhlá knihovna s množstvím návrhových, geometrických a jiných funkcí.

Kompatibilita – STRIMFLOW obsahuje ve světě užívaný IGES interface, VDA interface a mnoho dalších. Je kompatibilní s řadou CAD/CAM systémů.

Kompletní spojení dat – jakmile jsou transformována data do STRIMFLOW, může začít práce. Dutina formy nebo produkt mohou být okamžitě a správně zobrazeny tak, jak je klient navrhl. Tato data mohou být používána pro návrh formy nebo provedení simulace tečení a výpočtu analýz. Potom lze vytvořit model pro návrhy částí forem a generování instrukcí pro NC obrábění. Všechny detaily formy mohou být jasně a jednoduše zobrazeny: dutina formy, jádro, chladicí kanály, lze využít veškerých výhod a schopností 3D pracovních stanic k posunům, zvětšování, zmenšování, rotaci, atd.

Přesnost – metodika návrhu je koncipována na polynomech vyšších řádů, zajišťuje automatické generování rovného vyhlazeného povrchu, funkčně kontroluje definování povrchu s ohledem k požadované přesnosti.

Rychlost – automatické návrhové funkce, parametrické schopnosti modelování, rozvrhnutí nástrojů, vizualizace pomáhají uživateli snížit čas potřebný pro návrh.

Služby a podpora – nabízí rozsáhlý geometrický modelář pro návrhy. Při investici do softwaru STRIMFLOW máte automatický přístup k dlouhému seznamu

služeb, navržených pro Vaši práci. Tyto služby pomáhají zajistit použití plně schopného systému a dosáhnout maximální produktivity.

Uživatelská řešení – podle nároků uživatele lze navrhovat jednotlivé moduly a vytvořit nejvhodnější konfiguraci vyhovující specifickým požadavkům firmy.

Zisk a spolehlivost – redukuje vadné zadání, které může vést k vadám v obrábění a tím vyrobit formu s minimálními náklady a v minimálním čase. Většina forem je tvořena jako produkt návrhu CAD/CAM aplikací. Je možné přijmout data modelů v různých formách, protože STRIMFLOW komunikuje s řadou komerčních CAD/CAM systémů na trhu, to znamená zvýšení obchodních příležitostí. STRIMFLOW je hodnocen jako praktický, výkonný, nepostradatelný nástroj pro návrh a výrobu vysoce kvalitních produktů. Nabízí komplexní programové nástroje pro uživatele 3D grafiky. Integruje návrh, analýzu a NC obrábění pod společnou databází a tím výrazně zkracuje předvýrobní i výrobní etapy výrobku. STRIMFLOW se uplatňuje pro:

- ▶ Komplexní řešení analýzy vstřikování plastů.
- ▶ Návrh a konstrukci součástí velmi komplikovaných tvarů.
- ▶ Jako výkonný generátor sítě pro výpočty MKP.
- ▶ Jako efektivní funkce pro obrábění zvláště v pěti osách.

Ze světoznámých firem používajících tento software např. :

- ▶ Plastikářský průmysl (Allibert, Monsanto, ...)
- ▶ Automobilový průmysl (BMW, Honda, Renault, Toyota, ...)
- ▶ Letecký průmysl (Aerospatiale, Lockheed, Sikorsky, ...)
- ▶ Slévárnictví (Moravské železářny, Pechiney, Smoby, ...)
- ▶ Strojírenství (Akromold, Safe, Simoldes, Sumitomo, ...)

2.5.1.1 Popis systému STRIMFLOW

Program se skládá ze tří modulů **design, plasty a výroba nástrojů**. Pro řešení mého zadání jsem měl k dispozici moduly design a plasty.

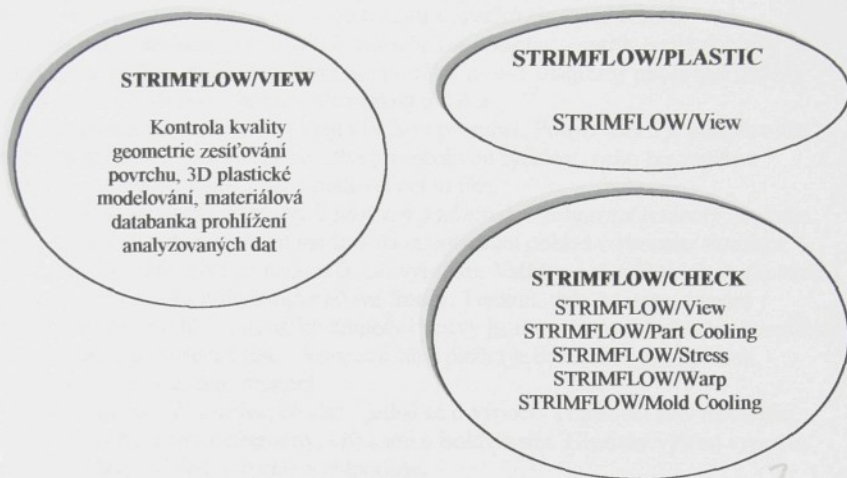
Modul **design** se dělí na tři funkční bloky:

- I. **Koncept** – základní řešení návrhu modelu využívající 2D CAD/CAM. Koncept je vhodný pro návrh objektů s relativně jednoduchými povrchy.
- II. **Design** – standardní řešení návrhu modelu využívající 3D CAD/CAM pro komplexní zobrazení modelu.
- III. **Mechanický model** – komplexní řešení návrhu modelu s využitím produktů Konceptu a Designu. Umožňuje povrchové modelování komplexních částí, modelování tuhých těles.

Modul **plasty** se dělí na čtyři samostatné bloky:

- I. **Reologie 2D, 3D** – základní dvojrozměrné a třírozměrné řešení modelu včetně analýzy vstřikování.

- II. *Chlazení nástroje* – celkové provedení chladicí analýzy.
- III. *Tepelná deformace* – provede simulaci deformace modelu při působení tepla.
- IV. *Pevnostní analýza* – určení napětí a deformací za působení vnějších sil.



Obr.22 : Funkční bloky modulu STRIMFLOW.

Na obr. 22 jsou zobrazeny jednotlivé bloky nutné pro simulaci kompletního vstřikovacího cyklu. Součástí jsou kompatibilní softwarové nástroje pro návrh plastových modelů a analýzu jejich strukturního chování. Analyzuje vlivy rozdílných parametrů, jako je tlak a teplota. To umožňuje uživateli regulovat vstřikovací proces dle stavu plnění, kontrolu indexu toku na počátku vstřikování, tlakovou kontrolu ve fázi dotlaku, chlazení a tuhnutí. Simuluje procesy postupného a sendvičového vstřikování. Pro naše aplikace je nejdůležitější modul STRIMFLOW/Fill

2.5.1.2 STRIMFLOW/Fill

Slouží pro simulaci vstupního vstřikovacího cyklu. Vysoce přesná simulace vstřikování je založená na síťování, materiálových charakteristikách, vstřikovacích parametrech. Používá sadu výkonných funkcí k určení: krajních tlaků, materiálové degradace, nesprávné umístění dělicí roviny, nekompletní nebo přebytkové plnění. Pro sekvenční vstřikování kontroluje indexy toku v každém vtoku, nizký vstřikovací tlak, optimalizuje umístění dělicí roviny. Používá síť k určení tloušťky stěn, materiálových charakteristik a vstřikovacích parametrů, pro stanovení vstřikovacích a tvářecích podmínek. Všechny prvky požadované pro vstřikovací a tvářecí analýzy mohou být jednoduše a rychle určeny pomocí *SHELLMeshing* a *3D Plastik Flow Modeling*

aplikací. Analýza nachází chyby jako např. překročení mezních tlaků, degradace materiálu apod. Tento modul se skládá z:

Knihovny prvků – používá trojúhelníkové nebo čtvercové elementy pro tvorbu sítě. Síť mohou být optimalizovány právě díky těmto typům. Tvorba sítě je flexibilní a přesná. Rozváděcí kanály jsou síťovány dvojuzlovými elementy. Mnoho kontrolních kritérií garantuje hustotu sítě a vysokou kvalitu výsledků simulace tečení.

Polymery teplotně sensitivních a stlačitelné tekutiny – vstříkovaný polymer je během simulační fáze stlačitelný. Program používá p – v – T diagramy popisující rozdíly specifických materiálových hodnot dle teploty a tlaku.

Vstřikovacích podmínek – mají vysokou přesnost. Pohyb šneku je přizpůsoben na požadovaný tlak a na konstantní nebo proměnlivou rychlost, nebo lze zapnout přizpůsobení rychlosti tlaku a tak simulovat celou fázi.

Výpočtu materiálové fronty a plnicích podmínek – zobrazení hodnoty zaplnění formy. Nachází se v dynamickém modu a dává optimální pohled o procesu simulace plnění formy. Snadno zjistíme nedostříknutí výrobku. Vstřikovací cyklus lze opakovaně nastavit a znovu spustit pohyb materiálové fronty. Teplota, tlak, hustota, střední rychlost, smyková rychlost, tloušťka tuhnutí vrstvy jsou spočteny v každém okamžiku plnění. Pokud je přebytečný tlak v koncové části plnění je detekován jako přetok, k dispozici je také diagram smrštění.

Nástroje analýz grafických dat – jedná se o výpočty popisující stav materiálu, jsou zobrazeny barevnými diagramy, křivkami a isokřivkami. Grafický výstup výpočtu interpretuje hlavní výsledky rychle a jednoduše.

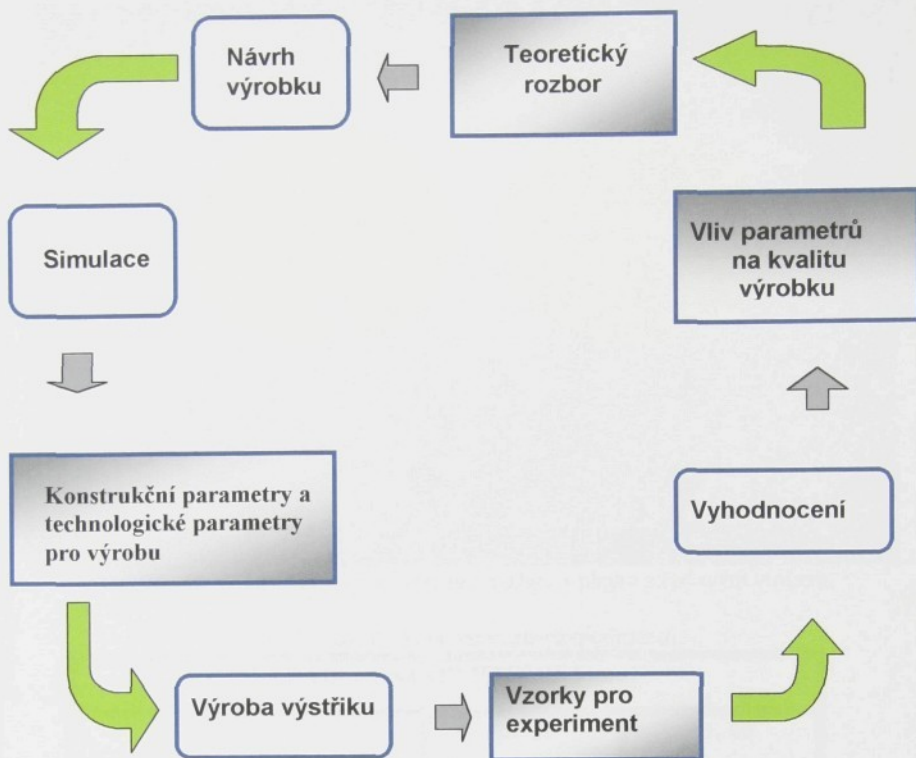
Automatického výstupu výpočtové zprávy – výpočtová zpráva je automaticky zpracována na konci výpočtu. Tento dokument shrnuje hlavní výsledky simulace, poskytuje jednoduchý a praktický nástroj pro dialog mezi odborníky na danou problematiku.

Materiálové databanky – materiálová data nutná k výpočtu jsou získána od výrobců materiálů. Materiálová databanka je cyklicky obnovována a rozšiřována o další materiálová data.

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

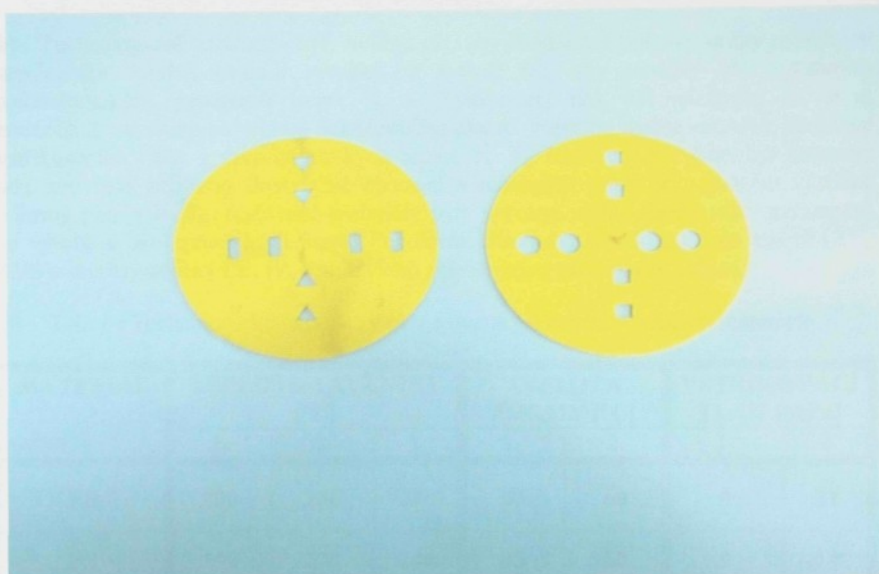
3.1 Záměr experimentů

Prováděné experimenty vycházely z teoretického rozboru, návrhu výrobku a následné simulace. Ze simulace vzešlo optimální nastavení parametrů výrobního cyklu a návrh konstrukce formy. Experimentálním měřením byly získány praktické výsledky, které byly statisticky zpracovány v grafech a vyhodnoceny. Tato data by měla sloužit jako vstupní data při návrhu výrobku, u kterého je pravděpodobnost výskytu SP. Celý proces je názorně zobrazen na obr. 23. Experiment sleduje vliv nejdůležitějších parametrů, ovlivňujících studené spoje. Parametry jsem rozdělil na dvě základní skupiny, a to na konstrukční a technologické.



Obr. 23 : Koncepce práce a experimentu.

a) Konstrukční parametry spadají do kompetence konstruktéra a může je svým návrhem ovlivnit. Tyto parametry vycházely z konstrukce formy, která byla speciálně navržena na problematiku studených spojů při obtékání tvarových jader a sestrojena na katedře tváření a plastů Technické univerzity v Liberci, spolu s různými velikostmi a tvary jader, které se po každé sadě měření měnily. Pro zúžení počtu měření jsem volil vždy stejnou kombinaci tvarových jader pro každou sadu měření tj. kruh/čtverec a trojúhelník/obdélník. Přičemž kruh byl na pozici 1, 2 (15 mm, 20 mm) a 5, 6 (35 mm, 40 mm); čtverec pak na pozici 3, 4 (25 mm, 30 mm) a 7, 8 (45 mm, 50 mm). Stejně tak tomu bylo pro kombinaci trojúhelník/obdélník tj. trojúhelník na pozici 1, 2 a 5, 6; obdélník na pozici 3, 4 a 7, 8. Pozice udává vzdálenost od osy nástroje, v tomto případě je osa nástroje totožná s ústím vtoku. (viz. obr. 24). Tímto bylo dosaženo charakteristické kombinace tvaru, velikosti a vzdálenosti od ústí vtoku (viz. tab. 3), tloušťka kotouče byla konstantní 2 mm.



Obr. 24 : Rozložení tvarových jader na výstřiku s plným středovým vtokem.

Tab. 3 : Konstrukční parametry experimentu.

VZDÁLENOST OD VTOKU [mm]			
KRUH ČTVEREC	15, 20	35, 40	
	25, 30	45, 50	
TROJÚHELNÍK OBDÉLNÍK	15, 20	35, 40	
	25, 30	45, 50	
GEOMETRICKÝ TVAR	VELIKOST [mm]		
	A	B	C
KRUH Ø	4	8	12
ČTVEREC	3	6	18
TROJÚHELNÍK	3,5	7	10,5
OBDÉLNÍK	a	2	4
	b	4	8

b) Technologické parametry byly voleny tak, aby dostatečně postihly určitý rozsah, ve kterém lze vyrábět kvalitní výrobky, a jednak tak, aby postihly vliv vybraných technologických parametrů (např. T_1). Vstřikovací tlak byl udržován na dvou hodnotách, abychom se vyhnuli nežádoucímu efektu, který by mohla způsobit interakce vstřikovacího tlaku a zpracovatelských teplot T_1 , T_f . Vstřikovací cyklus byl nastaven tak, aby bylo zajištěno dostatečné chlazení a minimální pnutí při vyhození výstřiku z formy (viz. tab. 4). Testované materiály byly vybrány podle objemového zastoupení ve výrobě u spolupracujících firem (Peguform, Plastkov, Bosch aj.) a to amorfní PS, ABS a semikrystalický PE, PA s přidavkem skleněných a minerálních vláken.

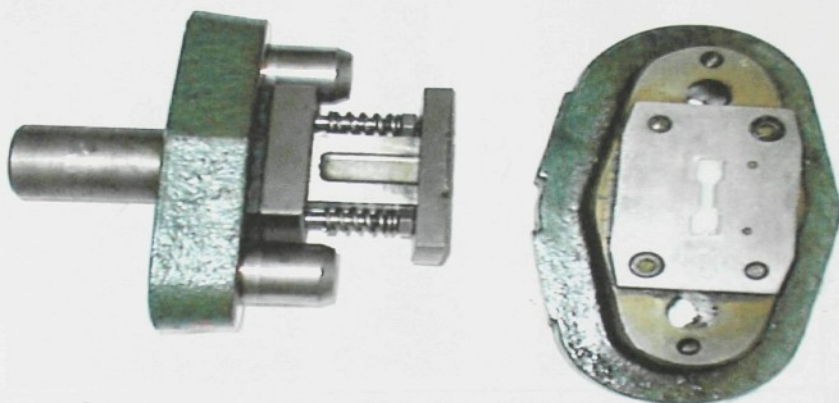
Tab. 4 : Technologické parametry nastavované při experimentálních měřeních.

MATERIÁL	TEPLOTA TAVENINY [°C]			TEPLOTA FORMY [°C]		VSTŘIKOVACÍ TLAK [MPa]	
	1.	2.	3.	1.	2.	1.	2.
PE	200	220	240	40	60	9	11
PS	200	220	240	40	60	9	11
ABS	220	240	260	40	60	9	11
PA	240	260	280	40	60	9	11

3.1.1 Podmínky zkoušky a použité zařízení /39/

Studené spoje byly při vstřikování lokalizovány do celkem úzké oblasti, ze které byla zkušební tělesa odebrána a vzhledem k povaze experimentu bylo zvoleno zkušební těleso typu 5B (tloušťka $h = 2 \text{ mm}$, šířka $b = 5 \text{ mm}$ a pracovní délku $L_0 = 10 \pm 0,2 \text{ mm}$), rychlostí 50 [mm/min] dle DIN 53 455. Pro rázovou nebo vrubovou houževnatost jsem použil zkušební vzorky s následujícími rozměry: $l = (15 \pm 1) \text{ mm}$, $b = (10 \pm 0,5) \text{ mm}$, $h = (1,5 \text{ až } 4,5) \text{ mm}$. Vzorky pro zkoušku tahem byly vystřiženy v nástroji, který je uveden na obr. 25. Tento nástroj je jednoduché sloupkové koncepce se stopkou pro uchycení k beranu a s odpruženým přidržovačem, který zároveň slouží jako stěrač. Tato koncepce byla použita i na vzorky pro rázovou zkoušku Dynstat, jen s tvarovou modifikací střížníku a střížnice. Nástroje byly upevněny na výstředníkovém mechanickém lisu LENP 40 s nožním ovládáním. Vzorky byly následně testovány v laboratoři na univerzálním zkušebním stroji řady TIRATest 2300. Zkušební stroj dle normy DIN 51220, 51221, 51233 a 51227 je určen pro tahové, tlakové a ohybové zkoušky při plynulém a konstantním namáhání. Provedení se dvěma sloupy a dvěma kulovými oběhovými vřeteny. Stroj je vybaven tranzistorově regulovatelným stejnosměrným motorem, integrovaným inkrementálním snímačem traverzy,

nastavitelným koncovým polohovým snímačem k ohraničení zkušebního prostoru a k ochraně vestavěných zkušebně technických příslušenství.



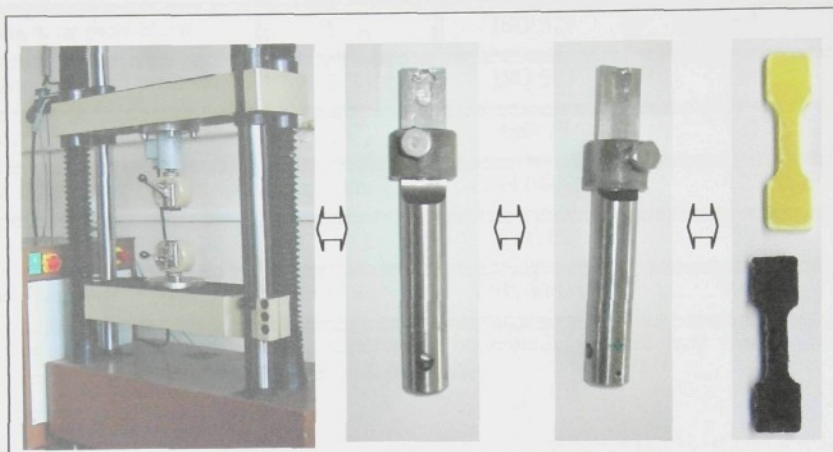
Obr. 25 : Střízný nástroj pro vzorky na tahovou zkoušku.

Zadávaní vstupních hodnot se provádí přes PC dle zvoleného programu – software Labtest. Technická data jsou uvedena v tab. 5. Pro uchycení vzorku slouží samosvěrné čelisti, které se však nedaly použít, protože docházelo k prokluzu, jenž se projevil na křivkách, a měření bylo potom zkrácené.

Tab. 5 : Technická data stroje pro zkoušku tahem.

Technická data pro TIRA test 2300 –zkouška tahem	
Max. zatěžovací síla :	10 kN
Měřicí rozsah od	0,4% do 100%
Snímání dráhy posuvu	Inkrementální
Přesnost dráhy traverzy	0,001 mm
Plynule regulovatelná rychlost	0,01-500 mm/min
Přesnost měření	Třída 1 dle DIN 51 221
Výrobce	TIRA Maschinenbau GmbH Schalkau

Z tohoto důvodu jsem používal čelisti, které jsme uzpůsobili na tento typ vzorku s mechanickým uzavřením na šroub (viz. obr. 26). Výstupy ze zkoušky tahem jsou statisticky zpracovány a převedeny do tabulek a grafů.



Obr. 26 : Zkušební sestava stroj – nástroj – vzorky.

3.2. Použité termoplasty /29/, /30/, /31/, /32/

Měření mechanických vlastností studeného spoje jsem provedl při zpracování běžně používaných materiálu **PE, PS, PA+30% skleněných vláken, ABS** pro různé konstrukční i technologické faktory.

• **PE LITEN MB62** (výrobce Chemopetrol Litvínov a.s.), je lineární polyetylen, homopolymer, s úzkou distribucí molekulových hmotností. Spojuje vysokou pevnost a rázovou houževnatost výrobků s nízkou deformací a vysokým leskem. Je vhodný pro všeobecné použití, při němž dochází ke styku s potravinami. Je určen především pro zpracování vstřikováním na výrobu různých typů přepravek, palet, věder, aerosolových uzávěrů, hraček, předmětů pro domácnost a různých technických součástí, které vyžadují houževnatost a pevnost při použití. Vybrané vlastnosti jsou uvedeny v tab. 6.

Tab. 6 : Vybrané vlastnosti pro PE-MB62.

VLASTNOST	JEDNOTKY	METODA	HODNOTA
Index toku	[g/10min]	ISO 1133	6
Hustota	[g/cm ³]	ISO 1183	0,961
Mez kluzu	[MPa]	ISO 527	28
Mez pevnosti v tahu	[MPa]	ISO 527	14-35

Tažnost na mezi kluzu	[%]	ISO 527	6,2
Tažnost na mezi pevnosti	[%]	ISO 527	160
Vicat A	[°C]	ISO 75	121
Sypná hmotnost	[g/ cm ³]	ČSN 640804	0,57
Rázová houževnatost *	[J]	U.C.C.	39
Absorpce vody	[%]	ČSN 640112	0,03

* hodnoty nejsou srovnatelné s naměřenými hodnotami, protože byly získány buď jinou metodou, nebo při jiných podmínkách zkoušky.

 **PA 6 BERGAMID B65 G30** (výrobce Bergmann GmbH) je semikrystalický termoplast tvořený lineárními makromolekulami. Obsah krystalické fáze však není vysoký, asi 25 až 45 %. Je to konstrukční plast s výhodnými mechanickými vlastnostmi, které se však mohou měnit v širokých mezích podle obsahu monomeru a vody v polymeru. Materiál je plněn 30% skleněných vláken. Skleněné vlákno však zhoršuje houževnatost, ořezuvzdornost a materiál je velmi citlivý na sušení před vstřikováním. Patří však k osvědčeným konstrukčním materiálům. Vybrané vlastnosti jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7 : Vybrané vlastnosti pro PA6-Bergamid B65 G30.

VLASTNOST	JEDNOTKY	METODA	HODNOTA
Index toku	[g/10min]	ISO 1133	3
Hustota	[g/ cm ³]	ISO 1183	1,35
Mez pevnosti v tahu	[MPa]	ISO 527	100-155
Vicat A	[°C]	ISO 75	175
Vrubová houževnatost *	[kJ/m ²]	ISO 179	8-13
Rázová houževnatost *	[kJ/m ²]	ISO 179	40-55
Absorpce vody	[%]	ČSN 640112	30

* hodnoty nejsou srovnatelné s naměřenými hodnotami, protože byly získány buď jinou metodou, nebo při jiných podmínkách zkoušky.

 **ABS LUSTRAN 2443** výrobce (Bayer GmbH) je konstrukční plast, který se připravuje roubovanou kopolymerací styrenu a akrylonitrilu na butadiénstyrenový kaučuk. Podobně jako u hPS se stoupajícím obsahem kaučuku zvyšuje houževnatost, ale snižuje se pevnost a tuhost i teplotní odolnost. Lze připravit směsi s velmi odlišnými vlastnostmi. Vstřikováním se vyrábějí součásti k automobilům přístrojová deska, přední maska, kryt řízení, kliky dveří, součásti domácích přístrojů, kuchyňské roboty, mixery, kryty mobilních telefonů, přístrojů aj. Vybrané vlastnosti jsou uvedeny v tab. 8.

Tab. 8 : Vybrané vlastnosti pro ABS-LUSTRAN 2443

VLASTNOST	JEDNOTKY	METODA	HODNOTA
Index toku	[cm ³ /10min]	ISO 1133	14
Hustota	[g/ cm ³]	ISO 1183	1.06
Mez kluzu	[MPa]	ISO 527	38
Mez pevnosti v tahu *	[MPa]	ISO 527	33
Vicat A	[°C]	ISO 75	92
Vrubová houževnatost Charpy	[kJ/m ²]	ISO 179	36
Rázová houževnatost Izod *	[kJ/m ²]	ISO 180	35

* hodnoty nejsou srovnatelné s naměřenými hodnotami, protože byly získány buď jinou metodou nebo při jiných podmínkách zkoušky.

 **PS-KRASTEN 127** (výrobce Kaučuk Kralupy nad Vltavou a.s.) je standardní průhledný polystyren. Vyznačuje se vysokou tekutostí a číroostí při nižší pevnosti, rázové houževnatosti a teplotní odolnosti. Je to typ pro široké použití. Doporučuje se ke zpracování vstřikováním. Hodí se na výrobky spotřebního charakteru, jako jsou např. kelímky, podnosy, obaly pro potravinářský průmysl, i k výrobě dílů pro elektrotechnický průmysl. Výrobky vynikají vysokým povrchovým leskem. V experimentech byly použity pro sledování vnitřního prnutí metodou polarizovaného světla. Je velmi náchylný k praskání při vytahování z formy. Druhý PS -KRASTEN 336 je typ houževnatého polystyrénu s vysokou tekutostí, snadnou zpracovatelností a vyšší rázovou houževnatostí. Je vhodný pro vstřikování tvarově náročných a tenkostěnných výrobků středně namáhaných. Vybrané vlastnosti jsou uvedeny v tab. 9.

Tab. 9 : Vybrané vlastnosti PS KRASTENU 127 a KRASTENU 336

VLASTNOST	JEDNOTKY	METODA	KRASTEN 127	KRASTEN 336
Index toku	[g/10min]	ISO 1133	15-20	10-15
Hustota	[g/ cm ³]	ISO 1183	1,05	1,04
Mez pevnosti v tahu	[MPa]	ISO 527	37,5	23
Tažnost	[%]	ISO 527		20
Vicat A	[°C]	ISO 75	85	86
Sypná hmotnost	[g/ cm ³]	ČSN 640804	500-600	500-600
Rázová houževnatost Charpy *	[kJ/m ²]	ISO 179	1,6	65
Vrubová houževnatost Charpy *	[kJ/m ²]	ISO 179	0,12	0,7

* hodnoty byly získány buď jinou metodou nebo při jiných podmínkách zkoušky.

3.3 Vstřikovací forma

Zkušební vzorky jsem vyrobil ve vybrané vstřikovací formě pro výrobu kruhových desek s proměnnou tloušťkou a různými tvarovými jádry tak, jak bylo popsáno v úvodu kap. 3.1. Jedná se o kruhovou, jednonásobnou, dvoudeskovou formu s plným středovým vtokem. Vtok je kolmý na dělicí rovinu. Vyhození výstřiku včetně vtokového zbytku je zabezpečeno pomocí čtyř odpružených vyhazovačů, které jsou symetricky uspořádány na kružnici ve vzdálenosti $r = 50$ mm a jedním středovým vyhazovačem. Váha výstřiku je cca 40 gramů podle velikosti tvarových jader a použitého plastu. Temperační systém je pouze na tvárniku a je zajištěn jako podélný chladicí systém obdélníkového průřezu. Tvárnice je bez temperace a je opatřena pouze vtokovou vložkou s plným středovým vtokem a vodicími sloupky pro středění formy. Konstrukční řešení vstřikovací formy je zřejmé z výkresu sestavy, který je součástí přílohy.

3.4 Naměřené hodnoty a grafy

V této kapitole budou uvedeny naměřené hodnoty spolu s přehledem grafických závislostí mechanických vlastností na uvedených faktorech. Označení jednotlivých

tabulek, grafů je na základě popisu uvedeného v kap. 3.1. Nejdříve jsem hodnotil pevnost SP v tahu a potom houževnatost, a to jak vrubovou (pro materiál ABS, PE), tak i rázovou (pro materiál PS, PA). První sada grafů je zaměřena na sledování vlivu vzdálenosti SP od vtoku pro daný tvar a materiál. Každému tvaru přísluší určitá barevná kombinace, aby se rychle a snadno tento tvar identifikoval. V druhé sadě grafů jsou rozhodujícími faktory technologické nastavení stroje a použité materiály. Třetí sada grafů jsou koeficienty SP ak_1 (12). Vzhledem k velkému množství výsledků pro houževnatost, jsem uvedl pouze výsledky pro pevnost v tahu (tato sada grafů je uvedena v příloze). Ke grafickému zobrazení jsou připojeny tabulky hodnot a rozbor výsledků, závislostí. Na závěr jsem provedl faktorovou analýzu. Hodnotí různé kombinace úrovní faktorů, čili různé postupy a jejich interakce na sledovaný výsledek.

V rozboru naměřených hodnot jsou použity určité kombinace písmen a číslic. (viz. tab. 10). Např. : kombinace CT4 popisuje hodnotu mechanických vlastností SP, která byla získána při technologickém nastavení T4 a C velikosti tvarové vložky. Kombinace A1, 1T2 popisuje hodnoty mechanických vlastností SP získané : a) na pozici 1 pro velikost A tvarové vložky, b) na pozici 1 vyrobené při T2 technologickém nastavení stroje.

Tab. 10 : Písmena a číslice použité při rozboru naměřených hodnot.

Velikost tvarových vložek	Technologické nastavení	Vzdálenost od ústí vtoku (pozice tvarové vložky na výstřiku)
A, B, C (vzestupně)	T1, T2, T3, T4, T5	1 až 8 (vzestupně) 9 (místo nezatížené SP)

Použitá písmena (A, B, C) nejsou identická s písmeny použitými pro označení faktorů ve faktorové analýze. Hodnoty velikosti tvarových vložek a jejich vzdálenosti od ústí vtoku jsou uvedeny v tab. 3 (viz. kap. 3.1). Technologické nastavení pro každý materiál je podrobně popsáno v tab. 4 (viz. kap. 3.1) a v tabulkách, které jsou součástí rozboru provedených měření.

Sledování vlivu vzdálenosti od ústí vtoku na pevnost SP v tahu pro daný materiál a tvar, vychází z tabulek naměřených hodnot, sloupcových grafů grafického vyjádření maximálních a minimálních hodnot. V tabulkách hodnot jsou zvýrazněny maximální a minimální hodnoty vzhledem k pozici SP na výstřiku a technologickému nastavení. Technologické nastavení je vyjádřeno v nejdůležitějších procesních hodnotách. (např. 200/50/9 znamená: $T_t = 200^\circ\text{C}$, $T_f = 50^\circ\text{C}$, $p_{\text{vst}} = 5 \text{ MPa}$). V grafech jsou pro lepší přehlednost tyto údaje zastoupeny označením T1 až T5 (např. pro PE: T1 = 200/50/9, T2 = 220/50/9, T3 = 220/50/11 atd.). Grafické vyjádření maximálních a minimálních hodnot poskytuje představu o jejich průběhu a rozpětí vzhledem k tvaru a velikosti kovových vložek.

Ze zobrazené grafické závislosti i hodnot, které jsou v tab. 11, vyplývají pro kovovou vložku tvaru kruhu následující závislosti : AT2, AT5, BT1, BT3 a všechny kombinace velikosti CT odpovídají logickému předpokladu poklesu napětí SP v tahu s rostoucí vzdáleností od vtoku. Menší

velikosti kruhové vložky (A, B) ve zbylých případech v kombinaci s technologickým nastavením nejsou tak výraznou překážkou toku.

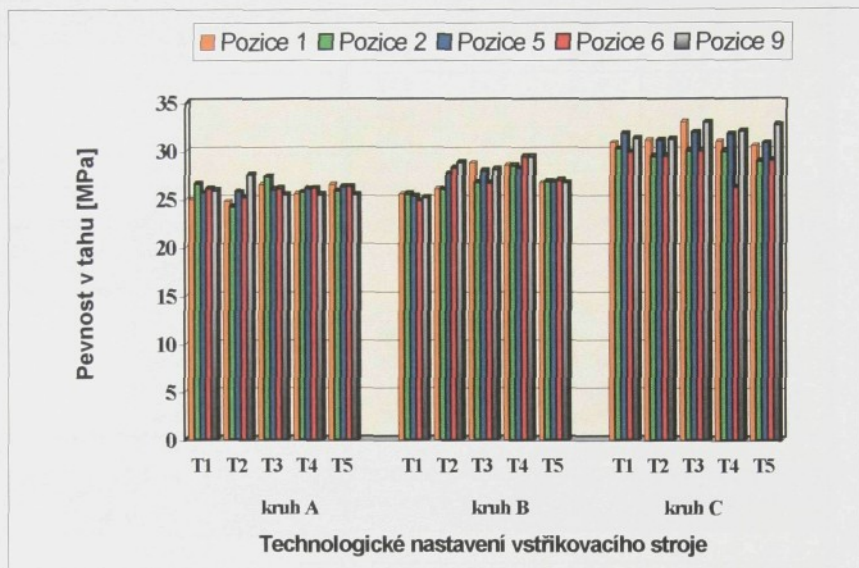
Tab. 11 : Tabulka hodnot pro kruh (A,B,C) materiál PE.

Tvar a velikost kovových vložek		Technologické nastavení stroje (T_i [°C], T_r [°C], p_{vst} [MPa])				
kruh A		200/50/9	220/50/9	220/50/11	220/60/9	240/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 1		25,0	24,8	26,5	25,6	26,5
Pozice 2		26,6	24,2	27,3	25,7	25,8
Pozice 5		25,6	25,7	26,0	26,1	26,2
Pozice 6		26,1	25,2	26,1	26,1	26,3
Pozice 9		25,9	27,5	25,4	25,5	25,4
Maximum: 27,3		Minimum: 24,2 Průměr: 25,7				
kruh B		200/50/9	220/50/9	220/50/11	220/60/9	240/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 1		25,5	26,0	28,8	28,5	26,7
Pozice 2		25,5	26,0	26,7	28,5	26,8
Pozice 5		25,3	27,6	27,9	28,2	26,8
Pozice 6		24,8	28,2	26,7	29,4	26,9
Pozice 9		25,1	28,8	28,1	29,4	26,7
Maximum: 29,4		Minimum: 24,8 Průměr: 27,09				
kruh C		200/50/9	220/50/9	220/50/11	220/60/9	240/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 1		30,9	31,1	33	31,0	30,5
Pozice 2		30,2	29,4	30	29,9	28,9
Pozice 5		31,7	31,1	31,9	31,7	30,8
Pozice 6		29,9	29,5	30	26,2	29
Pozice 9		31,2	31,2	32,9	32	32,6
Maximum: 33		Minimum: 26,2 Průměr: 29,6				

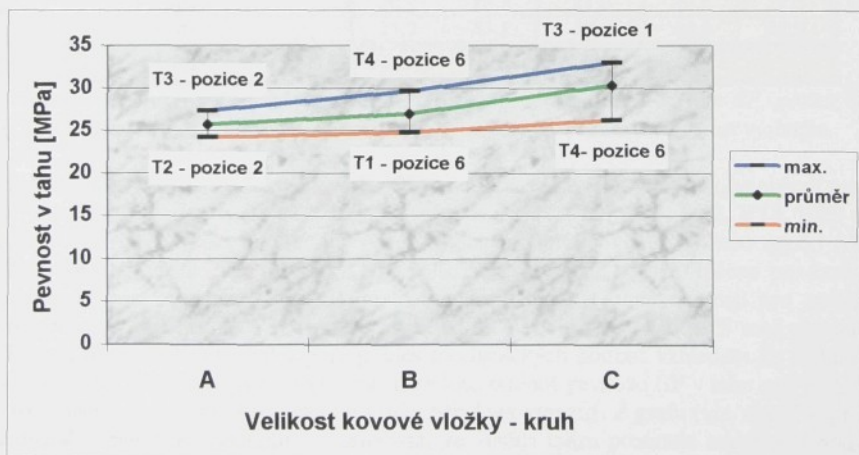
Uvedené maximum, minimum se vztahuje jen pro pozice zatížené vlivem SP, pozice 9 (bez SP) je zde pro porovnání. Podrobnější analýza bude provedena v diskusi výsledků.

Na druhé straně jako by naopak tvořil nehomogenitu v oblasti blíže vtoku a směrem od vtoku se upravovaly mechanické hodnoty. Dokonce kombinace AT3, AT4, AT5 (nejmenší velikost, zvýšená T_i , zvýšená T_r nebo zvýšený tlak p_{vst}) převyšují svými mechanickými vlastnostmi pozici 9 (místo nezatížené SP). Všeobecně izolované každá jedna poloha má jakoby „sinusový“ průběh, který roste s T_i směrem k T3 a T4 následně klesá na T5 (viz. obr. 27). Maximální a minimální hodnoty mají lineárně vzestupný charakter o čemž se můžeme přesvědčit na obr. 28, kde jsou zachyceny minimální a maximální hodnoty spolu s popisem nastavení a pozice na výstřiku. Pro velikost A je to shodná pozice (poloha 2) maxima i minima pro různé nastavení, stejně tomu je pro velikost B (poloha 6). Maximální hodnota pro tvar kruh je: 33 MPa, minimální

hodnota: **24,2 MPa**. Procentuální rozdíl hodnot maxima a minima se jen zvolna zvětšuje 11,5 %, 15,5 %, 20,5 % směrem k velikosti C (procentuální rozdíl je počítán na maximum pro každou velikost jednotlivě).



Obr. 27 : Vliv vzdálenosti od vtoku na pevnost studeného spoje [PE-kruh (A,B,C)].



Obr. 28 : Grafické vyjádření minimálních a maximálních hodnot pro kruh – PE.

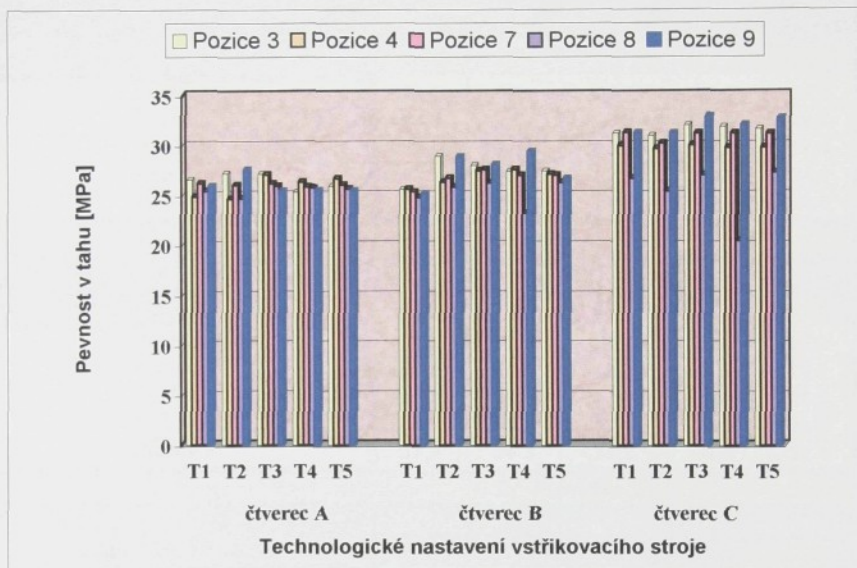
Tab. 12 : Tabulka hodnot pro čtverec (A,B,C) materiál PE.

Tvar a velikost kovových vložek		Technologické nastavení stroje (T _r [°C] , T _r [°C] , p _{vst} [MPa])				
čtverec A		200/50/9	220/50/9	220/50/11	220/60/9	240/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 3		26,6	27,2	27,1	25,3	25,9
Pozice 4		24,9	24,6	27,0	26,3	26,7
Pozice 7		26,2	26,0	26,2	25,8	26,0
Pozice 8		25,4	24,7	25,9	25,7	25,6
Pozice 9		25,9	27,5	25,4	25,5	25,4
Maximum: 27,2		Minimum: 24,6 Průměr: 25,9				
čtverec B		200/50/9	220/50/9	220/50/11	220/60/9	240/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 3		25,6	28,9	28,0	27,4	27,4
Pozice 4		25,6	26,3	27,4	27,6	27,1
Pozice 7		25,3	26,7	27,5	27,0	27,0
Pozice 8		24,8	25,8	26,2	23,2	26,2
Pozice 9		25,1	28,8	28,1	29,4	26,7
Maximum: 28,9		Minimum: 23,2 Průměr: 26,1				
čtverec C		200/50/9	220/50/9	220/50/11	220/60/9	240/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 3		31,2	31,0	32,0	31,9	31,6
Pozice 4		30,0	29,6	30,0	29,8	29,8
Pozice 7		31,3	30,2	31,2	31,2	31,1
Pozice 8		26,7	25,4	27,0	20,5	27,3
Pozice 9		31,2	31,2	32,9	32,0	32,6
Maximum: 32,0		Minimum: 20,5 Průměr: 26,2				

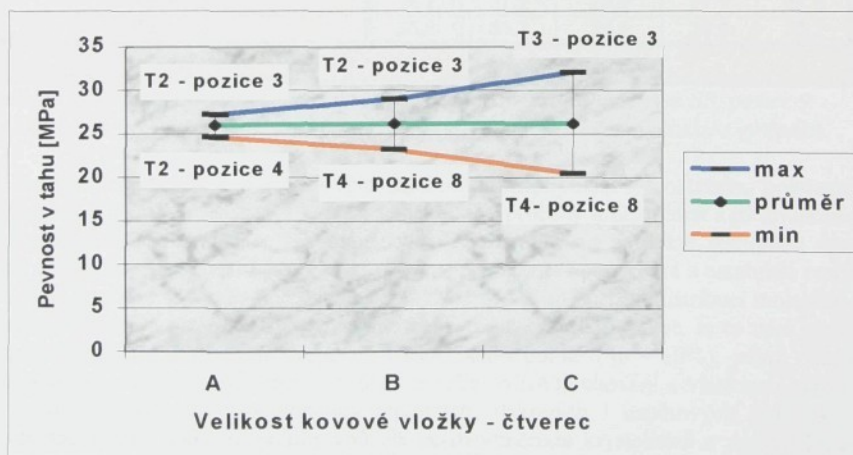
* Uvedené maximum, minimum se vztahuje jen pro pozice zatížené vlivem SP, pozice 9 (bez SP) je zde pro porovnání. Podrobnější analýza bude provedena v diskusi výsledků

Ze zobrazené grafické závislosti (viz. obr. 29) i hodnot, které jsou v tab.12., vyplývají pro kovovou vložku tvaru čtverce následující závislosti : AT1, AT2, AT3, BT2, BT3, BT5 a všechny kombinace velikosti CT odpovídají logickému předpokladu poklesu napětí SP v tahu s rostoucí vzdáleností od vtoku. Pro velikost C zde platí, co bylo řečeno pro kruh, geometrický tvar zde hraje svoji úlohu, neboť trojúhelník a obdélník mají pro stejné kombinace rozdílné průběhy i strmost křivek. Kombinace AT4, BT4, AT5 mají shodné průběhy a to nejdříve vzestup a poté pokles mechanických hodnot vzhledem ke vzdálenosti od vtoku. Za povšimnutí stojí výrazný pokles hodnot pevnosti SP v tahu pro pozici 8 a to zvláště pro velikost B,C, který u kruhu nebyl tak výrazný. Z grafu (viz. obr. 30) pro maximální a minimální hodnotu lze usuzovat, že změna tvaru posunula maximální hodnoty směrem ke vtoku (pozice 3), ustálila se okolo T2 a minimální hodnota do nejvzdálenějšího místa SP od vtoku (pozice 8). Maximální hodnota SP v tahu pro tvar čtverec je: 32 MPa, minimální hodnota: 20,5 MPa. Z obrázku je také

velmi dobře vidět podíl velikosti (A velikost = 9,2%; B = velikost 19,7%; C = velikost 35,9%) na procentuálním rozdílu mezi min. a max. hodnotou, který je výrazně vyšší, než pro tvar kruh (viz. obr. 30).



Obr. 29 : Vliv zvolených faktorů na pevnost studeného spoje [PE-čtverec (A,B,C)].



Obr. 30 : Grafické vyjádření minimálních a maximálních hodnot pro čtverec – PE.

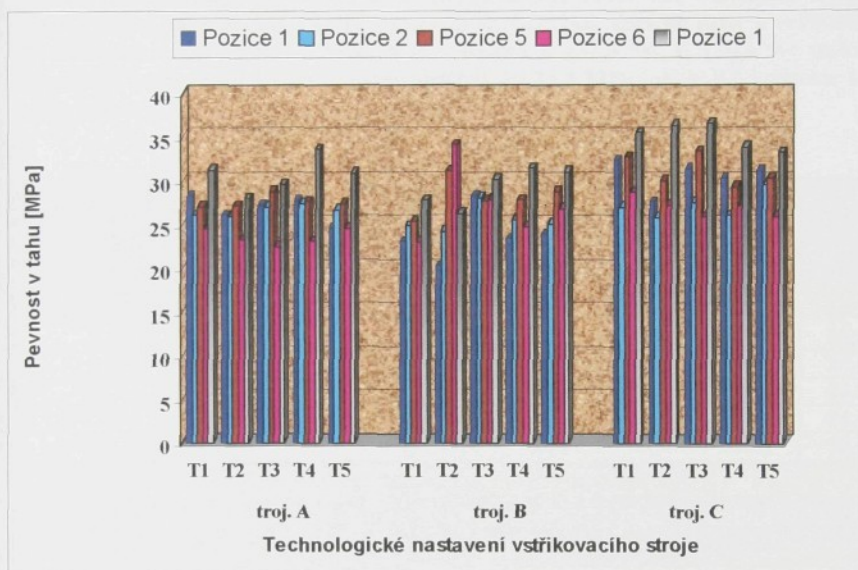
Tab.13 : Tabulka hodnot pro trojúhelník (A,B,C) materiál PE.

Tvar a velikost kovových vložek	Technologické nastavení stroje (T_t [°C], T_f [°C], p_{vst} [MPa])				
trojúhelník A	200/50/9	220/50/9	220/50/11	220/60/9	240/50/9
Vzdálenost od vtoku	Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 1	28,3	26,0	27,2	27,7	24,5
Pozice 2	26,1	25,9	27,0	27,4	26,7
Pozice 5	27,0	27,1	28,8	27,6	27,4
Pozice 6	24,5	23,2	22,5	23,1	24,5
Pozice 9	31,2	28,0	29,6	33,6	30,9
Maximum: 28,8 Minimum: 22,5 Průměr: 25,7					
trojúhelník B	200/50/9	220/50/9	220/50/11	220/60/9	240/50/9
Vzdálenost od vtoku	Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 1	23,1	20,2	28,3	23,4	23,9
Pozice 2	24,9	24,2	28,0	25,7	25,1
Pozice 5	25,3	31,1	27,7	27,8	28,8
Pozice 6	23,0	34,1	27,9	24,7	26,8
Pozice 9	27,8	26,3	30,2	31,5	31,1
Maximum: 34,1 Minimum: 20,2 Průměr: 27,2					
trojúhelník C	200/50/9	220/50/9	220/50/11	220/60/9	240/50/9
Vzdálenost od vtoku	Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 1	32,4	27,6	31,4	30,3	31,2
Pozice 2	27,0	25,8	27,6	26,1	29,6
Pozice 5	32,7	30,0	33,4	29,3	30,3
Pozice 6	28,7	27,2	25,9	27,1	25,9
Pozice 9	35,5	36,3	36,6	33,9	33,2
Maximum: 33,4 Minimum: 25,8 Průměr: 29,6					

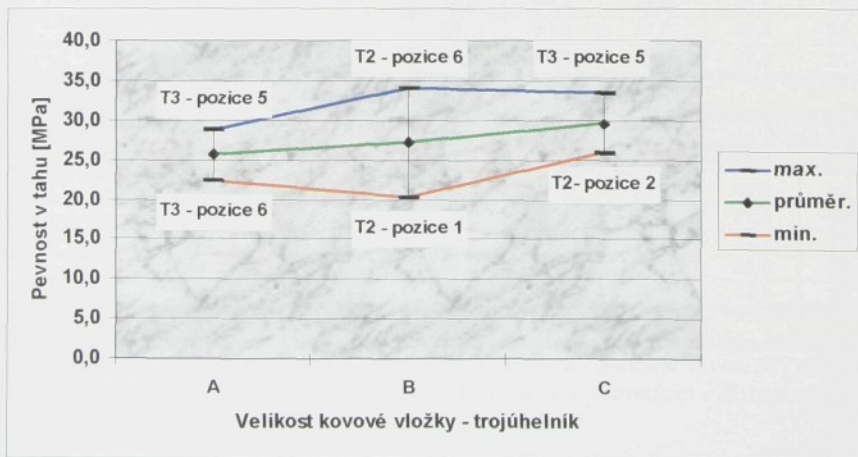
Uvedené maximum, minimum se vztahuje jen pro pozice zatížené vlivem SP, pozice 9 (bez SP) je zde pro porovnání. Podrobnější analýza bude provedena v diskuzi výsledků.

Pro tvar trojúhelník je mnohem výraznější rozdíl mezi pozicí 9 a ostatními polohami na výstřiku. CT, AT1, AT2, AT3, AT4 mají shodné průběhy a nekolidují s již zmiňovanými předpoklady. Kombinace BT mají nejdříve vzestupnou a následně sestupnou tendenci, což se nechá vysvětlit především tvarem, protože při porovnání s ostatními tvary nedochází k takové divergenci (viz. obr. 31). Zvolený PE má úzkou distribuci molekulové hmotnosti, která přesouvá zpracovatelnost do užšího rozsahu teplot. Je to také semi-krytalický materiál s vysokým stupněm krytalického podílu (40 - 50%), jehož obsah spolu s nadmolekulární strukturou v podstatné míře ovlivňují chování a vlastnosti výrobků. Z toho vyplývá, že nehomogenita teplotních, tlakových i napětových polí spolu s kombinací tvaru, velikosti, polohy způsobí nerovnoměrnou krytalizaci a z ní vyplývající naměřené mechanické vlastnosti, které se se vzdáleností od vtoku upravují v předpokládané závislosti. Celkově procentuální rozdíl

(viz. obr. 32) sousedních poloh pro trojúhelník je vyšší ($A = 21,9\%$; $C = 22,7\%$), maximálního procentuálního rozdílu dosahuje pro velikost **B** ($40,6\%$), které se stále udržuje v **T2**, **T3** nastavení. Maximální hodnota SP v tahu pro tvar trojúhelník je: **34,1 MPa**, minimální hodnota: **20,2 MPa** (viz. tab. 13).



Obr.31 : Vliv zvolených faktorů na pevnost studeného spoje [PE-trojúhelník (A,B,C)].



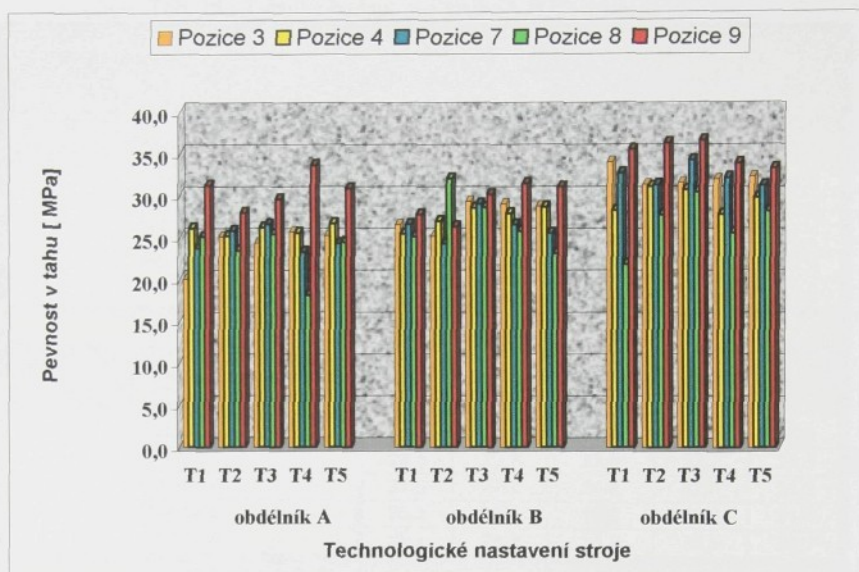
Obr. 32 : Grafické vyjádření minimálních a maximálních hodnot pro trojúhelník – PE.

Pro tvar obdélník velikost A (viz. obr. 33) je trend pevnosti SP v tahu značně nesourodý a projevují se zde především růstové trendy, které se vzdáleností od vtoku upravují. Kombinace CT, AT4, AT2 a skoro celé nastavení BT již je ve shodě se zmiňovaným předpokladem, jelikož tavenina má mnohem větší obtíže při obtékání obdélníku, než např. u kruhu. Při pohledu na obr. 34 je vidět, že minimální hodnota je v pozici nejvzdálenější od vtoku a to pro jakékoliv nastavení, maximální hodnota zůstává víceméně v oblasti T2, T3 nastavení stroje, avšak lineárně roste k velikosti C. Procentuální rozdíl minima a maxima je větší pro A (37,6 %), C (36,4 %) velikost. Maximální hodnota SP v tahu pro tvar obdélník je: 34,2 MPa, minimální hodnota: 18,1 MPa (viz. tab. 14).

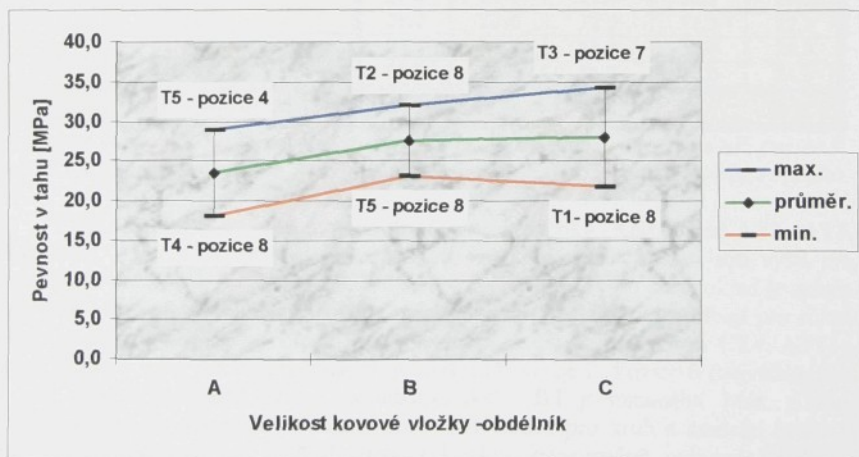
Tab. 14 : Tabulka hodnot pro obdélník (A,B,C) materiál PE.

Tvar a velikost kovových vložek		Technologické nastavení stroje (T ₁ [°C] , T ₂ [°C] , p _{vst} [MPa])				
obdélník A		200/50/9	220/50/9	220/50/11	220/60/9	240/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 3		20,1	25,1	24,4	25,7	25,3
Pozice 4		26,1	25,2	26,2	25,5	26,6
Pozice 7		23,7	25,8	26,5	23,2	24,2
Pozice 8		25,1	23,4	25,4	18,1	24,4
Pozice 9		31,2	28,0	29,6	33,6	30,9
Maximum: 26,6 Minimum: 18,1 Průměr: 22,4						
obdélník B		200/50/9	220/50/9	220/50/11	220/60/9	240/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 3		26,5	25,2	29,4	29,1	28,8
Pozice 4		25,4	27,0	28,5	27,9	28,7
Pozice 7		26,5	24,2	29,0	26,5	25,5
Pozice 8		25,1	32,0	28,6	25,8	23,1
Pozice 9		27,8	26,3	30,2	31,5	31,1
Maximum: 32,0 Minimum: 23,1 Průměr: 27,6						
obdélník C		200/50/9	220/50/9	220/50/11	220/60/9	240/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 3		34,0	31,4	31,6	32,0	32,3
Pozice 4		28,2	31,1	30,7	27,8	29,7
Pozice 7		32,7	31,3	34,2	32,1	31,2
Pozice 8		21,8	27,7	30,4	25,6	28,1
Pozice 9		35,5	36,3	36,6	33,9	33,2
Maximum: 34,2 Minimum: 21,8 Průměr: 28,0						

* Uvedené maximum, minimum se vztahuje jen pro pozice zatížené vlivem SP, pozice 9 (bez SP) je zde pro porovnání. Podrobnější analýza bude provedena v diskusi výsledků.



Obr. 33 : Vliv zvolených faktorů na pevnost studeného spoje [PE-obdélník (A,B,C)].



Obr. 34 : Grafické vyjádření minimálních a maximálních hodnot pro obdélník – PE.

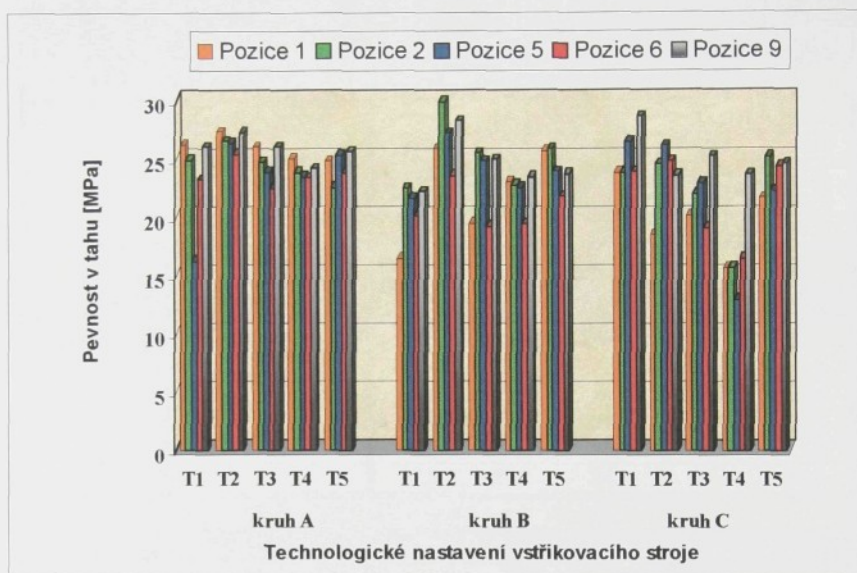
Tab. 15 : Tabulka hodnot pro kruh (A,B,C) materiál PS.

Tvar a velikost kovových vložek		Technologické nastavení stroje (T_i [°C] , T_r [°C] , p_{vst} [MPa])				
kruh A		200/50/9	220/50/9	220/50/11	220/60/9	240/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 1		26,2	27,3	26,0	25,0	24,8
Pozice 2		24,9	26,5	24,7	23,8	22,5
Pozice 5		16,2	26,3	23,9	23,4	25,2
Pozice 6		23,2	25,4	22,5	23,4	23,9
Pozice 9		26,0	27,3	26,0	24,2	25,6
Maximum: 27,3		Minimum: 16,2		Průměr: 21,8		
kruh B		200/50/9	220/50/9	220/50/11	220/60/9	240/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 1		16,4	25,9	19,5	23,0	25,6
Pozice 2		22,5	29,9	25,5	22,7	25,9
Pozice 5		21,6	27,2	24,8	22,5	23,9
Pozice 6		20,2	23,6	19,2	19,4	21,8
Pozice 9		22,2	28,2	24,9	23,5	23,7
Maximum: 29,9		Minimum: 16,4		Průměr: 23,0		
kruh C		200/50/9	220/50/9	220/50/11	220/60/9	240/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 1		23,8	18,5	20,2	15,7	21,6
Pozice 2		23,8	24,5	21,9	15,7	25,2
Pozice 5		26,5	26,1	22,9	12,9	22,2
Pozice 6		23,9	24,8	19,1	16,5	24,4
Pozice 9		28,6	23,6	25,2	23,6	24,6
Maximum: 26,5		Minimum: 12,5		Průměr: 21,5		

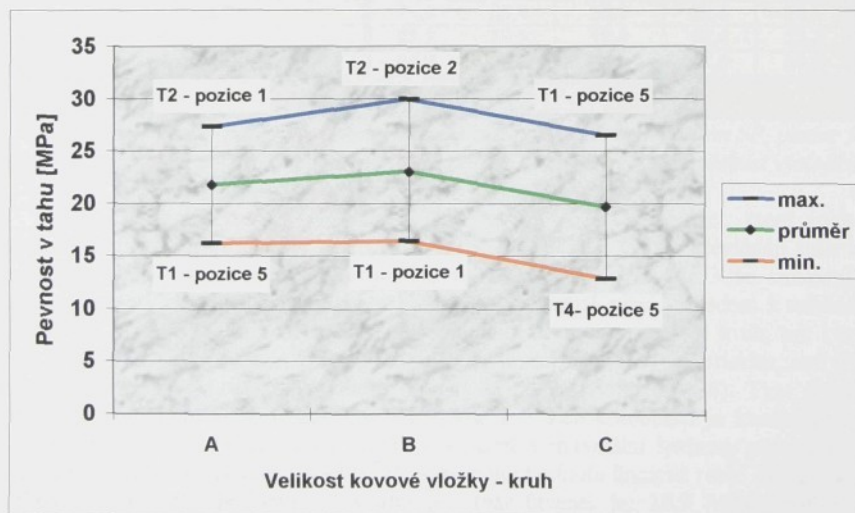
Uvedené maximum, minimum se vztahuje jen pro pozice zatížené vlivem SP, pozice 9 (bez SP) je zde pro porovnání. Podrobnější analýza bude provedena v diskusi výsledků.

PS kruh oproti PE má dosti odlišné charakteristiky. Kombinace AT2, AT3, AT4, AT5, BT4, BT5 vyhovují předpokladu, že hodnoty SP v tahu jsou vyšší pro pozice bližší vtoku a se vzdáleností se snižují (viz. obr. 35). Tento předpoklad je splněn především v oblasti A velikosti. Rozdíly mezi pozicí 9 a ostatními nekolísají pro různé tvary, tak jako u PE. Za povšimnutí stojí pozice 5, která má extrémy v CT4, AT1, a pozice 1, která v BT a CT kombinacích je nižší než pozice 2. Pozice 6 (nejvzdálenější od ústí vtoku) ve většině případů kombinací AT a BT je minimální. Max. a min. hodnoty klesají k velikosti C. Velikost kovových vložek pro kruh a amorfní materiál (bez vlivu krystalizace a úzké distribuční křivky) jednoznačně ovlivňuje hodnotu pevnosti SP v tahu. Čím větší vzdálenost musí čelo taveniny urazit při obtékání kruhové vložky, tím více bude ochlazená a následná nedostatečná difuze sníží mechanické hodnoty. Procentuální rozdíl maximální a minimální hodnoty (viz. obr. 36) se pro PS (A = 40,8 %, B = 45,1 %, C = 51,3 %) zvýšil ve srovnání s PE, ale drží se vzestupné

tendence. Maximální hodnota SP v tahu pro tvar kruh je: **29,9 MPa**, minimální hodnota: **12,5 MPa**. (viz. tab. 15)



Obr. 35 : Vliv zvolených faktorů na pevnost studeného spoje [PS-kruh (A,B,C)].



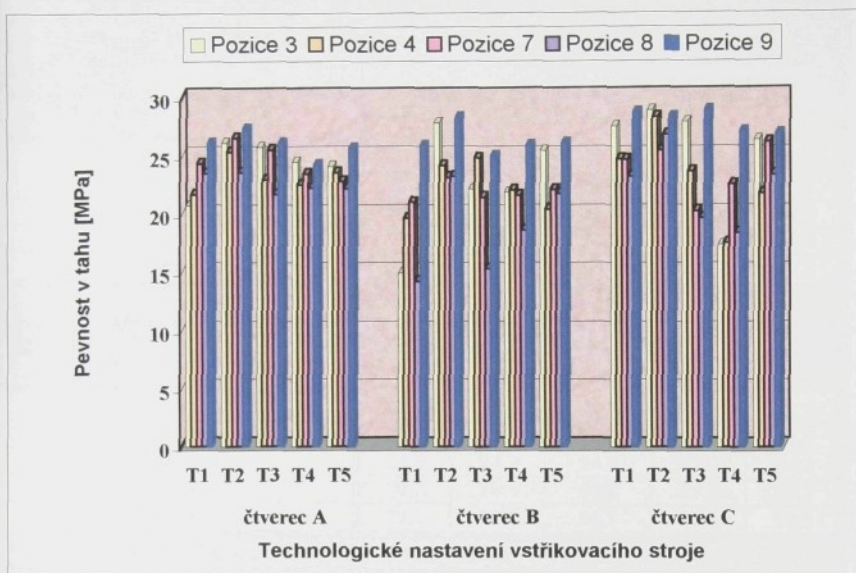
Obr. 36 : Grafické vyjádření minimálních a maximálních hodnot pro kruh – PS.

Tab. 16 : Tabulka hodnot pro čtverec (A,B,C) materiál PS.

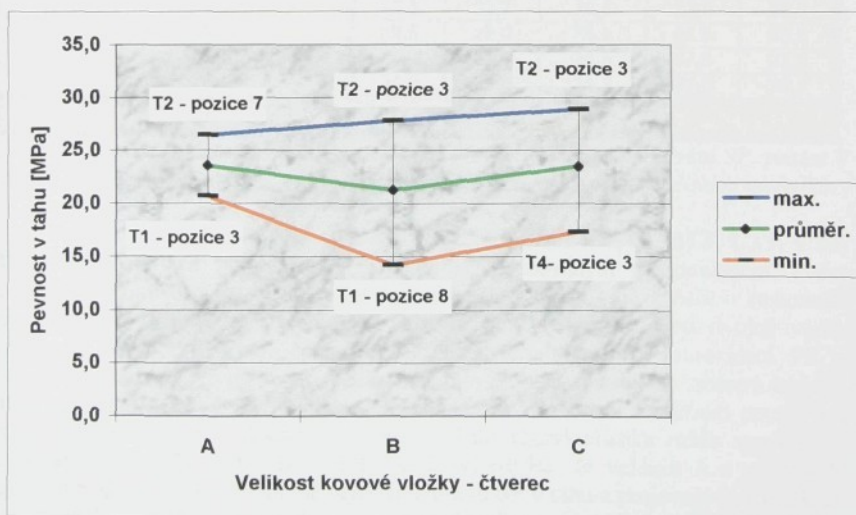
Tvar a velikost kovových vložek	Technologické nastavení stroje (T_i [°C], T_r [°C], p_{vst} [MPa])				
<i>čtverec A</i>	200/50/9	220/50/9	220/50/11	220/60/9	240/50/9
Vzdálenost od vtoku	Pevnost v tahu [MPa]				
<i>Pozice 3</i>	20,7	26,1	25,7	24,5	24,1
<i>Pozice 4</i>	21,6	25,3	22,9	22,5	23,5
<i>Pozice 7</i>	24,3	26,5	25,5	23,4	22,8
<i>Pozice 8</i>	23,5	23,5	21,7	22,2	22,1
<i>Pozice 9</i>	26,0	27,3	26,0	24,2	25,6
Maximum: 26,5 Minimum: 20,7 Průměr: 23,6					
<i>čtverec B</i>	200/50/9	220/50/9	220/50/11	220/60/9	240/50/9
Vzdálenost od vtoku	Pevnost v tahu [MPa]				
<i>Pozice 3</i>	14,9	27,8	22,1	21,9	25,4
<i>Pozice 4</i>	19,6	24,2	24,8	22,0	20,4
<i>Pozice 7</i>	21,0	23,1	21,4	21,6	22,1
<i>Pozice 8</i>	14,2	23,2	15,3	18,5	21,7
<i>Pozice 9</i>	25,8	28,2	24,9	25,8	26,0
Maximum: 27,8 Minimum: 14,2 Průměr: 21,3					
<i>čtverec C</i>	200/50/9	220/50/9	220/50/11	220/60/9	240/50/9
Vzdálenost od vtoku	Pevnost v tahu [MPa]				
<i>Pozice 3</i>	27,5	28,9	27,9	17,3	26,3
<i>Pozice 4</i>	24,7	28,3	23,6	17,5	21,7
<i>Pozice 7</i>	24,6	25,4	20,2	22,5	26,1
<i>Pozice 8</i>	23,2	26,8	19,6	18,4	23,3
<i>Pozice 9</i>	28,6	28,3	28,8	27,0	26,8
Maximum: 28,9 Minimum: 17,3 Průměr: 23,5					

Uvedené maximum, minimum se vztahuje jen pro pozice zatížené vlivem SP, pozice 9 (bez SP) je zde pro porovnání. Podrobnější analýza bude provedena v diskusi výsledků.

Pro PS tvar čtverec (viz. obr. 37) se zvýšil počet kombinací, které splňují předpoklady (AT2, AT3, AT4, AT5, BT, BT5, CT1, CT3, CT5). Převládají stále ve velikosti A, ale vlivem tvaru zasahují i do velikosti B a C. Pozice 3 ve srovnání s kruhem nabývá maximálních hodnot a pozice 6 je výrazně nižší vzhledem k ostatním pozicím. CT4 a BT1 kombinace vykazují minimum, a to jak pro tvar kruh, tak i pro tvar čtverec. Z toho usuzují, že technologické nastavení zde má vyšší prioritu, než tvar kovových zálsků. Maximální hodnota se ustálila na T2 (viz. obr. 38). Tvar se zde projevuje především ve srovnání s pozicí 9, kde pro více kombinací je koeficient a_{kl} v rozmezí (0,4-0,6). Procentuální rozdíl maximální a minimální hodnoty pevnosti SP v tahu je největší pro B velikost (48,9 %). Maximální hodnota lineárně roste směrem k C velikosti. Maximální hodnota SP v tahu pro tvar čtverec je: 28,9 MPa, minimální hodnota: 14,2 MPa (viz. tab. 16).



Obr. 37 : Vliv zvolených faktorů na pevnost studeného spoje [PS-čtverec (A,B,C)].



Obr. 38 : Grafické vyjádření minimálních a maximálních hodnot pro čtverec – PS.

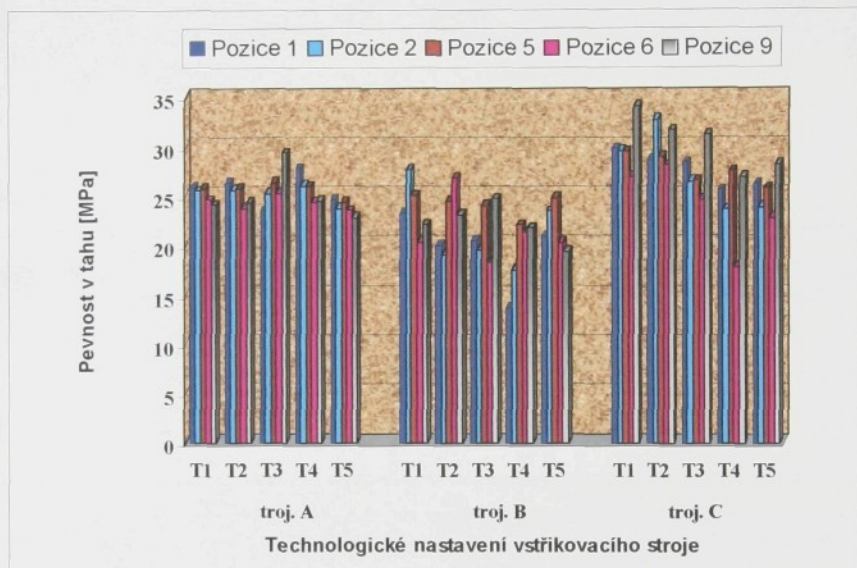
Tab. 17 : Tabulka hodnot pro trojúhelník (A,B,C) materiál PS.

Tvar a velikost kovových vložek		Technologické nastavení stroje (T_i [°C], T_f [°C], p_{vst} [MPa])				
trojúhelník A		200/50/9	220/50/9	220/50/11	220/60/9	240/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 1		25,9	26,3	23,5	27,8	24,6
Pozice 2		25,5	25,5	25,3	26,1	23,7
Pozice 5		25,7	25,7	26,3	25,9	24,3
Pozice 6		24,5	23,7	25,2	24,3	23,5
Pozice 9		24,1	24,3	29,3	24,5	22,8
Maximum: 27,8 Minimum: 23,4 Průměr: 25,6						
trojúhelník B		200/50/9	220/50/9	220/50/11	220/60/9	240/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 1		23,2	20,0	20,4	13,6	20,9
Pozice 2		27,6	19,1	19,5	17,5	23,5
Pozice 5		25,0	24,5	24,0	22,0	24,8
Pozice 6		20,3	26,8	18,2	21,3	20,3
Pozice 9		22,1	23,0	24,7	21,8	19,3
Maximum: 27,6 Minimum: 13,6 Průměr: 20,6						
trojúhelník C		200/50/9	220/50/9	220/50/11	220/60/9	240/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 1		29,8	28,7	28,4	25,6	26,2
Pozice 2		29,5	32,7	26,5	23,6	23,9
Pozice 5		29,5	29,0	26,6	27,5	25,8
Pozice 6		26,9	28,1	24,6	17,8	22,8
Pozice 9		34,0	31,6	31,2	27,0	28,1
Maximum: 32,7 Minimum: 17,8 Průměr: 25,2						

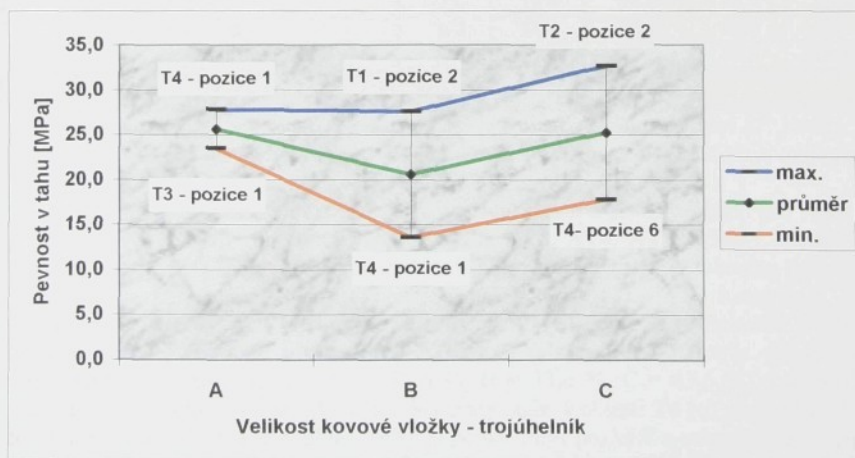
* Uvedené maximum, minimum se vztahuje jen pro pozice zatížené vlivem SP, pozice 9 (bez SP) je zde pro porovnání. Podrobnější analýza bude provedena v diskusi výsledků.

Pro PS – trojúhelník (viz. obr. 39) AT1, AT2, AT4, AT5, BT3, CT1, CT3, CT4, CT5 jsou tyto kombinace v souladu se zmiňovaným předpokladem. Počet vyhovujících kombinací se oproti předchozím tvarům zvýšil, což svědčí o rostoucím vlivu tvaru. Podmínujícím faktorem pevnosti a tuhosti pro PS jsou dvojité vazby elastomerní složky, které jsou náchylné k porušení termooxidací a fotooxidací. PS je také citlivý na všechny typy vrubu, přičemž se tato citlivost zvyšuje se změnou teploty. Nutno počítat s vrubovým účinkem vtoku zejména v kombinaci s vnitřním pnutím při nevhodně zvolených podmínkách vstřikování. Tato charakteristika může vysvětlovat kombinace AT3, BT1, BT4, BT5, CT2. Celkově lze říci, že velikost A a velikost C mají vyšší hodnoty. B nastavení má nejnižší hodnotu SP v tahu a projevuje se zde nárůst procentuálního rozdílu minimální a maximální hodnoty (50,7 %). Z hlediska mechanických vlastností je B nastavení nejméně vhodné. Pozice 9 ve většině případů převyšuje ostatní pozice (viz. obr. 40). Maximální hodnota roste od A k C velikosti a

zůstává neoptimálnější pro **T2**, **T1**. Minimální hodnota zůstává v **T3**, **T4**. Maximální hodnota SP v tahu pro tvar trojúhelník je: **32,7 MPa**, minimální hodnota: **13,6 MPa**. (viz. tab. 17)



Obr. 39 : Vliv zvolených faktorů na pevnost studeného spoje [PS-troj. A,B,C)].



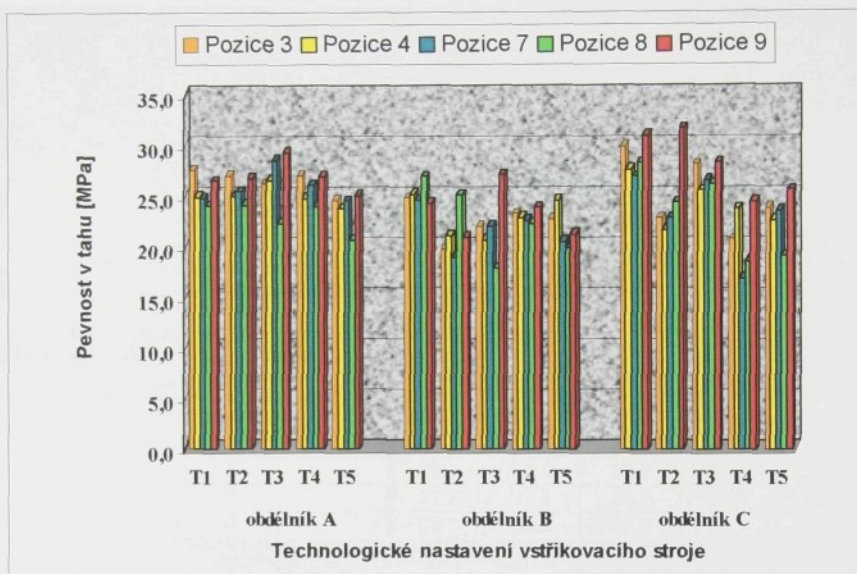
Obr. 40 : Grafické vyjádření minimálních a maximálních hodnot pro trojúhelník – PS.

Tab. 18 : Tabulka hodnot pro obdélník (A,B,C) materiál PS.

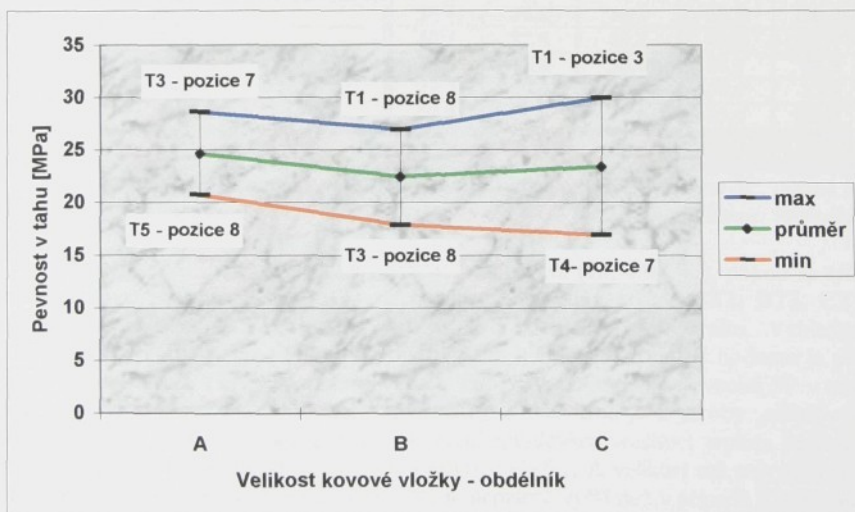
Tvar a velikost kovových vložek		Technologické nastavení stroje (T_i [°C], T_f [°C], p_{vst} [MPa])				
obdélník A		200/50/9	220/50/9	220/50/11	220/60/9	240/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 3		27,6	27,0	26,2	27,1	24,6
Pozice 4		24,9	25,0	26,6	24,8	23,8
Pozice 7		24,7	25,4	28,6	26,1	24,6
Pozice 8		24,1	24,1	22,3	24,0	20,7
Pozice 9		26,5	26,7	29,3	26,9	25,0
Maximum: 28,6 Minimum: 20,7 Průměr: 24,6						
obdélník B		200/50/9	220/50/9	220/50/11	220/60/9	240/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 3		24,9	19,8	22,1	23,3	22,8
Pozice 4		25,3	21,2	20,7	23,0	24,6
Pozice 7		24,6	19,0	22,1	22,7	20,6
Pozice 8		27,0	25,2	17,9	22,3	19,9
Pozice 9		24,3	21,0	27,2	24,0	21,3
Maximum: 27,0 Minimum: 17,9 Průměr: 22,4						
obdélník C		200/50/9	220/50/9	220/50/11	220/60/9	240/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 3		29,9	22,9	28,2	20,7	23,9
Pozice 4		27,6	21,7	25,6	23,8	22,6
Pozice 7		27,0	22,9	26,6	16,9	23,5
Pozice 8		28,3	24,4	26,2	18,5	19,1
Pozice 9		31,0	31,6	28,3	24,5	25,6
Maximum: 29,9 Minimum: 16,9 Průměr: 23,4						

Uvedené maximum, minimum se vztahuje jen pro pozice zatížené vlivem SP, pozice 9 (bez SP) je zde pro porovnání. Podrobnější analýza bude provedena v diskusi výsledků.

Pro PS – obdélník začíná opět zesilovat vliv tvaru. Většina průběhů pro velikost A je shodná s průběhy pro ostatní tvary (AT1, AT2, AT4, AT5, BT4, CT3, CT5). Z toho vyplývá, že při obtékání kovových zálsků malých tvarů čelo taveniny nemá čas zchladnout a řídí se zmiňovanými principy vzdálenosti až na AT3 kombinaci, kde změna vstřikovacího tlaku tuto rovnováhu narušuje. (viz. obr. 41) Minimální hodnota lineárně klesá s velikostí směrem od A do C (viz. obr. 42) spolu s rostoucím procentuálním rozdílem hodnot (A = 27,6 %, B = 33,6 %, C = 43,5 %), pro pozice vzdálenější od vtoku a ve shodě s ostatními tvary spíše v oblasti T4 (tj. zvýšená teplota formy). Kromě velikosti C není tak velký nepoměr mezi pozicí 9 a ostatními jako např. u trojúhelníku. Maximální hodnota SP v tahu pro tvar trojúhelník je: 29,9 MPa, minimální hodnota: 16,9 MPa (viz. tab. 18).



Obr. 41 : Vliv zvolených faktorů na pevnost studeného spoje [PS-obdélník (A,B,C)].



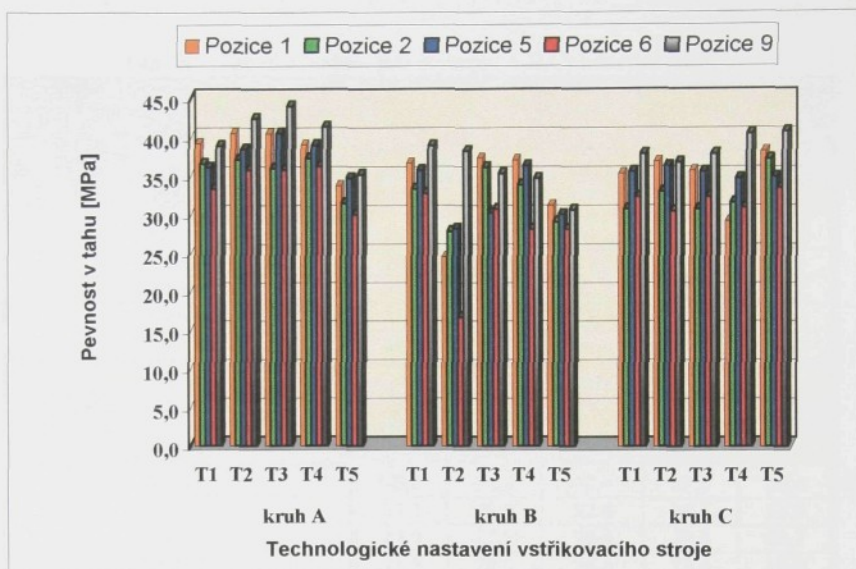
Obr. 42 : Grafické vyjádření minimálních a maximálních hodnot pro obdélník – PS.

Tab. 19 : Tabulka hodnot pro kruh (A,B,C) materiál ABS.

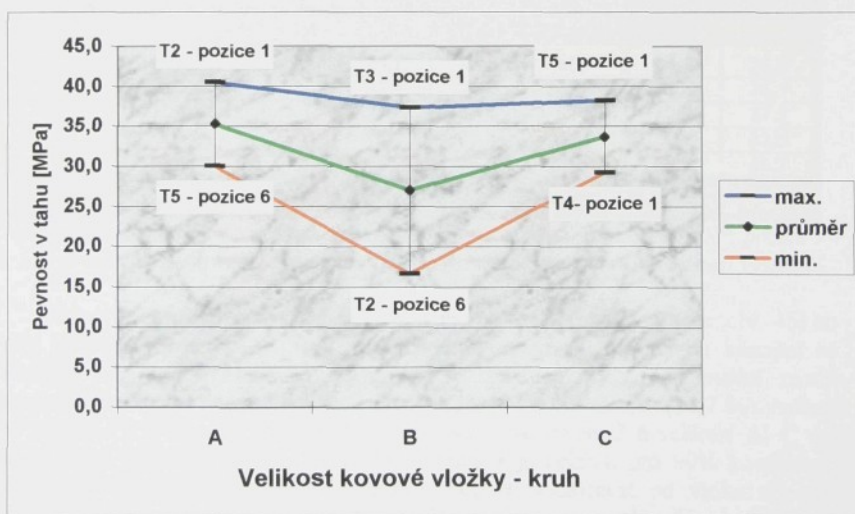
Tvar a velikost kovových vložek	Technologické nastavení stroje (T_t [°C] , T_f [°C] , p_{vst} [MPa])				
kruh A	220/50/9	240/50/9	240/50/11	240/60/9	260/50/9
Vzdálenost od vtoku	Pevnost v tahu [MPa]				
<i>Pozice 1</i>	39,2	40,5	40,5	39,0	33,8
<i>Pozice 2</i>	36,6	37,1	36,0	37,3	31,4
<i>Pozice 5</i>	36,1	38,5	40,5	38,9	34,7
<i>Pozice 6</i>	33,3	35,8	35,8	36,2	30,0
<i>Pozice 9</i>	38,9	42,4	44,0	41,3	35,1
Maximum: 40,5 Minimum: 30,0 Průměr: 35,2					
kruh B	220/50/9	240/50/9	240/50/11	240/60/9	260/50/9
Vzdálenost od vtoku	Pevnost v tahu [MPa]				
<i>Pozice 1</i>	36,7	24,6	37,3	37,1	31,2
<i>Pozice 2</i>	33,3	27,8	36,1	33,8	29,0
<i>Pozice 5</i>	35,7	28,2	30,2	36,3	30,0
<i>Pozice 6</i>	32,7	16,7	30,7	28,1	28,1
<i>Pozice 9</i>	38,9	38,2	35,3	34,7	30,6
Maximum: 37,3 Minimum: 16,7 Průměr: 27,0					
kruh C	220/50/9	240/50/9	240/50/11	240/60/9	260/50/9
Vzdálenost od vtoku	Pevnost v tahu [MPa]				
<i>Pozice 1</i>	35,4	36,9	35,7	29,2	38,2
<i>Pozice 2</i>	30,7	32,9	30,7	31,6	37,1
<i>Pozice 5</i>	35,5	36,3	35,5	34,7	34,9
<i>Pozice 6</i>	32,3	30,5	32,3	30,9	33,5
<i>Pozice 9</i>	37,9	36,8	37,9	40,4	40,7
Maximum: 38,2 Minimum: 29,2 Průměr: 33,7					

*Uvedené maximum, minimum se vztahuje jen pro pozice zatížené vlivem SP, pozice 9 (bez SP) je zde pro porovnání. Podrobnější analýza bude provedena v diskusi výsledků

Materiál ABS u tvaru kruh je výrazně homogenní (viz. obr. 43), pokud se týče průběhů vlivu vzdálenosti od vtoku na pevnost SP v tahu, kromě **BT2**, **BT3**, **CT4** splňují ostatní předpoklad klesající pevnosti se vzdáleností od vtoku. Vzhledem k materiálu se hodnoty pevnosti posunuly k vyšším hodnotám. Nejnížší hodnota je pro pozici 6 a nastavení **T2**, jinak zůstává v **T4** a **T5**. Nejvyšší hodnoty pevnosti SP v tahu směřují spíše k pozici 1 a 5. Průběhy závislosti pro tvar kruh jsou jakoby „sinusové“, což je závislé jak na technologickém nastavení (především rostoucí teplota taveniny zvyšuje mechanické hodnoty), tak na tvaru kovové vložky. A velikost má nejvyšší max. i min. hodnoty, procentuální rozdíl (25,2 %) je nepatrně vyšší než v případě **C** velikosti (23,5 %). Největší procentuální rozdíl naměřených hodnot má velikost **B** (55,3 %). Maximální hodnota SP v tahu pro tvar kruh materiál ABS je: **40,5 MPa**, minimální hodnota: **16,7 MPa**. (viz. tab. 19)



Obr. 43 :Vliv zvolených faktorů na pevnost studeného spoje [ABS-kruh (A,B,C)]



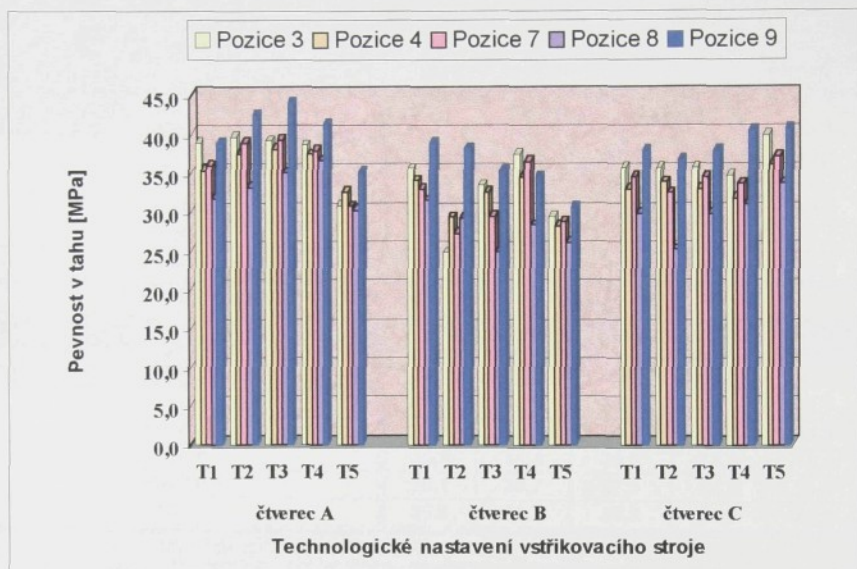
Obr. 44 : Grafické vyjádření minimálních a maximálních hodnot pro kruh - ABS.

Tab. 20 : Tabulka hodnot pro čtverec (A,B,C) materiál ABS.

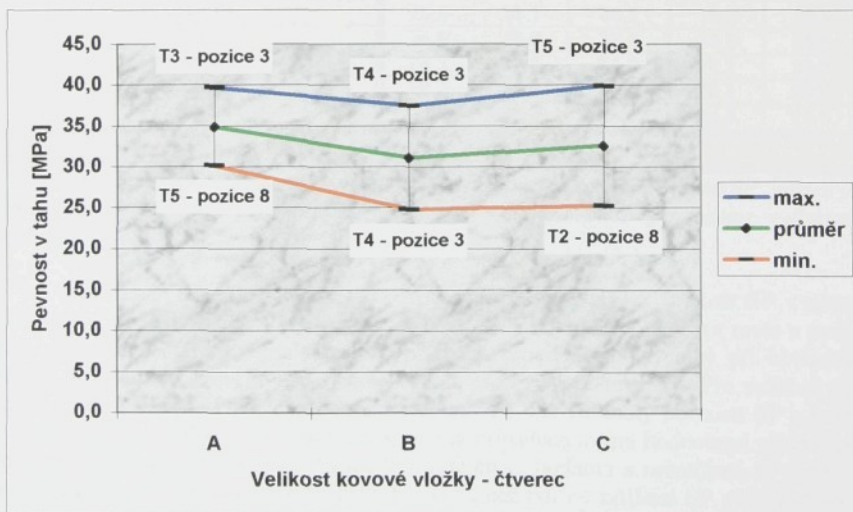
Tvar a velikost kovových vložek	Technologické nastavení stroje (T_t [°C] , T_f [°C] , p_{vst} [MPa])				
čtverec A	220/50/9	240/50/9	240/50/11	240/60/9	260/50/9
Vzdálenost od vtoku	Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 3	38,8	39,6	39,2	38,6	30,8
Pozice 4	35,4	37,4	38,0	37,4	32,6
Pozice 7	36,0	38,9	39,3	37,9	30,7
Pozice 8	31,8	33,1	35,0	36,6	30,1
Pozice 9	38,9	42,4	44,0	41,3	35,1
Maximum: 39,6 Minimum: 30,1 Průměr: 34,9					
čtverec B	220/50/9	240/50/9	240/50/11	240/60/9	260/50/9
Vzdálenost od vtoku	Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 3	35,6	24,8	33,4	37,5	29,4
Pozice 4	34,0	29,3	32,6	34,5	28,2
Pozice 7	33,0	27,2	29,4	36,5	28,7
Pozice 8	31,5	29,2	24,9	28,4	26,0
Pozice 9	38,9	38,2	35,3	34,7	30,6
Maximum: 37,5 Minimum: 24,8 Průměr: 31,1					
čtverec C	220/50/9	240/50/9	240/50/11	240/60/9	260/50/9
Vzdálenost od vtoku	Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 3	35,7	35,8	35,7	34,7	39,8
Pozice 4	32,9	33,9	32,9	31,8	36,1
Pozice 7	34,5	32,4	34,5	33,7	37,1
Pozice 8	29,8	25,2	29,8	30,9	33,6
Pozice 9	37,9	36,8	37,9	40,4	40,7
Maximum: 39,8 Minimum: 25,2 Průměr: 32,5					

Uvedené maximum, minimum se vztahuje jen pro pozice zatížené vlivem SP, pozice 9 (bez SP) je zde pro porovnání. Podrobnější analýza bude provedena v diskusi výsledků.

Tvar čtverec u ABS je podobně jako kruh poměrně homogenní (viz. obr. 45) co se týče průběhů, kromě AT5, BT2 jsou hodnoty pevnosti SP v tahu klesající se vzdáleností od vtoku. Maximální hodnoty se liší nepatrně, procentuální rozdíl maximální a minimální hodnoty je větší pro B (33,9 %), C velikost (36,7 %) vzrůstá stejně jako u PE kruh a PE čtverec (viz obr. 46). Pro pozici 3 a velikost A, C má pevnost v tahu víceméně lineární charakter. Pozice 8 je nejnižší pro 90% kombinací. Přestože extrémny leží jinde, dá se s jistotou říci, že vzdálenost od vtoku zde má podstatný vliv na mechanické vlastnosti SP. Pozice 9 je až na pár výjimek vyšší než ostatní kombinace, což značí, že tvar zde má vyšší váhu, než např. pro kruh, který nemá ostré hrany a neklade tak velký odpor proti toku taveniny. Maximální hodnota SP v tahu pro tvar čtverec materiál ABS je: **39,8 MPa**, minimální hodnota: **24,8 MPa**. (viz. tab. 20)



Obr. 45 : Vliv zvolených faktorů na pevnost studeného spoje [ABS-čtverec (A,B,C)].



Obr. 46 : Grafické vyjádření minimálních a maximálních hodnot pro čtverec - ABS.

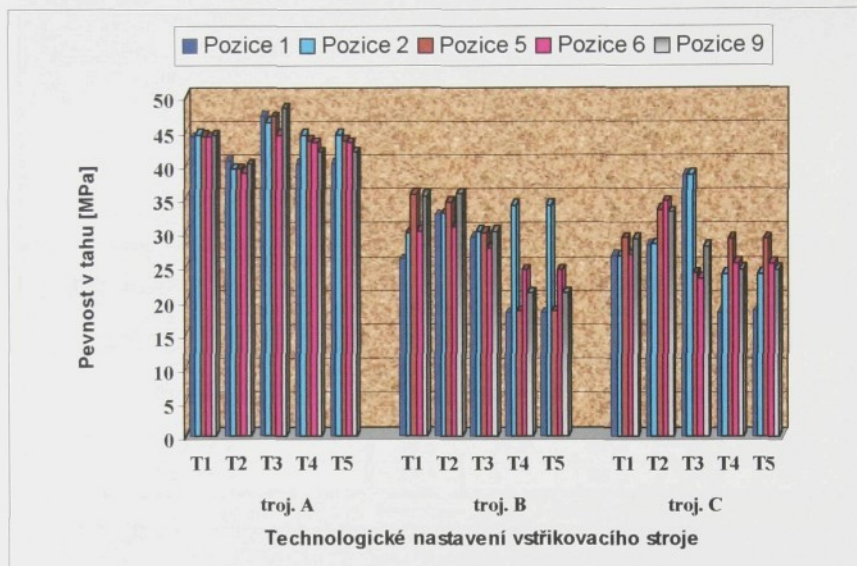
Tab. 21 : Tabulka hodnot pro trojúhelník (A,B,C) materiál ABS.

Tvar a velikost kovových vložek		Technologické nastavení stroje (T_f [°C] , T_r [°C] , p_{vst} [MPa])				
trojúhelník A		220/50/9	240/50/9	240/50/11	240/60/9	260/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 1		44,1	40,6	47,1	40,1	40,1
Pozice 2		44,3	39,3	46,2	44,3	44,3
Pozice 5		44,2	39,3	46,9	43,5	43,5
Pozice 6		44,1	38,8	44,4	43,2	43,2
Pozice 9		44,2	40,0	48,3	41,8	41,8
Maximum: 47,1 Minimum: 38,8 Průměr: 42,9						
trojúhelník B		220/50/9	240/50/9	240/50/11	240/60/9	260/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 1		26,0	32,5	29,2	18,1	18,1
Pozice 2		29,8	32,7	30,2	34,0	34,0
Pozice 5		35,5	34,4	30,0	18,4	18,4
Pozice 6		30,1	30,7	27,7	24,5	24,5
Pozice 9		35,4	35,7	30,2	21,0	21,0
Maximum: 35,5 Minimum: 18,1 Průměr: 26,8						
trojúhelník C		220/50/9	240/50/9	240/50/11	240/60/9	260/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 1		26,6	28,1	38,5	18,3	18,4
Pozice 2		26,5	28,2	38,5	23,9	23,9
Pozice 5		29,2	33,3	24,0	29,1	29,1
Pozice 6		26,7	34,6	23,2	25,4	25,4
Pozice 9		29,1	33,0	28,0	24,5	24,5
Maximum: 38,5 Minimum: 18,3 Průměr: 28,4						

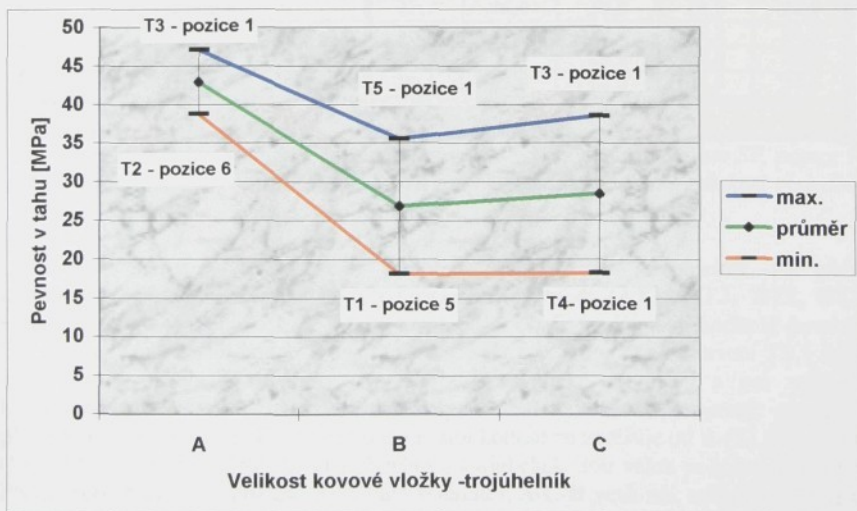
*Uvedené maximum, minimum se vztahuje jen pro pozice zatížené vlivem SP, pozice 9 (bez SP) je zde pro porovnání. Podrobnější analýza bude provedena v diskuzi výsledků.

Trojúhelník jako tvar u materiálu ABS výrazně ovlivnil jak velikost SP v tahu, tak i ostatní sledované závislosti (viz obr. 47). Většina kombinací nejdříve roste a poté klesá se vzdáleností, je to způsobeno rozdělením proudu čela taveniny při obtékání vrcholu trojúhelníku, který je směřován jako klín proti pohybu taveniny. Pro velikost **A**, **B** je to spíše v oblasti **T1-T3**, pro velikost **C** pak **T3-T5**. Hodnoty pevnosti SP v tahu jsou nižší než pro velikost **A**. Pozice 6 v mnoha případech svými hodnotami převyšuje pozici 9, což je dost neobvyklé. Pozice 9 je referenční hodnota a nezatížená SP, proto mechanické hodnoty této pozice by měly být vyšší než pozice zatížené SP. (viz. diskuse výsledku kap.5) Minimální hodnoty pro **B**, **C** velikost jsou přibližně shodné, procentuální rozdíl se zvětšuje (17,7 %, 49 %, 52 %) směrem k **C** velikosti (viz. obr. 48). Maximální hodnota je ve velikosti **A**. To znamená, že se zvětšuje podíl vlivu tvaru a materiálu na SP a podporuje logický úsudek větší pevnosti při obtékání kovových

vložek menších velikostí, při srovnání se semikrystalickým PE, nebo houževnatým PS, kde ve většině případů tomu bylo naopak. Maximální hodnota SP v tahu pro tvar trojúhelník materiál ABS je: **47,1 MPa**, minimální hodnota: **18,1 MPa**. (viz. tab. 21)



Obr. 47 :Vliv zvolených faktorů na pevnost studeného spoje [ABS-troj. (A,B,C)]



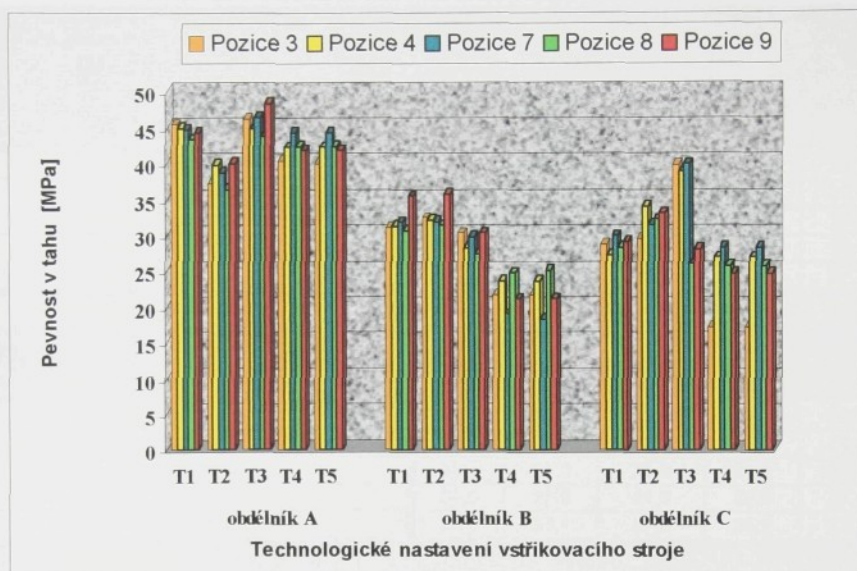
Obr. 48 : Grafické vyjádření minimálních a maximálních hodnot pro trojúhelník - ABS.

Tab. 22 : Tabulka hodnot pro obdélník (A,B,C) materiál ABS.

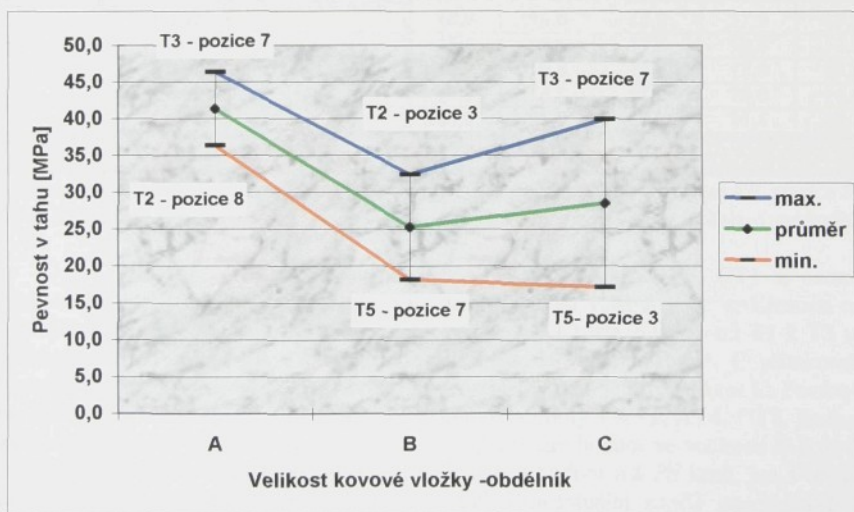
Tvar a velikost kovových vložek		Technologické nastavení stroje (T_1 [°C], T_r [°C], p_{vst} [MPa])				
obdélník A		220/50/9	240/50/9	240/50/11	240/60/9	260/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 3		45,4	37,2	46,1	40,4	40,0
Pozice 4		44,9	39,7	44,8	42,2	42,2
Pozice 7		44,7	38,6	46,3	44,2	44,2
Pozice 8		43,3	36,3	43,7	42,3	42,3
Pozice 9		44,2	40,0	48,3	41,8	41,8
Maximum: 46,3		Minimum: 36,3		Průměr: 41,3		
obdélník B		220/50/9	240/50/9	240/50/11	240/60/9	260/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 3		31,0	32,4	30,2	21,6	21,6
Pozice 4		31,3	32,1	28,2	23,6	23,6
Pozice 7		31,7	31,9	29,7	18,9	18,2
Pozice 8		30,5	31,3	27,4	24,7	25,0
Pozice 9		35,4	35,7	30,2	21,0	21,0
Maximum: 32,4		Minimum: 18,2		Průměr: 25,3		
obdélník C		220/50/9	240/50/9	240/50/11	240/60/9	260/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 3		28,7	29,6	39,8	17,2	17,2
Pozice 4		27,2	34,0	38,8	26,9	26,9
Pozice 7		29,8	31,4	39,8	28,2	28,2
Pozice 8		28,3	32,1	25,9	25,6	25,6
Pozice 9		29,1	33,0	28,0	24,5	24,5
Maximum: 39,8		Minimum: 17,2		Průměr: 28,5		

Uvedené maximum, minimum se vztahuje jen pro pozice zatížené vlivem SP, pozice 9 (bez SP) je zde pro porovnání. Podrobnější analýza bude provedena v diskusi výsledků.

Obdélník u ABS má velmi podobné průběhy, jako trojúhelník, ale počet kombinací vyhovujících zvoleným předpokladům je vyšší (AT1, AT3, BT2, BT3, CT1).(viz. obr. 49) Velikost SP v tahu klesá od A do C v minimální hodnotě pevnosti SP v tahu, v maximální hodnotě v pořadí A, C, B. Technologické nastavení T3 v A, C zaznamenalo maximální hodnoty, pro T5 technologické nastavení a pro velikosti kovových vložek B, C minimální hodnoty. Dosti výrazně se projevuje pozice 7 především ve velikosti A, C. Procentuální rozdíl hodnot se zvětšuje od A (21,6 %) do C (57 %) (viz. obr. 50). Průběhy pro obdélník i trojúhelník jsou velmi podobné a to i pro PS materiál, rozdíl je v poklesu SP v tahu směrem k A-C-B velikosti, zatímco u PS je to růst A-B-C. Maximální hodnota SP v tahu pro tvar obdélník materiál ABS je: 46,3 MPa, minimální hodnota: 17,2 MPa. (viz. tab. 22)



Obr. 49 :Vliv zvolených faktorů na pevnost studeného spoje [ABS-obdélník (A,B,C)].



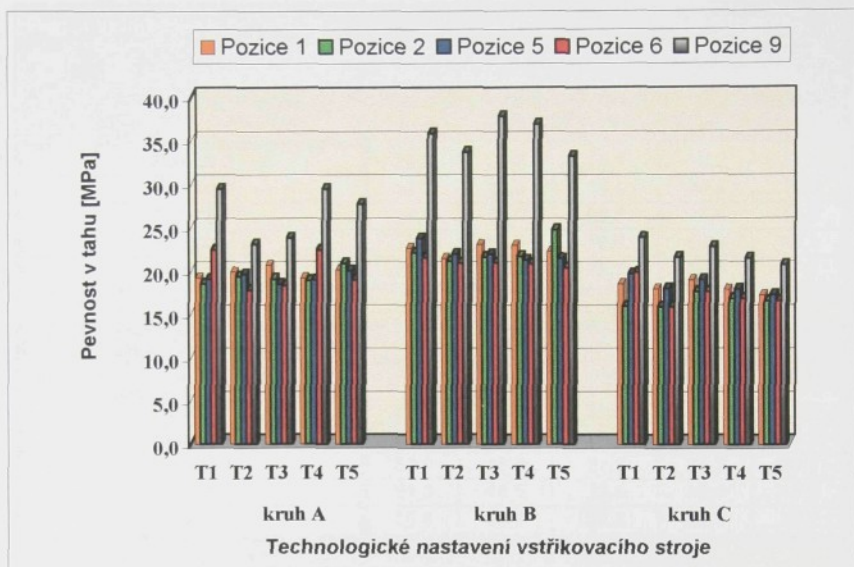
Obr. 50 : Grafické vyjádření minimálních a maximálních hodnot pro obdélník – ABS.

Tab. 23 : Tabulka hodnot pro kruh (A,B,C) materiál PA.

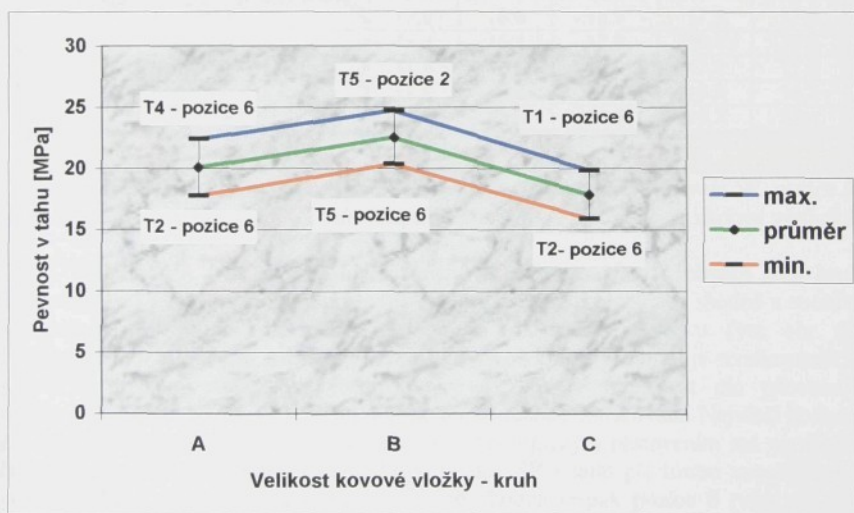
Tvar a velikost kovových vložek	Technologické nastavení stroje (T_i [°C], T_r [°C], p_{vst} [MPa])				
kruh A	240/50/9	260/50/9	260/50/11	260/60/9	280/50/9
Vzdálenost od vtoku	Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 1	19,2	19,9	20,7	19,2	20,1
Pozice 2	18,5	19,3	19,0	18,8	20,8
Pozice 5	19,0	19,6	18,5	18,9	20,0
Pozice 6	22,4	17,8	18,3	22,4	19,0
Pozice 9	29,4	23,0	23,7	29,4	27,7
Maximum: 22,4 Minimum: 17,8 Průměr: 20,1					
kruh B	240/50/9	260/50/9	260/50/11	260/60/9	280/50/9
Vzdálenost od vtoku	Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 1	22,6	21,5	23,0	23,0	22,2
Pozice 2	22,1	21,1	21,6	21,7	24,7
Pozice 5	23,7	21,9	21,9	21,2	21,4
Pozice 6	21,5	20,9	21,0	20,8	20,4
Pozice 9	35,8	33,7	37,8	36,9	33,2
Maximum: 24,7 Minimum: 20,4 Průměr: 22,5					
kruh C	240/50/9	260/50/9	260/50/11	260/60/9	280/50/9
Vzdálenost od vtoku	Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 1	18,5	18,0	18,9	17,9	17,2
Pozice 2	15,9	15,9	17,6	16,8	16,5
Pozice 5	19,6	18,0	18,9	17,9	17,2
Pozice 6	19,8	15,9	17,6	16,8	16,5
Pozice 9	23,8	21,5	22,7	21,4	20,7
Maximum: 19,8 Minimum: 15,9 Průměr: 17,8					

*Uvedené maximum, minimum se vztahuje jen pro pozice zatížené vlivem SP, pozice 9 (bez SP) je zde pro porovnání. Podrobnější analýza bude provedena v diskusi výsledků

Pro PA tvar kruh, kromě kombinací AT1, AT4, AT5, BT5, CT1 si ostatní zachovávají předpokládaný průběh poklesu mechanických vlastností se vzdáleností od ústí vtoku (viz. obr. 51). Pevnost SP v tahu pro pozici 1 roste směrem od T1 k T3 ve všech tvarech. Pevnost SP v tahu pro pozici 5 má ve velikostech B, C přímkovou klesající tendenci. Výrazný pokles hodnot pevnosti SP v tahu je pro velikost C. Pozice 6 nejvzdálenější kruh od ústí vtoku, nabývá extrémní hodnoty v AT1, AT4, CT1, jinak si zachovává nejnižší hodnotu. Pozice 9 má výrazný vzestup hodnot ve velikosti B a to až o 40 %. Podobný průběh maximálních a minimálních hodnot má PS kruh, jen s větším procentuálním rozdílem hodnot. (viz. obr. 52) Procentuální rozdíl maximálních a minimálních hodnot má jen malé výkyvy (A = 20,6 %, B = 17,6 %, C = 20 %) Maximální hodnota SP v tahu pro tvar kruh materiál PA je: 24,7 MPa, minimální hodnota: 15,9 MPa (viz. tab. 23).



Obr. 51 : Vliv zvolených faktorů na pevnost studeného spoje [PA-kruh (A,B,C)].



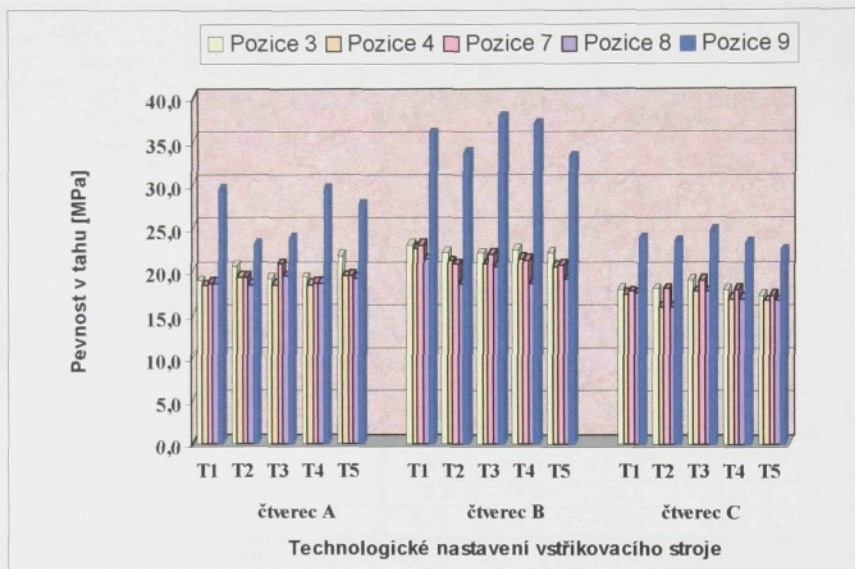
Obr. 52 : Grafické vyjádření minimálních a maximálních hodnot pro kruh – PA.

Tab. 24 : Tabulka hodnot pro čtverec (A,B,C) materiál PA.

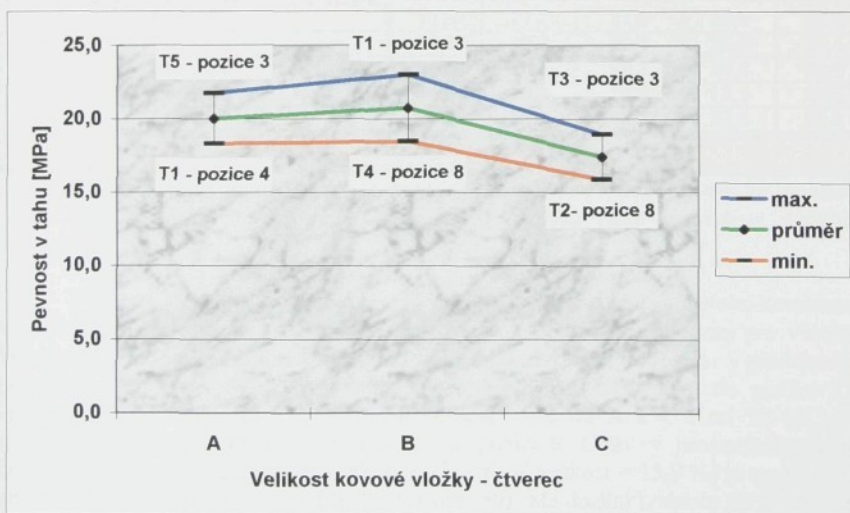
Tvar a velikost kovových vložek		Technologické nastavení stroje (T_i [°C], T_r [°C] , p_{vst} [MPa])				
čtverec A		240/50/9	260/50/9	260/50/11	260/60/9	280/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 3		18,8	20,5	19,1	19,2	21,7
Pozice 4		18,3	19,3	18,4	18,4	19,3
Pozice 7		18,6	19,3	20,8	18,6	19,4
Pozice 8		18,6	18,4	19,4	18,6	19,1
Pozice 9		29,4	23,0	23,7	29,4	27,7
Maximum: 21,7		Minimum: 18,3 Průměr: 20,0				
čtverec B		240/50/9	260/50/9	260/50/11	260/60/9	280/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 3		23,0	22,1	22,0	22,5	22,2
Pozice 4		22,7	21,1	20,9	21,4	20,5
Pozice 7		23,0	20,8	21,9	21,2	20,7
Pozice 8		21,3	18,5	20,5	18,5	19,0
Pozice 9		35,8	33,7	37,8	36,9	33,2
Maximum: 23,0		Minimum: 18,5 Průměr: 20,7				
čtverec C		240/50/9	260/50/9	260/50/11	260/60/9	280/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 3		17,9	18,0	18,9	17,9	17,2
Pozice 4		17,4	15,9	17,6	16,8	16,5
Pozice 7		17,6	18,0	18,9	17,9	17,2
Pozice 8		17,4	15,9	17,6	16,8	16,5
Pozice 9		23,8	23,3	24,6	23,2	22,4
Maximum: 18,9		Minimum: 15,9 Průměr: 17,4				

Uvedené maximum, minimum se vztahuje jen pro pozice zatížené vlivem SP, pozice 9 (bez SP) je zde pro porovnání. Podrobnější analýza bude provedena v diskusi výsledků.

Materiál PA tvar čtverec má identické průběhy maxima i minima jako kruh. Vzhledem ke kruhu i ostatním tvarům má čtverec všechny kombinace shodné a souhlasí se zmiňovaným předpokladem klesající pevnosti SP v tahu od vtoku. (viz. obr. 53) Příčinu vidím v kombinaci materiálu a tvaru kovové vložky. Materiál je semikrystalický s 30 % podílem skleněných vláken, které se budou orientovat dle působícího smykového napětí, viskozity a technologických podmínek vstřikování. Největší hodnoty ak_1 budou stále v B velikosti, která spolu s technologickým nastavením má maximální hodnotu pevnosti SP v tahu. Nejvhodnější pozice SP v tahu při tomto uspořádání je pozice 3 T1 a to pro všechny tvary, nejméně vhodná je pak pozice 8 (viz. obr. 54) Procentuální rozdíl hodnot je o něco nižší než u kruhu, ale s podobným vzrůstem v B velikosti. (A = 15,8 %, B = 19,7 %, C = 16,3 %). Maximální hodnota SP v tahu pro tvar čtverec materiál PA je: 23 MPa, minimální hodnota: 15,9 MPa (viz. tab. 24).



Obr. 53 : Vliv zvolených faktorů na pevnost studeného spoje [PA-čtverec (A,B,C)].



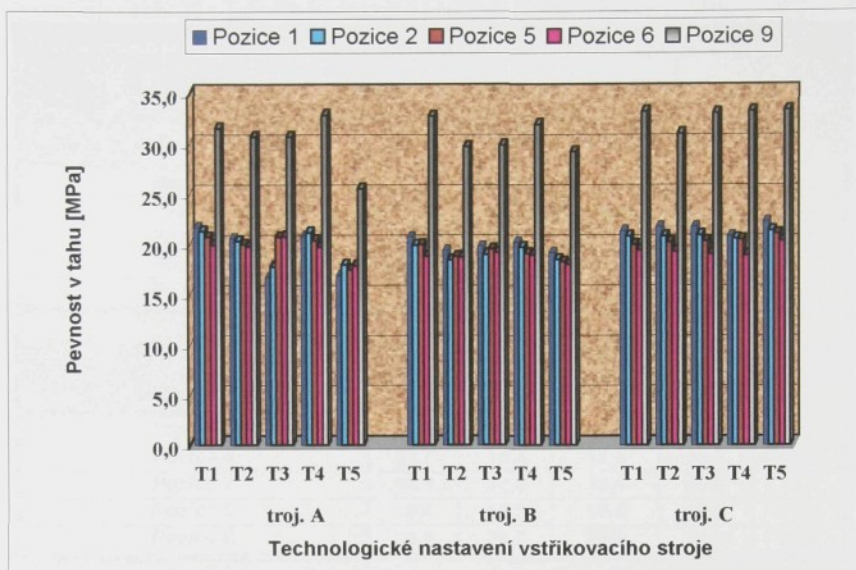
Obr. 54 : Grafické vyjádření minimálních a maximálních hodnot pro čtverec – PA.

Tab. 25 : Tabulka hodnot pro trojúhelník (A,B,C) materiál PA.

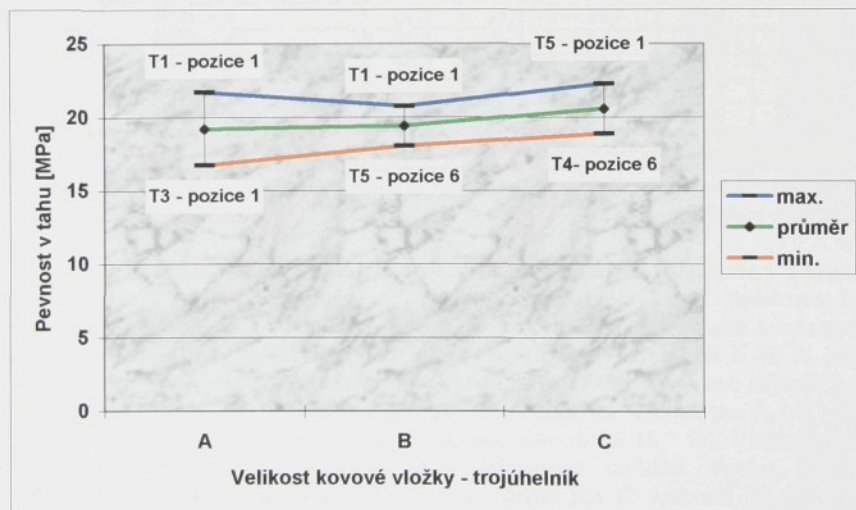
Tvar a velikost kovových vložek	Technologické nastavení stroje (T_i [°C], T_r [°C], p_{vst} [MPa])				
trojúhelník A	240/50/9	260/50/9	260/50/11	260/60/9	280/50/9
Vzdálenost od vtoku	Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 1	21,7	20,6	16,7	20,9	16,9
Pozice 2	21,3	20,3	17,8	21,2	18,0
Pozice 5	20,7	20,0	20,7	20,4	17,5
Pozice 6	19,9	19,8	20,8	19,7	17,9
Pozice 9	31,6	30,7	30,7	32,9	25,6
Maximum: 21,7 Minimum: 16,7 Průměr: 19,2					
trojúhelník B	240/50/9	260/50/9	260/50/11	260/60/9	280/50/9
Vzdálenost od vtoku	Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 1	20,8	19,4	19,8	20,2	19,2
Pozice 2	19,9	18,4	19,0	19,7	18,5
Pozice 5	20,0	18,8	19,5	19,1	18,2
Pozice 6	18,8	18,8	19,2	18,9	18,0
Pozice 9	32,7	29,7	29,8	31,9	29,2
Maximum: 20,8 Minimum: 18,0 Průměr: 19,4					
trojúhelník C	240/50/9	260/50/9	260/50/11	260/60/9	280/50/9
Vzdálenost od vtoku	Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 1	21,4	21,8	21,8	20,9	22,3
Pozice 2	20,8	20,8	20,9	20,6	21,4
Pozice 5	20,0	20,2	20,3	20,5	21,1
Pozice 6	19,4	19,3	19,0	18,9	20,3
Pozice 9	33,2	31,0	33,0	33,3	33,3
Maximum: 22,3 Minimum: 18,9 Průměr: 20,6					

*Uvedené maximum, minimum se vztahuje jen pro pozice zatížené vlivem SP, pozice 9 (bez SP) je zde pro porovnání. Podrobnější analýza bude provedena v diskusi výsledků.

Tvar trojúhelník u PA kromě kombinací AT3, AT4, AT5 jsou ostatní kombinace tvarově shodně klesají se vzdáleností od ústí vtoku. Pozice 9 je výrazná pro všechny kombinace a převyšuje hodnoty pevnosti SP v tahu zhruba o 40% jako v předchozích případech (viz. obr. 56). Tvar posunul maxima pevnosti SP v tahu do pozice 1 a technologického nastavení T1. Minimum lineárně roste od A k C (od T3 až k T5 s rostoucí teplotou taveniny) a ustálilo se na pozici 6. Celkový procentuální rozdíl hodnot (A velikost = 22,9 %, B velikost = 13,1 %, C velikost = 15,9 %) je menší než u amorfních zkoušených plastů (ABS, PS viz obr. 56). Maximální hodnota SP v tahu pro tvar trojúhelník materiál PA je: **22,3 MPa**, minimální hodnota: **16,7 MPa**. (viz. tab. 25)



Obr. 55 : Vliv zvolených faktorů na pevnost studeného spoje [PA-trojúhelník (A,B,C)].



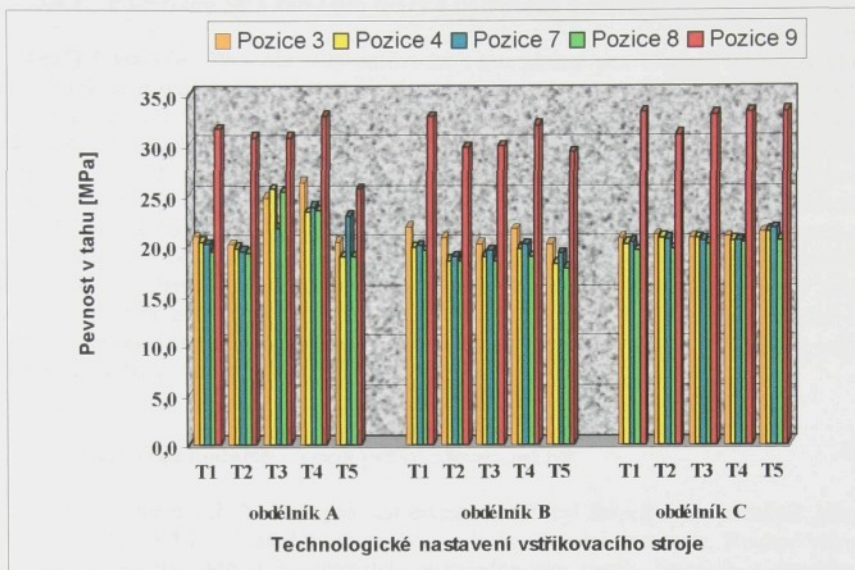
Obr. 56 : Grafické vyjádření minimálních a maximálních hodnot pro trojúhelník – PA.

Tab. 26 : Tabulka hodnot pro obdélník (A,B,C) materiál ABS.

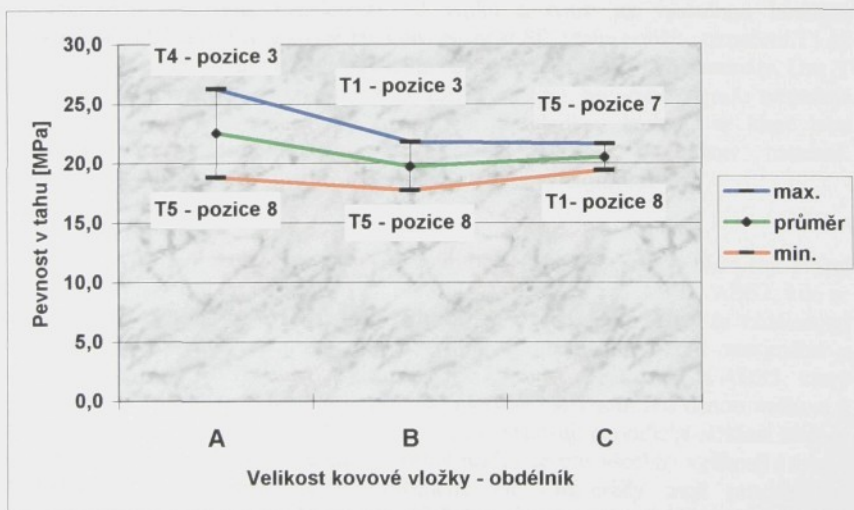
Tvar a velikost kovových vložek		Technologické nastavení stroje (T_i [°C] , T_r [°C] , p_{vst} [MPa])				
obdélník A		240/50/9	260/50/9	260/50/11	260/60/9	280/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 3		20,8	20,0	24,7	26,3	20,2
Pozice 4		20,2	19,7	25,5	23,2	18,8
Pozice 7		20,0	19,4	21,7	23,8	22,9
Pozice 8		19,3	19,2	25,2	23,4	18,8
Pozice 9		31,6	30,7	30,7	32,9	25,6
Maximum: 26,3 Minimum: 18,8 Průměr: 22,5						
obdélník B		240/50/9	260/50/9	260/50/11	260/60/9	280/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 3		21,8	20,7	20,1	21,6	20,1
Pozice 4		19,7	18,4	18,9	19,7	18,2
Pozice 7		19,9	18,8	19,4	20,0	19,1
Pozice 8		19,4	18,3	18,4	18,8	17,7
Pozice 9		32,7	29,7	29,8	31,9	29,2
Maximum: 21,8 Minimum: 17,7 Průměr: 19,7						
obdélník C		240/50/9	260/50/9	260/50/11	260/60/9	280/50/9
Vzdálenost od vtoku		Pevnost v tahu [MPa]				
Pozice 3		20,7	21,0	20,7	20,8	21,2
Pozice 4		20,1	20,7	20,6	20,5	21,3
Pozice 7		20,3	20,6	20,4	20,4	21,6
Pozice 8		19,4	19,6	20,1	20,2	20,4
Pozice 9		33,2	31,0	33,0	33,3	33,3
Maximum: 21,6 Minimum: 19,4 Průměr: 20,5						

Uvedené maximum, minimum se vztahuje jen pro pozice zatížené vlivem SP, pozice 9 (bez SP) je zde pro porovnání. Podrobnější analýza bude provedena v diskusi výsledků.

Tvar obdélník u materiálu PA je podobně homogenní jako ostatní tvary a kromě dvou kombinací AT3, CT5 jsou všechny ostatní závislosti shodné, tj. vzdálenost od vtoku snižuje pevnost SP v tahu (viz. obr. 57). Projevil se zde vliv tvaru a orientace plniva, ve snížení mechanických hodnot proti nezatíženému vzorku až o 40 % jako v předchozích případech. Maximální hodnota klesá od A-B-C a je celkově nejvyšší pro PA materiál (viz. obr. 58). Pozice 3 si drží maximální hodnotu, a to jak pro B, tak i pro C velikost. (velikost C má také minimální procentuální rozdíl 10,2 %). Většina pozic nehledě na technologii si zachovává spíše přímkovou závislost. Pozice 9 jako v předchozích případech je výrazně vyšší a to hlavně pro C velikost. Při srovnání s ostatními materiály je zřetelně vidět, že krystalický PA, ačkoliv má výraznou anizotropii vlastností způsobenou orientací plniva, má mnohem užší rozptyl než ostatní plasty (viz. obr. 58). Maximální hodnota SP v tahu pro tvar obdélník materiál PA je: 26,3 MPa, minimální hodnota: 17,7 MPa (viz. tab. 26).



Obr. 57 : Vliv zvolených faktorů na pevnost studeného spoje [PA-obdélník (A,B,C)].



Obr. 58 : Grafické vyjádření minimálních a maximálních hodnot pro obdélník – PA.

3.4.1 Porovnání SP v tahu pro tvary a používané materiály.

Grafy (viz. obr. 59 – obr. 62) porovnávají komplexně pro všechny materiály vliv technologického nastavení, vzdálenosti od vtoku a tvaru na výslednou hodnotu pevnosti SP při zkoušce tahem. Na ose **X** je záměrně použito označení T1 až T5 z důvodu nekompatibility technologického nastavení pro jednotlivé materiály. Osa **Y** nezačíná na hodnotě 0 MPa, ale z důvodu lepšího rozlišení hodnot a průběhů pro jednotlivé materiály a tvary na hodnotě 10 MPa. Grafy podávají rychlou a celkem čitelnou odpověď na otázku, který materiál je vhodný pro zadaný tvar, technologické nastavení a barevné rozlišení poskytuje představu o vzdálenosti od vtoku a používaném materiálu. Systém je vytvořen tak, že k jednotlivým barvám je připojen materiál a odstíny této barvy odpovídají poloze na výstřiku (např. ABS je modrý, ABS1 je tmavomodrý a ABS6 je bleděmodrý atd.) Označení ABS1, PS5, PE8 znamená název materiálu a jeho poloha na výstřiku dle tab. 3.

3.5 Naměřené hodnoty a grafy pro houževnatost SP

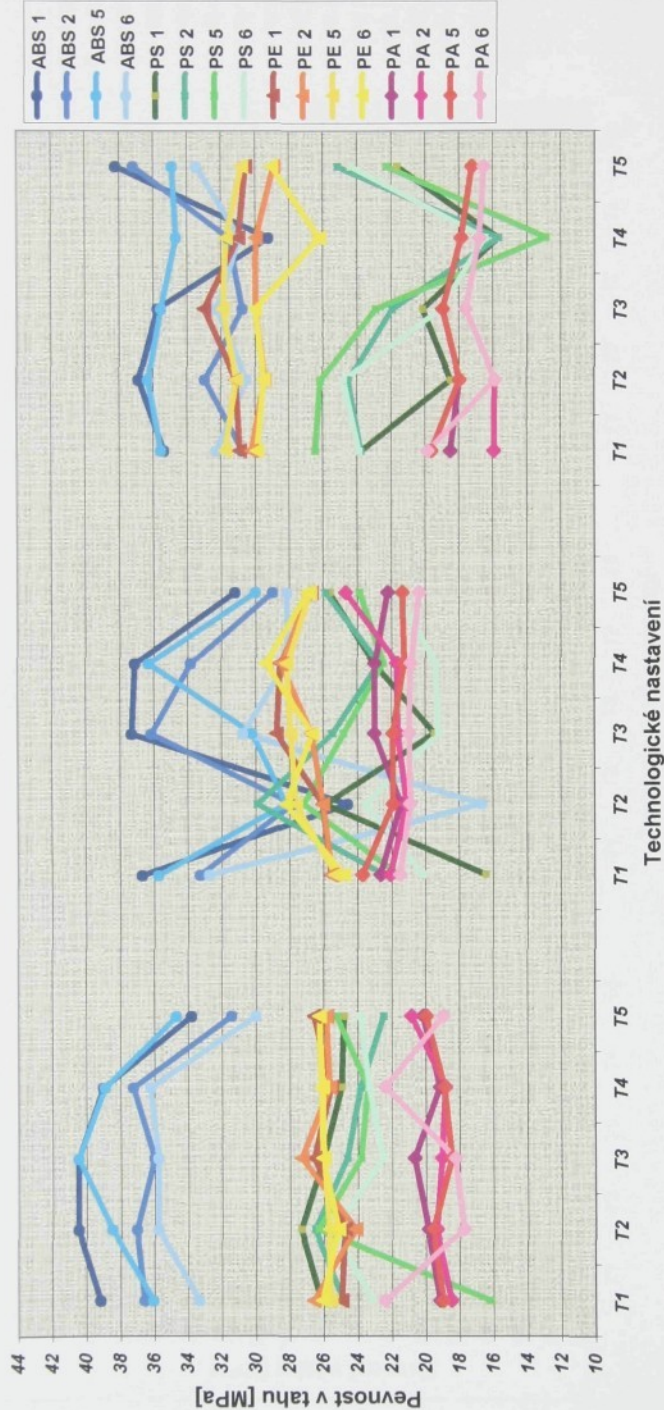
Rozbor naměřených hodnot pro houževnatost SP byl koncipován podobně jako předchozí kap. 3.4.1, se zaměřením na tvar a technologické nastavení. Rozbor vlivu vzdálenosti od ústí vtoku je proveden prostřednictvím grafů, které jsou uvedeny v příloze.

Grafy (viz. obr. 63 – obr. 70) porovnávají komplexně pro všechny materiály vliv technologického nastavení, vzdálenosti od vtoku a tvaru na výslednou hodnotu houževnatosti SP. Na ose **X** je stejně jako pro pevnost SP v tahu použito označení T1 až T5 z důvodu nekompatibility technologického nastavení pro jednotlivé materiály. Osa **Y** je označena jako vrubová, nebo rázová houževnatost. Po souhrnném grafu následuje stránka s maximálními a minimálními hodnotami a tabulkou hodnot, ve které jsou zvýrazněny maximální hodnoty barvou charakteristickou pro daný materiál. V následujících odstavcích je stručný komentář k jednotlivým grafům.

★ *A velikost – kruh*

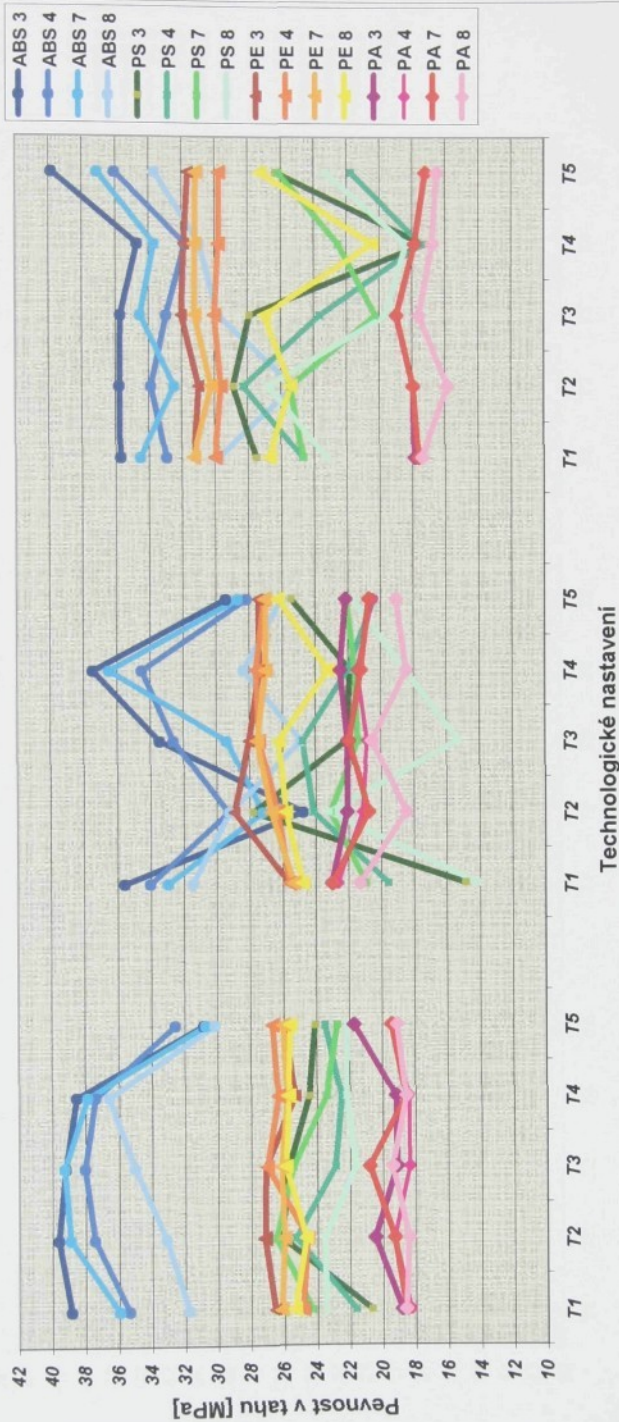
Materiál ABS má hodnoty v horní části grafu a několikanásobně převyšují svými hodnotami všechny ostatní materiály (viz obr. 63). Kromě T3 pro ABS1, ABS2, kde se nachází lokální extrém, je závislost naměřených hodnot klesající ve smyslu vzdálenosti od vtoku. Procentuální rozdíl hodnot je 57 % (procentuální rozdíl maximální a minimální hodnoty). ABS1 kopíruje průběh ABS2, podobně je tomu u ABS5, který kopíruje ABS6. Maximální hodnota je zároveň globální maximum pro danou velikost a materiály (max. = 24,4 kJ/m², viz. tab. 27). PS i PE vykazují periodické střídání hodnot houževnatosti, které jak dále uvidíme, je velmi rozšířené pro všechny velikosti i tvary, s charakteristickým trojúhelníkovým průběhem. Oba materiály mají procentuální rozdíly maxima a minima (PS 48 %, PE 55 %) opticky vysoké vzhledem k velikosti hodnot. PS1, PS5 mají proti ABS růstové trendy, to znamená, že převládajícím faktorem bude technologické nastavení. PS6, PS2 mají zmiňované růstové a klesající trendy, vzájemně jsou komplementární tj. pro stejné technologické nastavení jeden vykazuje lokální extrém a druhý opačnou hodnotu.

Porovnání vlivu materiálu a zvolených faktorů [kruh (A,B,C)-ABS,PS,PE,PA] na pevnost studeného spoje



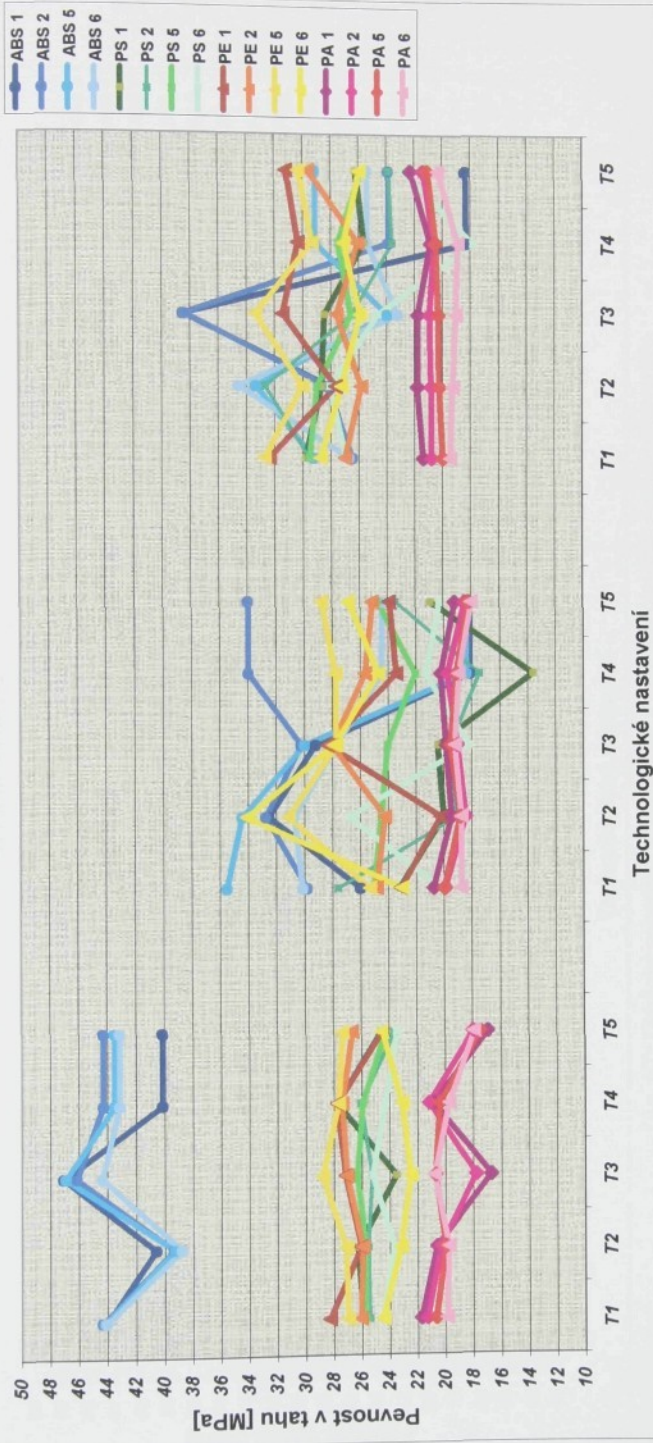
Obr. 59 : Grafické zobrazení závislosti SP v tahu pro kruh a použité materiály.

Porovnání vlivu materiálu a zvolených faktorů [čtverec (A,B,C)-ABS,PS,PE,PA] na pevnost studeného spoje



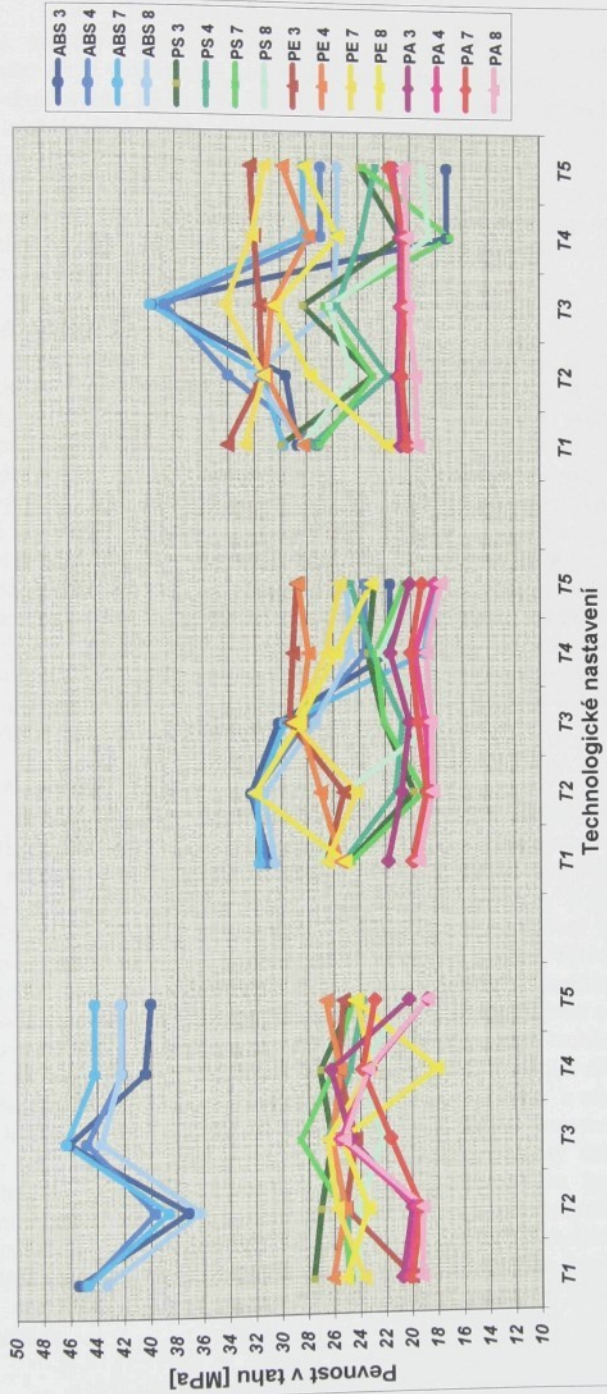
Obr. 60 : Grafické zobrazení závislosti SP v tahu pro čtverec a použité materiály.

Porovnání vlivu materiálu a zvolených faktorů [trojúhelník (A,B,C)-ABS,PS,PE,PA] na pevnost studeného spoje



Obr. 61 : Grafické zobrazení závislosti SP v tahu pro trojúhelník a použité materiály.

Porovnání vlivu materiálu a zvolených faktorů [obdélník (A,B,C)-ABS,PS,PE,PA] na pevnost studeného spoje



Obr. 62 : Grafické zobrazení závislosti SP v tahu pro obdélník a použité materiály.

PS6 má průběhy hodnot převyšující jak PE, tak PA a potvrzuje se předpoklad majoritního vlivu technologie pro danou kombinaci velikosti, materiálu a tvaru. PE1, PE5 kopírují průběh PS6 stejně jako PE2, PE6 kopírují svými průběhy PS2. PE1 nabývá maximálních hodnot houževnatosti a PE2 minimálních hodnot. PA hodnoty leží ve spodní části grafu a procentuální rozdíl hodnot je nejmenší ze všech materiálů 44 % (viz obr. 63). PA6, PA5 rostou s rostoucí teplotou taveniny až do T3, v T4 jsou komplementární. Zvýšená hodnota vstřikovacího tlaku a pozice na výstřiku ovlivnila orientaci skleněných vláken a z toho resultují předchozí závislosti. PA1 má shodný průběh s PA 6 s růstem hodnot houževnatosti SP.

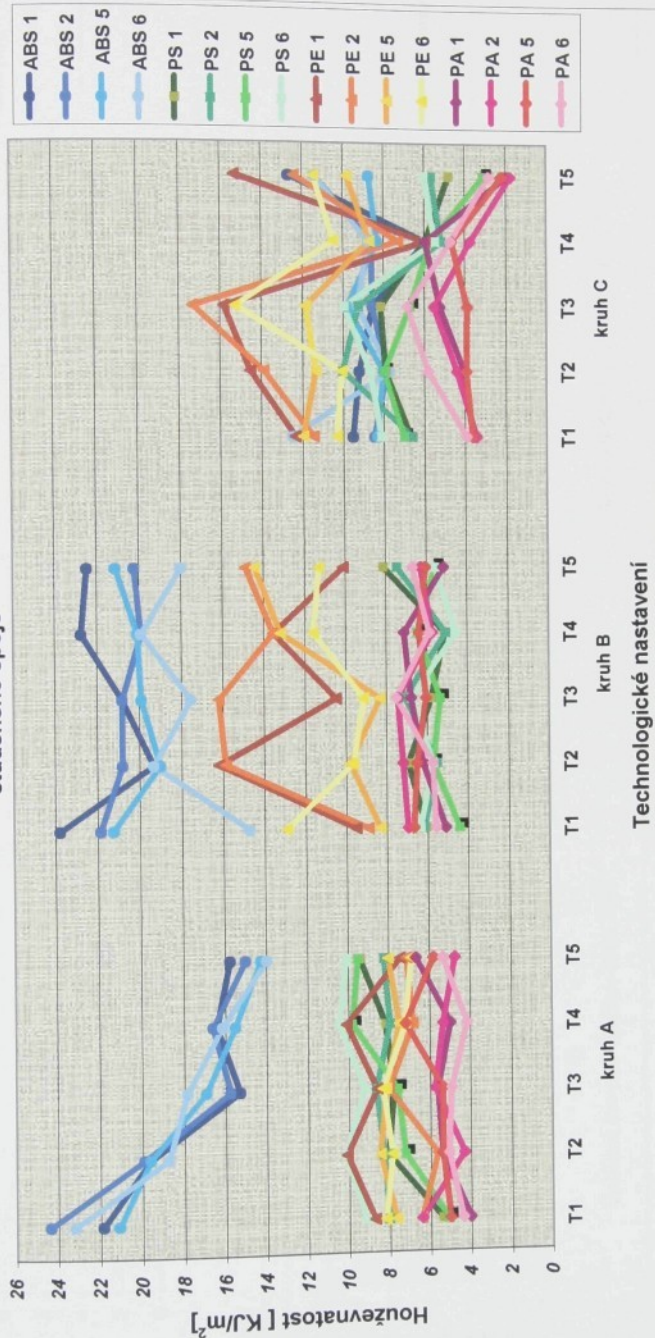
★ *B velikost – kruh*

Má velmi výrazně odděleny průběhy pro všechny materiály. Procentuální rozdíly maximálních a minimálních hodnot jsou vyšší pro PA (68 %), ABS (62 %) zbylé dva materiály se pohybují kolem 50% (PS – 52 %, PE – 51 %). U ABS ve velikosti B má každý průběh jiný trend, přesto lze vysledovat určitou sekvenci: ABS1, ABS6, která potvrzuje pokles hodnot houževnatosti se vzdáleností. Materiál PE má všeobecně stoupavý trend a to především z T3 do T4. PE2 průběh má výkmit v T3. PE1, PE5 kopírují do T4 své průběhy, zatímco PE6, PE2 jsou vzájemně komplementární. PA5 je skoro přímkový. PA1 má pozvolný nárůst až do T4. PA6 a PA2 splývají od T3 do T5. Pro dané nastavení a tvar PA materiálu je spíše dominantní technologické nastavení. PS má charakteristický trojúhelníkový průběh se střídáním lokálních minim a maxim, ačkoliv je to houževnatý materiál jeho citlivost na jakékoliv vruby ho přesunula k nižším hodnotám houževnatosti. Zlomovými body technologického nastavení jsou pro většinu materiálů T3, T4. Maximální hodnota pro **B velikost – kruh** je ABS1 v T1 = 23,8 kJ/m² a minimální je PS5 v T1 = 4,4 kJ/m².

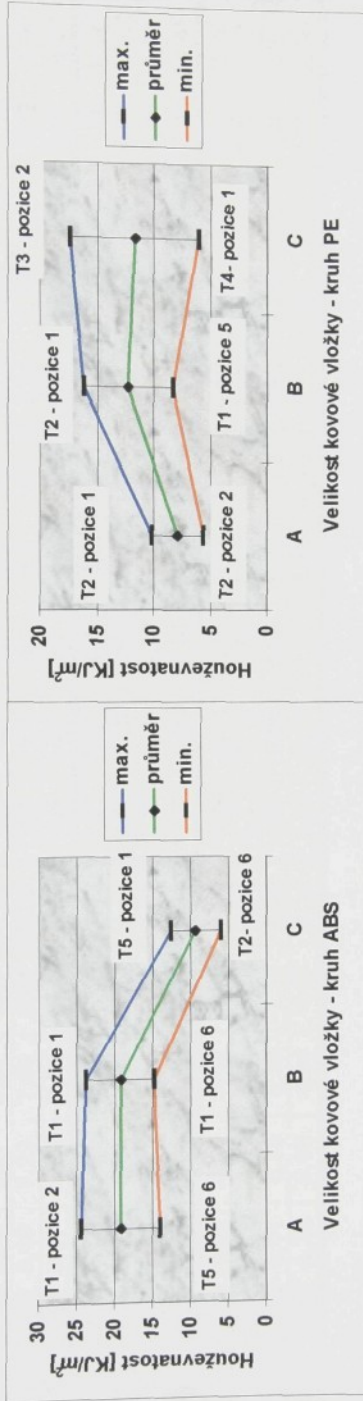
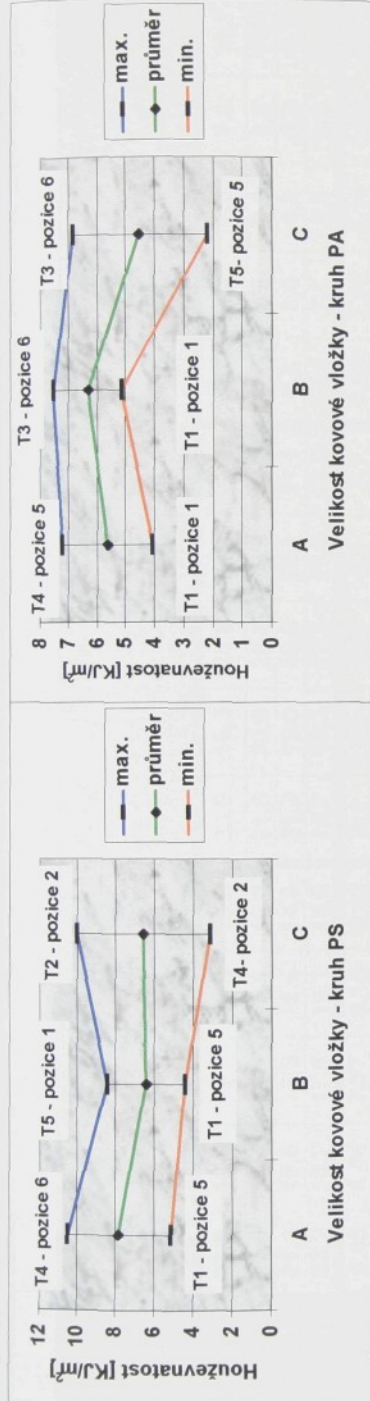
★ *C velikost – kruh*

Pro všechny materiály jsou zlomovými body T3, T4, naplno se zde projevil vliv C velikosti. PS, PE mají velmi výrazné přechody právě ve zmiňovaných bodech a to v T3 lokální maxima a v T4 lokální minimum. Zvýšený vstřikovací tlak a zvýšená teplota taveniny podpořila vyšší hodnoty houževnatosti, zatímco zvýšená teplota formy způsobila pravý opak. PA má spíše rostoucí trend s rostoucí teplotou taveniny a následný pokles na T5. Hodnoty ABS poklesly velmi výrazně proti ostatním velikostem, což by vyhovovalo logickému úsudku o snížených mechanických hodnotách se zvýšenou velikostí kovových vložek. Průběhy jsou neuspořádané. Ani u jednoho z materiálů se vzdálenost od vtoku neprojevila, spíše technologické nastavení a velikost má majoritní vliv. Procentuální rozdíly hodnot se snížily: ABS 47 %, PE 34 %, PS 31 %, PA 26 %. PE2 v T3 má největší hodnoty 17,3 kJ/m² a minimální je PA5 v T5 = 2,2 kJ/m² (viz. tab. 27). Při porovnání minimálních hodnot jsou tendence spíše klesavé směrem k C velikosti. Pro ABS, PE se maximální hodnoty drží nejbližše vtoku a minimální ve vzdálenějších pozicích, tj. vliv vzdálenosti na houževnatost je zde potvrzen. Naproti tomu u PA jsou maximální hodnoty spíše ve vzdálenějších místech a to na pozicích 5, 6 a minimální na pozicích 1, 2. U PS materiálu je výrazný vliv především velikosti, která posunuje maximální hodnoty blíže ke vtoku (velikost A – pozice 6, velikost C – pozice 1), minimální hodnoty ponechává v oblastech vzdálenějších.

Porovnání vlivu materiálu a zvolených faktorů [kruh (A,B,C)-ABS,PS,PE,PA] na houževnatost studeného spoje



Obr. 63 : Grafické zobrazení závislosti houževnatosti SP pro kruh a použité materiály.



Obr. 64 : Rozptyly hodnot houževnatosti SP pro tvar kruh.

Tab. 27: Tabulka hodnot houževnatosti SP pro tvar kruh.

Kruh	VELIKOST A					VELIKOST B					VELIKOST C				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
	HOUŽEVNATOST [kJ/m ²]														
ABS 1	21,8	19,6	15,3	16,4	15,8	23,8	19,3	20,8	22,7	22,4	9,5	9,2	8,6	7,9	12,7
ABS 2	24,4	19,9	15,8	16,6	15,0	21,8	20,8	20,8	19,9	20,2	8,5	7,9	8,6	8,6	11,4
ABS 5	21,1	19,6	16,9	15,5	14,3	21,3	19,0	19,9	20,1	21,1	8,3	8,0	9,8	8,3	8,7
ABS 6	23,2	18,7	17,8	16,1	14,0	14,7	19,3	17,5	19,9	18,0	12,5	7,7	9,3	8,8	11,4
PS 1	5,40	8,06	7,77	8,18	9,42	6,1	6,9	5,8	5,1	8,1	6,66	7,92	8,16	5,95	4,81
PS 2	8,04	8,27	8,67	7,97	8,24	6,2	5,5	7,1	5,1	7,4	6,59	10,02	9,25	5,15	5,67
PS 5	5,10	7,22	7,60	9,81	9,52	4,4	5,7	5,3	6,5	5,6	7,01	7,99	6,73	5,67	3,09
PS 6	9,17	10,16	9,24	10,46	10,09	6,4	5,7	6,7	4,6	5,6	8,13	8,69	9,95	5,46	6,01
PE 1	8,74	10,11	8,62	10,11	7,43	9,51	10,28	10,48	13,56	10,11	12,36	14,52	15,80	5,95	15,31
PE 2	6,42	5,65	8,03	6,84	7,13	8,92	15,87	16,59	13,56	14,86	11,47	13,89	17,33	7,28	12,41
PE 5	7,67	8,47	8,18	7,51	8,03	8,32	9,81	8,32	13,20	14,42	11,98	11,34	11,85	8,70	9,81
PE 6	8,20	7,88	8,32	7,21	6,91	12,93	9,63	9,14	11,59	11,30	10,32	10,06	15,29	10,48	11,45
PA 1	4,03	5,40	5,62	4,99	6,66	5,10	6,21	6,79	7,11	5,15	3,60	4,04	5,24	5,95	2,97
PA 2	6,41	4,32	5,72	5,35	4,74	6,97	7,19	7,44	5,72	6,29	3,43	4,40	5,52	3,74	2,77
PA 5	5,01	5,36	5,38	7,19	5,80	6,67	6,50	6,05	6,38	6,05	3,62	3,94	3,87	4,66	2,21
PA 6	4,38	5,08	4,94	4,17	5,35	5,59	5,72	7,52	5,89	6,70	3,92	5,81	6,83	4,69	2,84

★ *A velikost - čtverec*

ABS vzhledem ke svým materiálovým vlastnostem je ve velikosti A i velikosti B pro všechny materiály v horní části grafu a vykazuje globální maxima (viz. obr. 65). Převládajícím rysem všech průběhů je klesavý trend do T3 a následným přechodem přes T4 do T5. I přes menší výkyvy hodnot je zde stále patrné seřazení průběhů podle vzdálenosti od vtoku (ABS3, ABS4, ABS7, ABS8). ABS4, ABS7 se navzájem kopírují s významnějšími zlomy pro T2, T3. Maximální hodnota je $22,3 \text{ kJ/m}^2$ a procentuální rozdíl hodnot je 35 %. (viz. obr. 66) PS, PE se prolínají a na spodní hodnoty navazují pak PA materiál. PE, PS mají typický a již zmiňovaný trojúhelníkový charakter, s poklesem hodnot v T3 pro PS3, PS7, PS8. Vliv vzdálenosti je zde minoritní (PS4, PS8, PS7, PS1) a procentuální rozdíl mezi maximální a minimální hodnotou je cca 50 %. PE průběhy jsou spíše lineární PE8, PE7. PE1 osciluje kolem předchozích dvou. Za povšimnutí stojí PE4 průběh, který má lokální extrém v T3, jenž převyšuje i většinu hodnot houževnatosti SP pro materiál PS. Procentuální rozdíl hodnot pro PE je i přes tuto abnormalitu poněkud malý 26%. PA8, PA7 se vzájemně kopírují až do T4. PA3 má spíše klesavý trend až do T5, zatímco PA4 má trend naopak rostoucí. Procentuální rozdíl hodnot je 36 %. Maximální hodnota pro velikost A – čtverec je ABS3 v T1 = $22,3 \text{ kJ/m}^2$, minimální hodnota je PA3 v T4 $4,5 \text{ kJ/m}^2$ (viz. tab. 28).

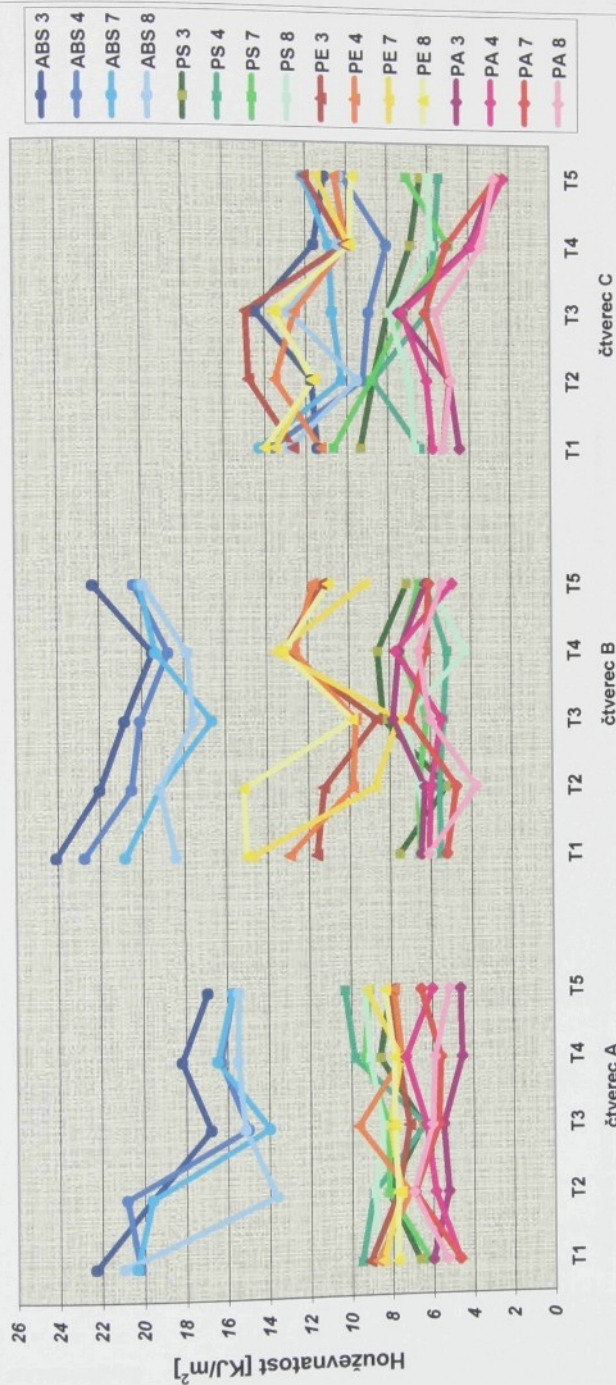
★ *B velikost – čtverec*

Stejně jako u kruhu došlo k oddělení ABS a PE od zbylých materiálů. ABS hodnoty jsou poměrně jasně čitelné s klesajícími průběhy jako pro A velikost – kruh. Vzdálenosti od ústí vtoku je rozhodujícím faktorem vzhledem k seřazení průběhů v následujícím pořadí ABS3, ABS4, ABS7, ABS8. Procentuální rozdíl hodnot houževnatosti je nižší než ve velikosti A (31 %). U PE jak ve velikosti B, tak i velikosti C se nejvíce projevilo nastavení T3, T4. Maximální hodnoty jsou pro PE8 ($15,1 \text{ kJ/m}^2$). Ostatní průběhy mají shodně lokální minimum pro T3 a lokální maximum v T4 nastavení. Procentuální rozdíl hodnot je skoro dvojnásobný oproti velikosti A, tj. cca 50%. U materiálu PS maximálních hodnot dosahuje PS3, který od T2 roste k T4. Ostatní průběhy hodnot (PS4, PS7, PS8) jsou do T3 nastavení víceméně lineární. PS8 v T4 klesá, zatímco PS7 v téže hodnotě roste. Procentuální rozdíl hodnot houževnatosti je 50%. PA materiál je ve stejné oblasti grafu jako PS ($4-8 \text{ kJ/m}^2$). PA3, PA8 od T2 mají parabolický charakter spojnice hodnot až do T5. Přes určité divergence lze říci, že vzdálenost od ústí vtoku se zde projevila. Procentuální rozdíl hodnot houževnatosti poněkud vzrostl na 52% (viz. obr. 66). Maximální hodnota pro velikost B čtverec je ABS3 v T1 = $24,1 \text{ kJ/m}^2$, minimální hodnota je PA8 v T2 = $3,8 \text{ kJ/m}^2$.

★ *C velikost – čtverec*

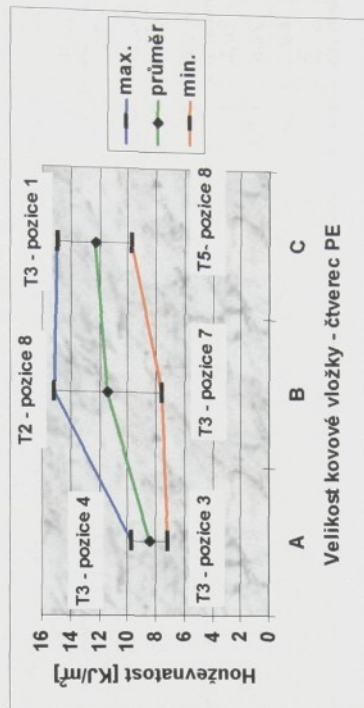
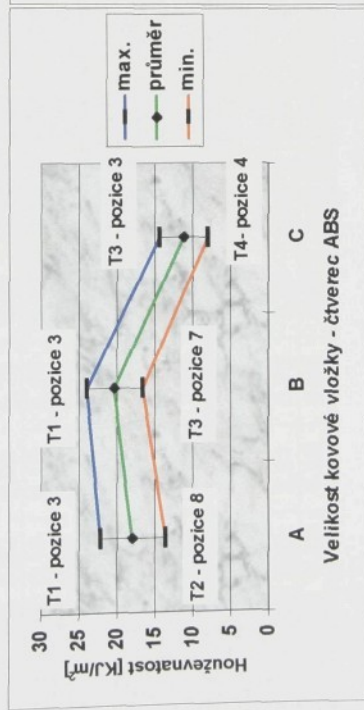
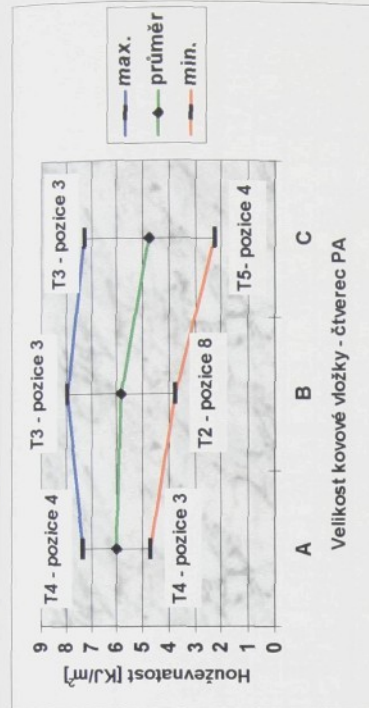
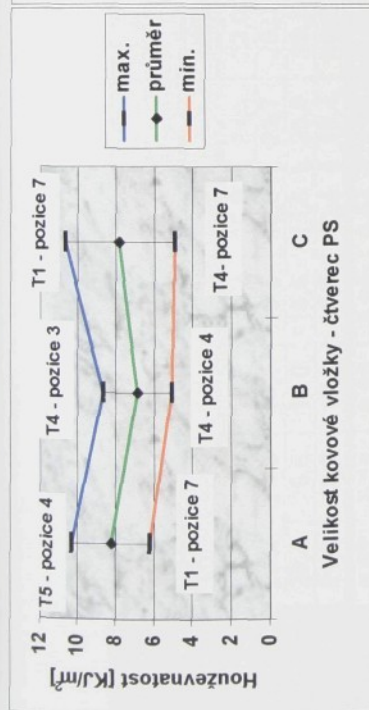
Pro ABS došlo k posunu houževnatosti k nižším hodnotám. Tato skutečnost by podporovala již zmiňovaný fakt o vlivu velikosti tvarových vložek na mechanické hodnoty (delší dráha toku, při obtékání kovových vložek snižuje energii na čele taveniny podporující difuzi a následně pak mechanické hodnoty). Materiál se posunul do střední oblasti grafu, kde se nachází PE. ABS3, ABS8 mají shodné průběhy, s maximem v T3. Křivky ABS7, ABS4 mají podobné průběhy, projevila se zde teplota taveniny, vliv vzdálenosti je celkově minimální.

Porovnání vlivu materiálu a zvolených faktorů [čtverec (A, B, C)-ABS, PS, PE, PA] na houževnatost studeného spoje



Technologické nastavení

Obr. 65 : Grafické zobrazení závislosti SP pro čtverec a použité materiály.



Obr. 66 : Rozptyly hodnot houževnatosti SP pro tvar čtverec.

Tab. 28 : Tabulka hodnot houževnatosti SP pro tvar čtverec.

čtverec	VELIKOST A					VELIKOST B					VELIKOST C				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
HOUŽEVNATOST [kJ/m ²]															
ABS 3	22,3	19,6	16,8	18,2	16,9	24,1	22,0	20,8	19,5	22,3	11,4	11,7	14,4	11,6	11,1
ABS 4	20,2	20,8	15,0	16,3	15,8	22,7	20,5	20,1	18,7	20,4	13,7	9,2	8,9	8,0	10,2
ABS 7	20,4	19,6	14,0	16,5	15,8	20,8	19,2	16,6	19,3	20,1	14,3	10,3	10,7	10,9	12,1
ABS 8	21,0	13,7	15,2	15,5	15,5	18,4	19,2	17,5	17,8	19,9	12,8	9,5	12,8	10,4	10,3
PS 3	6,67	8,16	6,50	8,58	8,04	7,55	5,23	8,32	8,58	7,14	9,35	8,69	7,99	6,87	6,35
PS 4	9,52	8,93	6,38	9,81	10,30	5,49	5,56	5,36	5,15	6,25	6,41	8,72	6,06	5,67	5,46
PS 7	6,18	8,16	8,18	9,32	9,12	6,52	6,59	6,18	7,49	6,52	10,65	8,83	7,18	4,98	7,04
PS 8	8,63	8,86	8,46	9,07	9,32	6,01	6,59	7,21	4,26	6,01	6,66	6,94	7,92	5,84	6,01
PE 3	9,10	7,73	7,13	7,73	8,03	11,59	11,24	8,62	13,20	11,30	12,61	14,78	14,91	10,11	12,04
PE 4	8,74	7,13	8,66	7,51	7,88	12,93	9,81	9,66	12,66	11,74	11,28	13,50	12,55	9,96	10,55
PE 7	8,47	7,58	8,10	7,58	9,22	14,72	8,74	7,58	13,56	9,22	13,50	11,72	13,50	9,88	11,45
PE 8	7,76	7,73	7,88	7,88	8,32	15,01	13,16	9,81	13,20	11,00	14,01	11,59	13,63	9,81	9,74
PA 3	6,03	5,23	5,47	4,54	4,62	6,47	6,29	7,85	7,52	6,21	4,47	4,94	7,45	3,94	2,68
PA 4	4,71	5,87	6,30	7,32	6,01	6,08	5,97	5,48	7,68	4,91	5,79	6,07	7,26	3,84	2,29
PA 7	4,69	6,91	5,72	5,60	6,54	5,20	4,74	7,03	6,21	6,05	5,29	4,94	6,14	5,09	2,64
PA 8	5,33	6,95	6,03	5,89	5,15	6,08	3,76	6,05	6,54	5,40	5,28	4,91	5,61	3,38	2,72

Procentuální rozdíl hodnot se zvětšil proti předchozím velikostem na cca 40%. PE materiál se naopak posunul k vyšším hodnotám a nabývá nejvyšších hodnot pro danou kombinaci (čtverec, velikost C). Semikrystalický materiál rozdělil průběhy podle velikostí. PE3, PE4 rostou podle T_1 až do T3, pak ostře klesají do T4. PE7, PE8 jsou vesměs identické a mají charakteristický trojúhelníkový průběh, který se nachází skoro u všech typů tvarů a velikostí. Procentuální rozdíl hodnot je 35 %. Křivky PS1, PS3, PS4 klesají od T2 směrem k T4. PS8 má podobně jako PE7, PE8, ABS3 lokální maximum v T3. Procentuální rozdíl hodnot dosáhl maxima pro daný tvar a velikosti 49 %. PA materiál se chová podobně jako PE, projevil se zde vliv jak vzdálenosti, tak velikosti tvarových vložek. Hodnoty rostou k T3 a pak klesají do T5. Orientace vláken tvoří neoptimalnější konfiguraci při zvýšeném vstřikovacím tlaku. Procentuální rozdíl hodnot je 44 %. Maximální hodnota pro velikost C – čtverec je PE3 v T3 = 14,9 kJ/m², minimální hodnota je PA4 v T5 2,3 kJ/m². Tvar trojúhelník i obdélník výrazně oddělil materiály do určitých mezí a seřadil je podle velikostí do následujícího pořadí ABS, PE, PS, PA. Poslední dva se překrývají a to hlavně pro citlivost PS materiálu k vrubům, která se zvyšuje s velikostí kovových vložek. Za povšimnutí stojí zmenšení procentuální rozdílu pro PE, ABS, PS a to v průměru o 15 %.

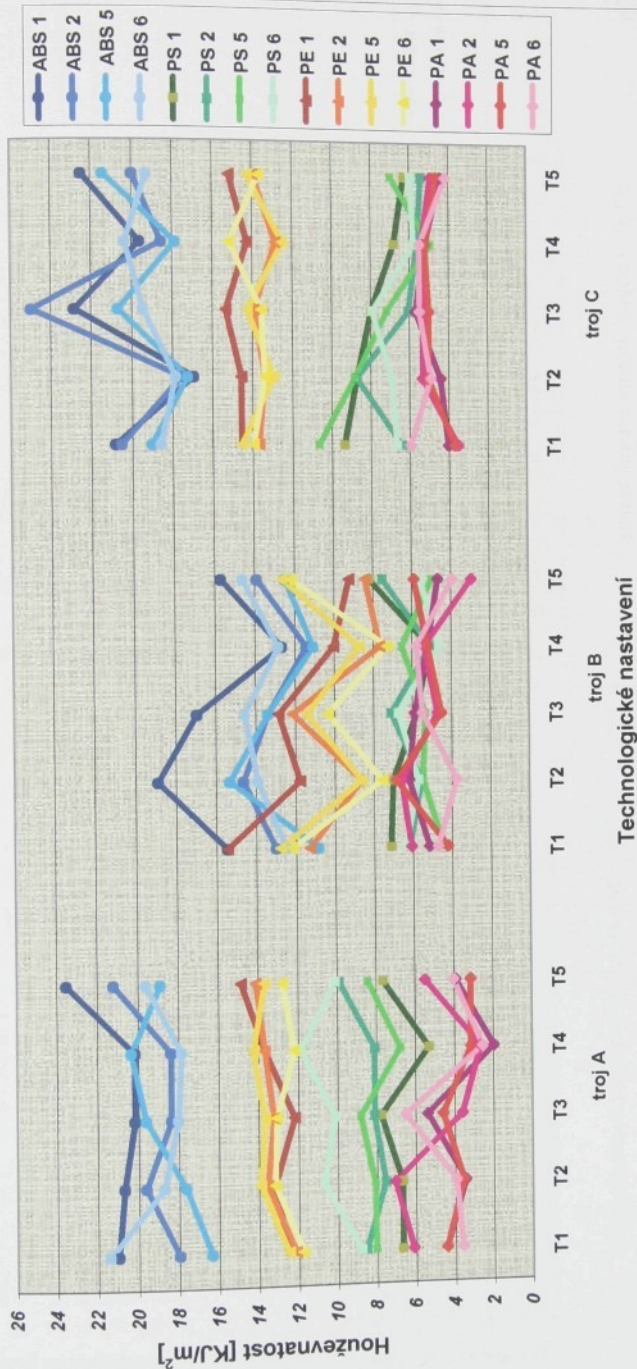
★ A velikost – trojúhelník

Materiál ABS proti předchozím tvarům nemá tak zásadně klesavý průběh. Všeobecná tendence pro ABS1, ABS2, ABS6 je zhruba lineární závislost, která končí stoupáním do T5. ABS5 má spíše rostoucí průběh do T4 a následně pokles do T5. Procentuální rozdíl hodnot pro ABS materiál je cca 30 %. PE5, PE2, PE6, PE1 je pořadí křivek, z čehož rezultuje minoritní vliv vzdálenosti a poměrně lineární průběh i malý vliv technologického nastavení (viz. obr. 67). Procentuální rozdíl hodnot je 21 %. PS6, PS5, PS2, PS1 je pořadí, které naznačuje stejné rezultáty jako pro PE, s tím rozdílem, že T4 nastavení způsobilo propad hodnot a zvětšilo procentuální rozdíl hodnot. Procentuální rozdíl hodnot je pro PS materiál 55%. PA se drží spíše periodického trojúhelníkového průběhu s lokálními extrémy v T3, T4. Jako dominantní faktor zde vystupuje velikost a technologické nastavení. Procentuální rozdíl hodnot houževnatosti je o něco větší, než u ostatních materiálů (72 %), souvisí to, jak s materiálem, tak s kvantitativními výsledky zvolené metody. Maximální hodnota pro velikost A je v ABS1 = 23,5 kJ/m², minimální hodnota je v PA2 v T4 = 2,6 kJ/m² (viz. tab. 29).

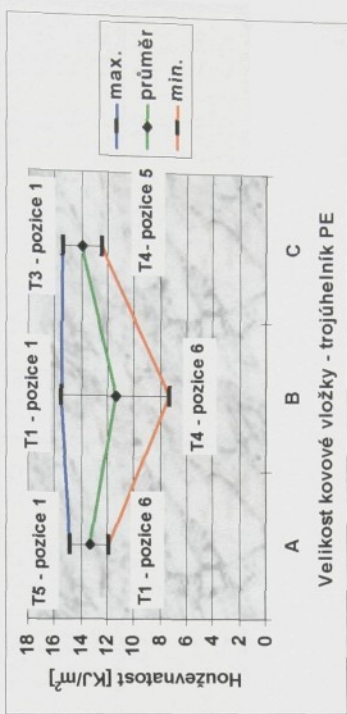
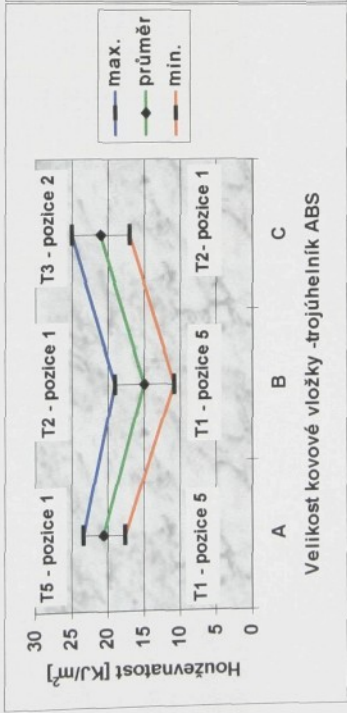
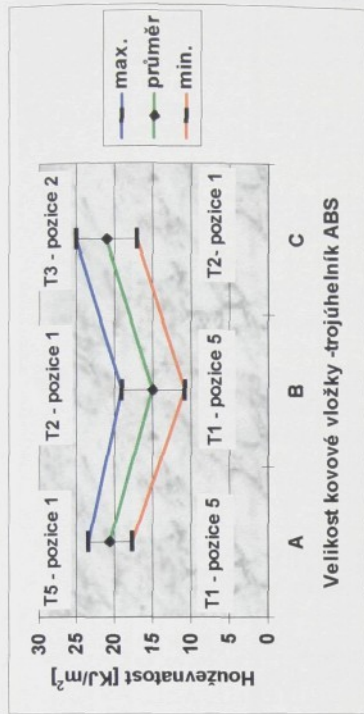
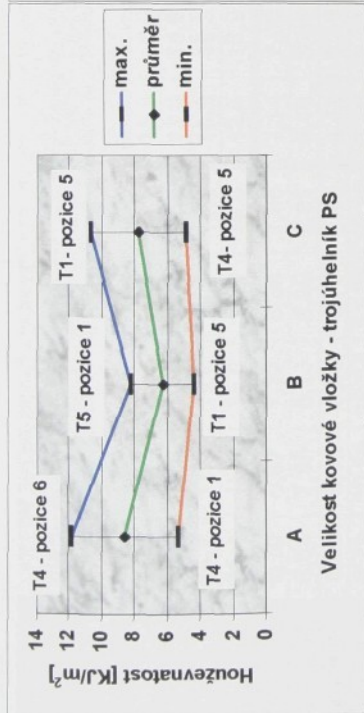
★ B velikost – trojúhelník

Maximální hodnoty u materiálu ABS poklesly. Průběhy se začínají diferenciovat podle vzdálenosti od ústí vtoku. Všeobecný trend je pokles z T2 do T4 a následný růst do T5. Procentuální rozdíl hodnot je vyšší (42 %). PE má trojúhelníkové průběhy pro PE6, PE5, PE2, u kterých dochází k periodickému střídání lokálního maxima a minima houževnatosti SP. PE1 přes T3 klesá k T5. Podobně jako pro ABS vzdálenost od ústí vtoku nabývá na intenzitě. Procentuální rozdíl hodnot houževnatosti pro PE je největší vtoku nabývá na intenzitě (53 %). PS materiál se rozdělil na dva proudy a to PS6, PS2 a PS1, PS5, které mají komplementární průběhy. Hodnota procentuální rozdílu pro PS materiál klesá s velikostí kovových vložek na cca 40% (viz. obr. 68) PA má podobnou charakteristiku jako PS. PA2, PA5 se kromě T1 a T5 kopírují, zatímco PA1 a PA8 mají každý svůj vlastní průběh.

Porovnání vlivu materiálu a zvolených faktorů [trojúhelník (A,B,C)-ABS,PS,PE,PA] na houževnatost studeného spoje



Obr. 67 : Grafické zobrazení závislosti houževnatosti SP pro trojúhelník a použité materiály.



Obr. 68 : Rozptyly hodnot houževnatosti SP pro tvar trojúhelník

Tab. 29: Hodnoty houževnatosti SP pro tvar trojúhelník

trojúhelník	VELIKOST A					VELIKOST B					VELIKOST C				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
	HOUŽEVNATOST [kJ/m ²]														
ABS 1	21,0	20,7	20,2	20,2	23,5	15,5	18,9	16,9	12,7	15,7	20,8	16,9	22,8	19,6	22,5
ABS 2	18,0	19,6	18,4	18,4	21,2	13,0	14,6	13,4	11,4	13,9	20,5	17,5	25,0	18,5	20,0
ABS 5	16,4	17,7	19,6	20,3	18,9	10,9	15,3	13,4	11,1	12,5	19,0	17,2	20,7	17,8	21,4
ABS 6	21,4	18,7	18,0	17,8	19,6	12,5	13,9	14,6	12,8	14,6	18,6	17,8	19,4	20,3	19,3
PS 1	6,70	6,67	7,77	5,30	7,65	7,14	7,00	5,78	5,10	8,21	9,35	8,69	7,99	6,80	6,29
PS 2	8,54	7,55	8,13	8,09	9,91	6,16	5,56	7,11	5,07	7,52	6,41	8,72	6,06	5,61	5,41
PS 5	8,05	8,09	8,83	6,77	8,44	4,42	5,49	5,34	6,52	4,99	10,65	8,83	7,18	4,93	6,97
PS 6	8,79	10,69	10,14	11,87	10,10	6,36	5,71	6,73	4,64	5,56	6,66	6,94	7,92	5,78	5,95
PE 1	12,49	13,20	12,19	13,67	14,96	11,30	8,62	12,13	7,65	8,40	14,57	14,57	14,34	14,27	15,16
PE 2	12,13	13,56	13,23	13,67	14,12	11,30	8,62	12,13	7,65	8,40	13,67	13,38	13,91	12,84	13,97
PE 5	12,49	13,91	13,67	14,27	13,67	12,78	8,62	11,42	8,70	12,63	14,57	12,93	14,27	12,49	14,27
PE 6	11,77	13,20	13,08	12,19	12,78	12,19	7,58	10,35	7,28	12,19	13,97	13,38	13,56	15,16	13,67
PA 1	4,41	3,43	5,40	2,96	3,92	5,15	6,18	5,89	5,20	4,66	4,01	4,41	5,69	5,20	4,41
PA 2	6,13	7,06	3,60	2,65	5,49	6,08	6,57	4,71	5,40	2,94	3,52	5,33	5,30	5,40	4,91
PA 5	4,41	3,53	4,58	3,14	3,14	4,22	6,87	4,51	5,20	5,89	3,68	5,05	5,00	5,20	4,66
PA 6	3,60	3,92	6,54	2,55	4,02	4,71	3,73	5,49	5,79	3,92	5,97	4,91	5,49	5,49	4,17

Stejně jako pro PS procentuální rozdíl maximálních a minimálních hodnot klesá pro PA materiál s velikostí kovových vložek (57 %). Maximální hodnota pro velikost B – trojúhelník je ABS1 v T2 = 18,9 kJ/m², minimální hodnota je PA2 v T5 = 2,9 kJ/m².

★ *C velikost – trojúhelník*

ABS při tomto nastavení nabývá největších hodnot a to pro všechny tvary a velikosti. ABS2, ABS1, ABS5 se drží trojúhelníkových charakteristik, s lokálním maximem v T3. ABS6 roste přes T3 až do T4 s mírným poklesem k T5. Nejvíce se projevilo technologické nastavení. Procentuální rozdíl hodnot pro ABS materiál je 32%. PE se celkově posunulo k vyšším hodnotám a snížilo procentuální rozdíl na minimální hodnotu pro tvar, materiál na 18%. PE1 se oddělilo od ostatních průběhů, které oscilují kolem PE2 křivky. PS klesá s technologickým nastavením stroje a to především pro PS1, PS5 a PS2. PS6. Připomíná to Gaussovu křivku. Lokální extrém je v T3. PA materiál nemá velkých výkyvů hodnot houževnatosti SP, průběh křivek je spíše parabolický. Hodnota PA6 v T1 způsobila, že procentuální rozdíl dosáhl 41 %, jinak by byl velmi malý. Maximální hodnota pro velikost C – trojúhelník je ABS2 v T3 = 25 kJ/m², minimální hodnota je PA2 v T1 = 3,5 kJ/m². Obdélník má velmi podobné průběhy jako trojúhelník a také stejně diferencioval jednotlivé materiály ve velikosti A a velikosti C.

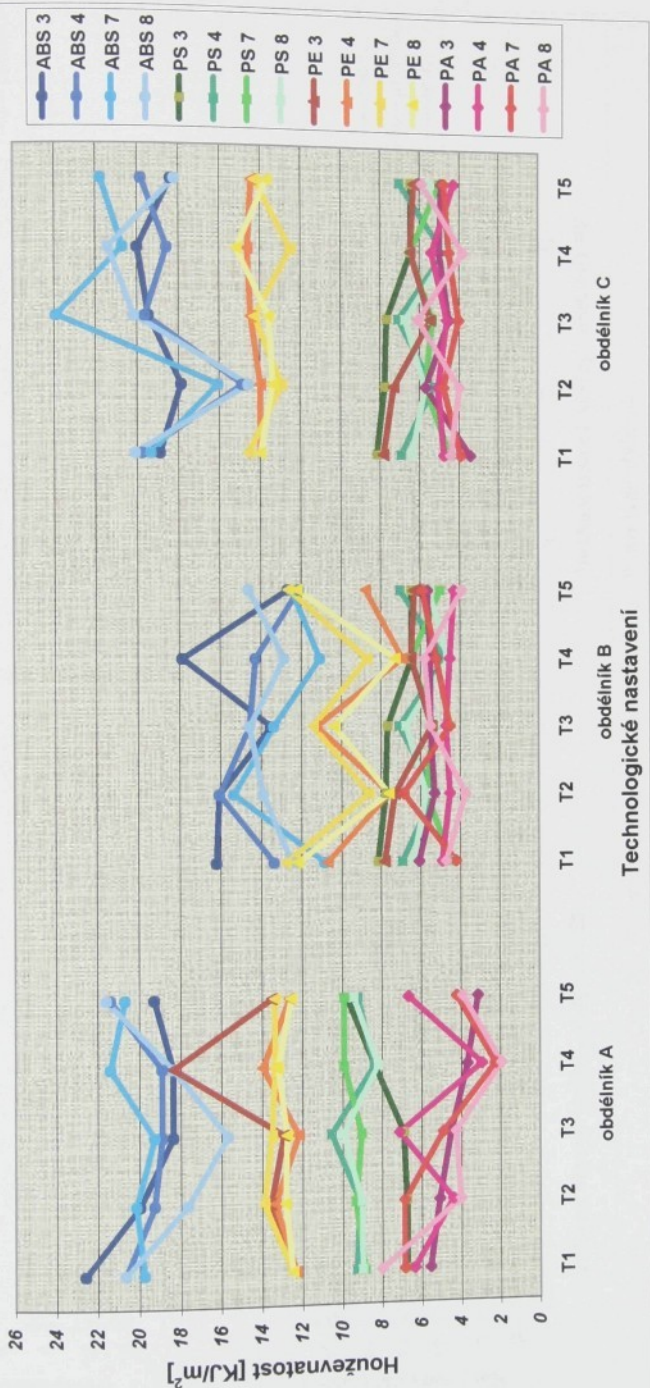
★ *A velikost – obdélník*

ABS3, ABS4, ABS8 má spíše konvexní průběh s poklesem hodnot do T3, T4. ABS7 skokově roste přes T4 do T5 (viz. obr. 69). Procentuální rozdíl hodnot je o 31% větší než u trojúhelníku, ale nižší než u kruhu a čtverce. PE materiál především pro vzdálenější místa od ústí vtoku má průběhy lineární. PE4 je ovlivněno změnou teploty formy a vstřikovacím tlakem. PE3 má v T4 maximum pro daný materiál, tvar a velikost, díky tomuto průběhu procentuální rozdíl dosáhl 46% (viz obr. 70). PS4, PS8, PA4, PA8 mají podobné trojúhelníkové průběhy růstu do T3 a přes T4 do T5. PS3, PS7 má do T3 lineární průběh a pak roste do T5, kde se hodnoty houževnatosti SP setkají. PA7, PA3 mají klesavé průběhy. Celkově se dá říci, že vzdálenost od ústí vtoku se neuplatňuje, naproti tomu v technologickém nastavení dominuje pro T3, T4 kombinace teplot a vstřikovacího tlaku. Maximální hodnota pro velikost A – obdélník je ABS3 v T1 = 22,6 kJ/m², minimální hodnota je PA7 v T4 = 2,2 kJ/m² (viz. tab. 30).

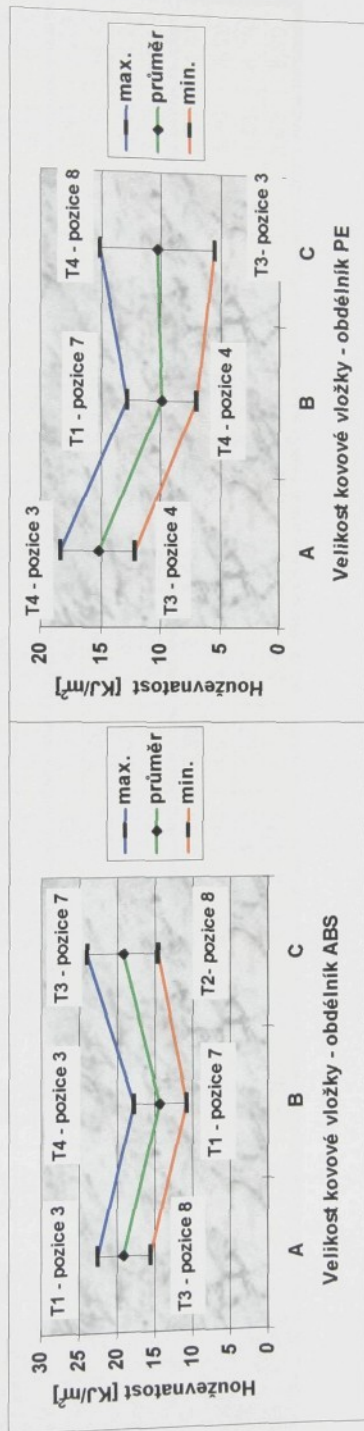
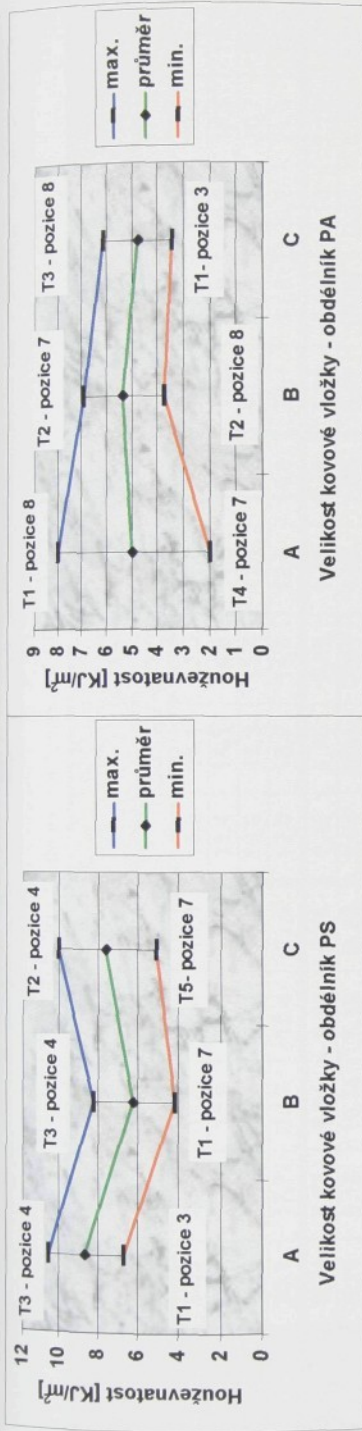
★ *B velikost – obdélník*

PE a PS má stejné průběhy jako pro tvar trojúhelník tj. charakteristické trojúhelníkové, jen procentuální rozdíl se snížil na 46% pro PE a 49% pro PS materiál. ABS je poměrně nesourodý, mechanické hodnoty jsou proti A, C velikosti menší. Jsou tu určité náznaky vlivu vzdálenosti od ústí vtoku. Z technologického nastavení se uplatnilo nejvíce T2, T4 nastavení. PA se liší velmi málo od tvaru trojúhelník. Procentuální rozdíl hodnot pro PA materiál poklesl na 44%. Maximální hodnota pro velikost B – obdélník je ABS3 v T4 = 17,8 kJ/m², minimální hodnota je PA8 v T2 = 3,7 kJ/m².

Porovnání vlivu materiálu a zvolených faktorů [obdélník (A,B,C)-ABS,PE,PS,PA] na houževnatost studeného spoje



Obr. 69 : Grafické zobrazení závislosti houževnatosti SP pro obdélník a použitých materiálů.



Obr. 70 : Rozptyly hodnot houževnatosti pro SP pro tvar obdélník.

Tab. 30 : Hodnoty houževnatosti SP pro tvar obdélník

Mechanické vlastnosti studeného spoje ve	výstřihcích z termoplastů	100
--	---------------------------	-----

★ *C velikost – obdélník*

ABS má maximální hodnoty pro kombinaci tvaru, velikosti a materiálu. ABS7, ABS4 mají stejné průběhy s poklesem v T2 a růstem do T3 a potom přes T4 do T5. Křivky ABS8, ABS3 mají od T2 růst do T4 a pak se scházejí v T5 (viz obr. 69). Materiál PE osciluje kolem hodnoty 14 kJ/m^2 . PE3, PE4 se překrývají, PE7 klesá do T4 a následně roste do T5. PE8 má lokální extrémy v T2, T3. U materiálu PS pro všechny průběhy převažuje strmý pokles hodnot od T3 nastavení, vliv vzdálenosti je minimální stejně jako pro PA materiál. PA se nachází ve spodní části grafu s nejmenšími mechanickými hodnotami a jeho křivky mají charakteristický periodický trojúhelníkový průběh. Maximální hodnota pro velikost C – obdélník je ABS7 v T3 = $23,9 \text{ kJ/m}^2$, minimální hodnota je PA3 v T1 = $3,4 \text{ kJ/m}^2$.

Celkově pro dané kombinace faktorů velikosti a tvaru obdélník pro ABS, PS, PE materiály mají procentuální rozdíly shodné tvary křivek, tj. určitý propad mechanických hodnot ve velikosti B, zatímco velikost A nebo C dosahuje střídavě maximálních hodnot. (viz. tab. 30)

3.6 Výsledky faktorové analýzy

V této kapitole jsou uvedeny výsledky faktorové analýzy, která byla popsána v kap. 2.4. Výsledkem jsou statisticky významné faktory vzhledem k provedeným experimentům. V tabulce tab. 31 a tab. 32 jsou zaznamenány statisticky významné faktory, tj. všechny které překročily $F_{\text{krit.}}$. Pro pevnost SP v tahu jsou převládajícím faktorem pro kombinaci trojúhelník/obdélník faktory *A* (velikost tvarových vložek), *B* (technologické nastavení) a interakce *AB* (*AB* – interakce velikosti tvarové vložky a technologického nastavení). Pro kombinaci kruh/čtverec kromě uvedených ještě zbývající faktor *C* (vzdálenost od ústí vtoku). Specifické chování vykazuje materiál PA, který je citlivý na všechny faktory i interakce. Pro většinu materiálů i obě kombinace jsou interakce *BC* a *AC* statisticky nevýznamné.

Tab. 31 : Statistický významné faktory pro pevnost SP v tahu a zvolené faktory

troj./obdélník		kruh/čtverec	
statisticky významné faktory		statisticky významné faktory	
PS	<i>AB, B</i>	PS	<i>A, B, AB</i>
PE	<i>A, AB</i>	PE	<i>A, B, C, AB</i>
ABS	<i>A, B</i>	ABS	<i>A, B, C, AB</i>
PA	<i>C, A</i>	PA	<i>všechny</i>

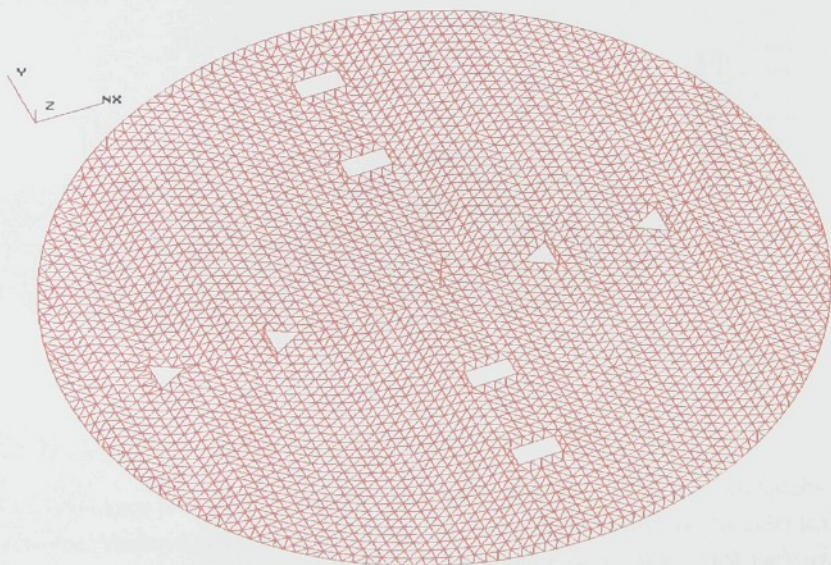
Pro houževnatost SP je statisticky významný téměř každý faktor kromě interakce *BC* (viz. tab. 32). Kvantitativní výsledky houževnatosti jsou mnohem více ovlivnitelné různými faktory a interakcemi, než pevnost v tahu. Faktorová analýza statisticky potvrdila předpoklad vlivu konstrukčních a technologických faktorů a jejich interakcí na výsledné hodnoty mechanických vlastností.

Tab. 32 : Statistický významné faktory pro houževnatost a zvolené faktory

troj./obdélník		kruh/čtverec	
statisticky významné faktory		statisticky významné faktory	
PS	A,B,C,AC,AB	PS	A,B,C,AB,AC
PE	A,B,C,AB,AC	PE	A,AB,AC
ABS	A,B,C,AB	ABS	A,B,C,AB,AC
PA	B,C,AB	PA	A,B,C,AB,AC

4. Konstrukce modelu a výsledky simulace

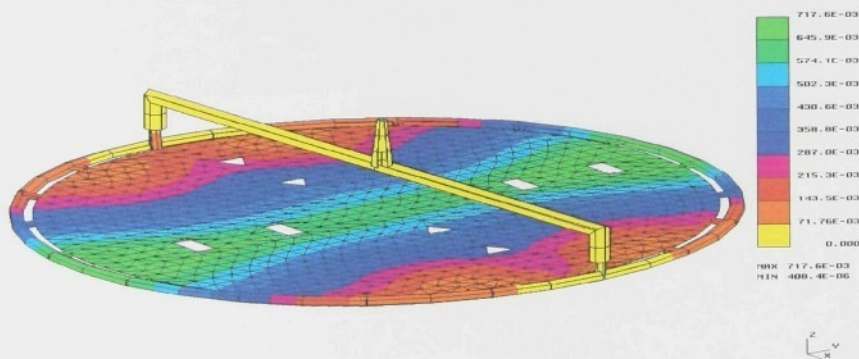
Vstupní veličinou simulace je geometrický model výsledného produktu. Tento model byl namodelován přímo pomocí simulačního programu v modulu *2D/3D MODELING* na základě skutečných rozměrů. Dalším krokem bylo síťování modelu, které bylo provedeno pomocí aplikace *MESHING*. Obr. 71 zobrazuje síťový model v kombinaci trojúhelník/ obdélník. Aplikovaná síť je v tomto případě trojúhelníková, pro kombinaci kruh/ čtverec jsem používal síť tvořenou obdélníky. Takto připravený model se dále zpracovává tj. přiřadí se mu tloušťka a průměry vtokového systému, nadefinuje se vstřikovací cyklus a zvolí se materiál.



Obr. 71 : Síťový model simulovaného produktu v kombinaci trojúhelník/ obdélník.

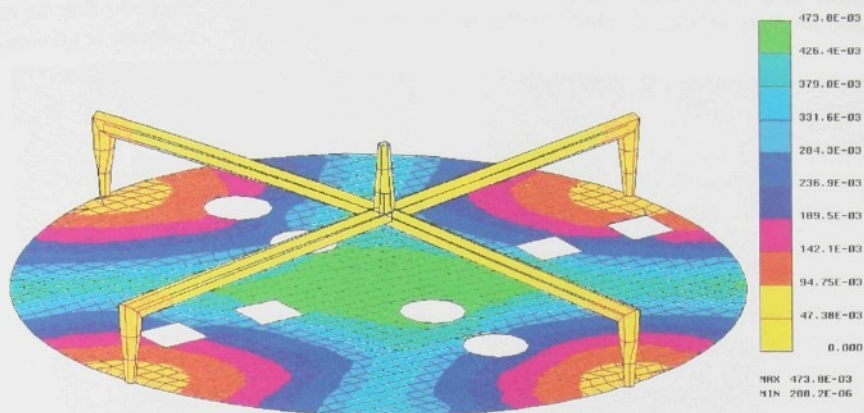
Poslední krok před předáním celkového datového souboru k výpočtu je kontrola zadáných dat, geometrie a materiálových charakteristik vzhledem k zvolenému režimu vstřikování. Volba režimu je natolik výkonná, že lze nastavit podmínky tak, aby odpovídaly reálnému vstřikovacímu cyklu. Dokonce lze konstruovat kaskádové vstřikování, či vstřikování s podporou plynu, které nejsou až tolik rozšířené. Kontrolou vstupních dat skončí fáze tzv. „Pre-processing“, následuje fáze výpočtu tzv. „Processing“. Zobrazení vypočtených dat se provádí v odděleném modulu *2D/3D GRAPHIC DISPLAY* a tato fáze se nazývá „Post-processing“. Pomocí barevné mapy, isokřivek, 2D grafu lze přehledně zobrazit jednotlivé funkce. Při složitějším výrobku program umožňuje natáčení modelu, nebo zobrazení v uživatelsky zvolené rovině, pohledu. Simulace je účinný prostředek pro odhalení většiny vad spojených se vstřikováním a pomáhá šetřit velké náklady spojené s následnými úpravami forem. SP se nechají velmi rychle a jednoduše odhalit právě tokovou analýzou.

Následující vyobrazení představuje tokové analýzy (diagramy plnění) SP v několika variantách při změně vtokové soustavy. Cílem je nasměrovat tok taveniny tak, aby SP vznikly v místech konstrukčně i vzhledově vhodnějších, nebo aby vymizely úplně. Na obr. 72 je varianta A změny vtokové soustavy, kdy tavenina je přiváděna z protilehlých míst výstřiku a zároveň po obvodu. Barevná stupnice je časovým vyjádřením toku taveniny. Na obrázku je vidět, že tavenina netvoří SP při obtékání kovových vložek, ale že se čela taveniny setkají uprostřed výstřiku.

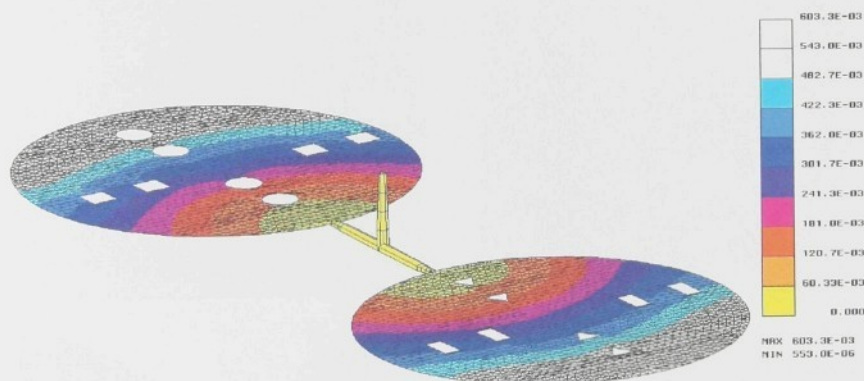


Obr. 72 : Varianta A - změna vtokové soustavy-diagram plnění.

Jiná možná modifikace je na obr. 73, nazvaná jako varianta B. Tato varianta je pro kombinaci kruh/čtverec. Vtoková soustava je volena tak, aby SP nezasáhl kovové vložky nebo jen nepatrně ve středu výstřiku. SP pak tvoří „kříž“ avšak mimo riziková místa. Obě varianty sice řeší zadaný problém, ale jsou konstrukčně, technologicky i ekonomicky vzhledem k větším ztrátám, které by vznikly recyklací vtokového zbytku,



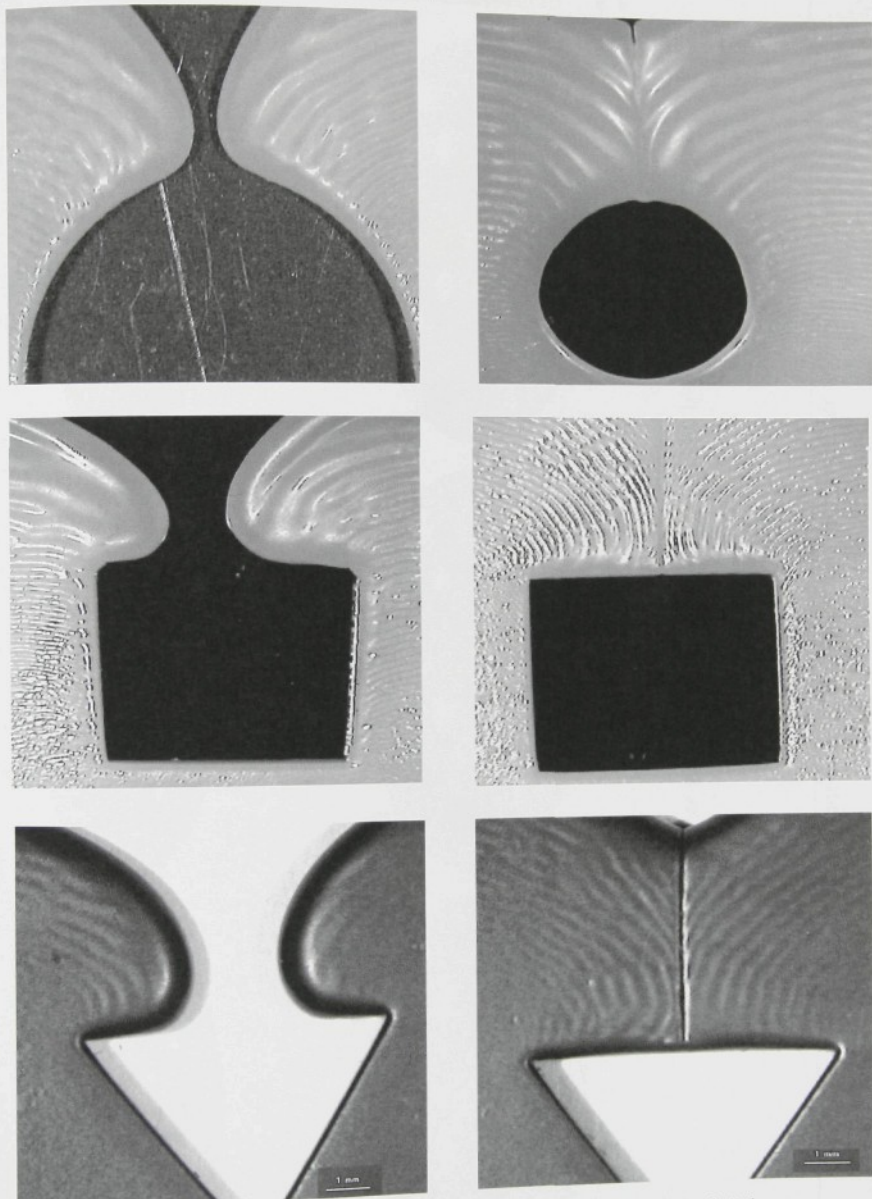
Obr. 73 : Varianta B - změna vtokové soustavy-diagram plnění.



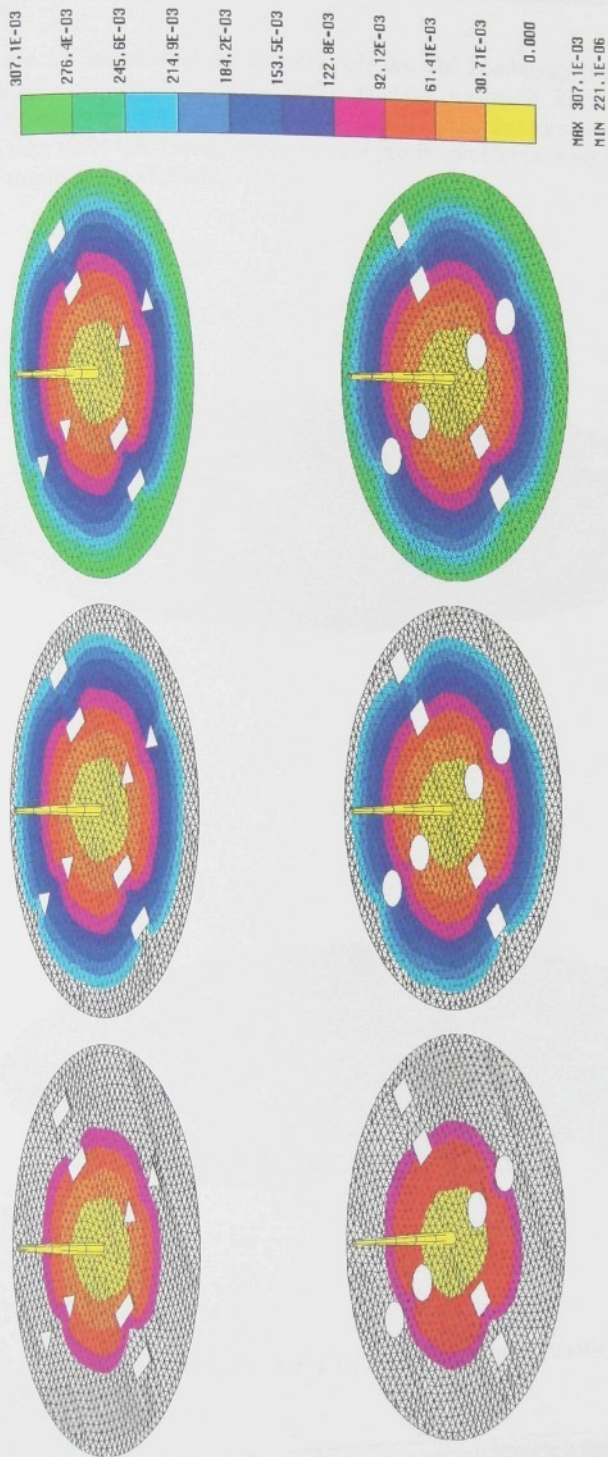
Obr. 74 : Varianta C - změna vtokové soustavy-diagram plnění.

náročné. Varianta C (viz. obr. 74) je opakem předchozích, řeší problém z hlediska technologického a ekonomického, ale ne konstrukčního. Na dalším obrázku je zobrazen skutečný postup fronty taveniny (viz. obr. 75), který byl připraven snížením dávky ve vstřikovacím stroji. Vznikl tak vzhled gramofonové desky, kde jednotlivé rýhy vyjadřují postup taveniny a její spojení v oblasti za kovovými vložkami. Na dalším obrázku (viz. obr. 76) je zobrazena toková analýza jako funkce času pro oba

experimenty, tj. kruhový výstřik s kovovými záložky ve tvaru kruh/čtverec a ve tvaru trojúhelník/obdélník. Na těchto obrazcích lze porovnat shodu skutečného postupu čela taveniny se simulací.

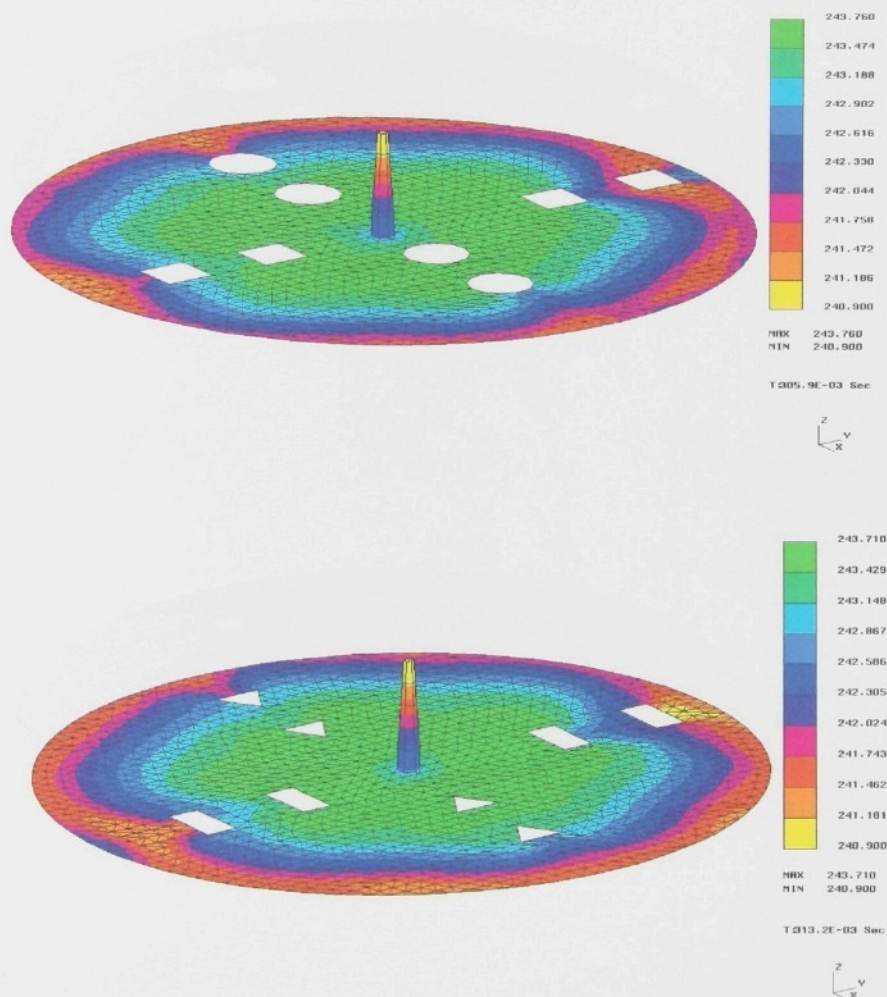


Obr. 75 : Skutečný postup toku taveniny při obtékání kovových vložek.



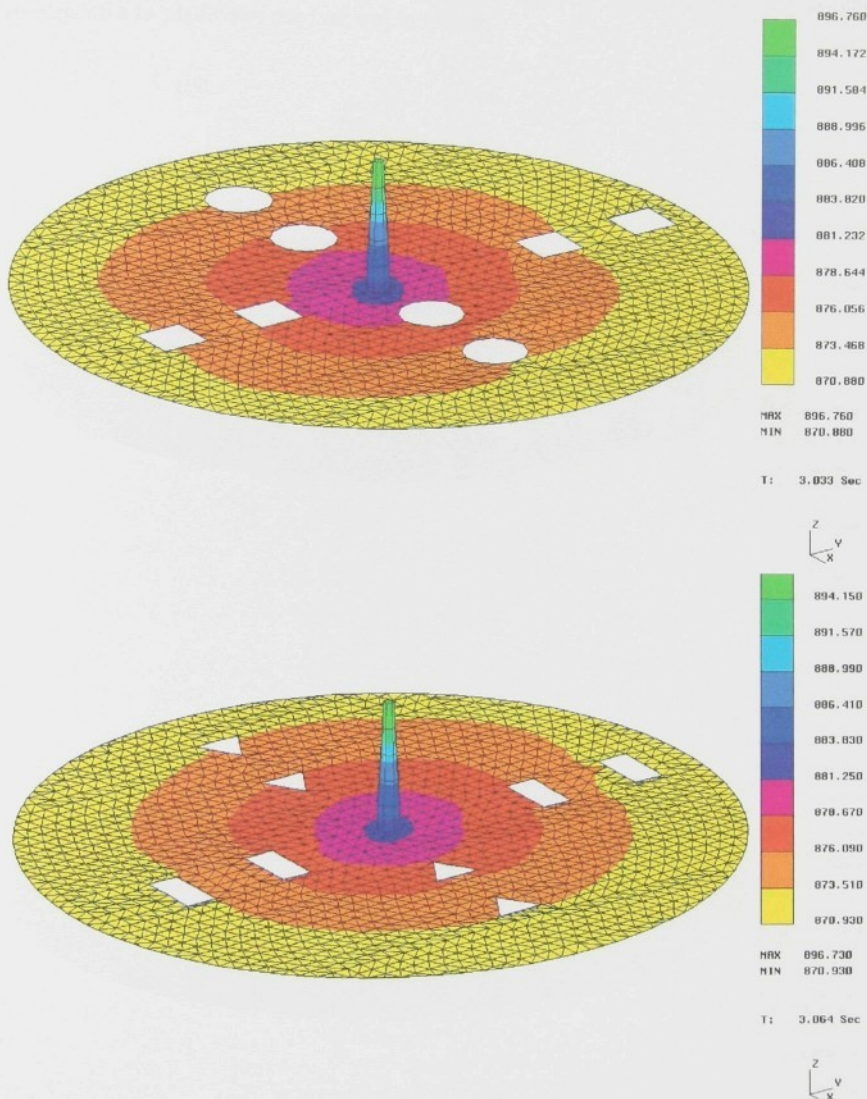
Obr. 76 : Toková analýza jako funkce času pro kombinaci tvarů: troj./obdélník a kruh/čtverec.

Na obr. 77 jsou zobrazena teplotní pole pro obě kombinace tvarů. Je na nich vidět, že v oblasti vzdálenější od ústí vtoku dochází v místech SP k oddělení teplot a tím rozdílnému teplotnímu gradientu. Ten způsobí ovlivnění mechanických vlastností SP. Je zde také vidět vliv tvaru, který je menší pro bezproblémové obtékání kruhu a výraznější pro trojúhelník i obdélník.



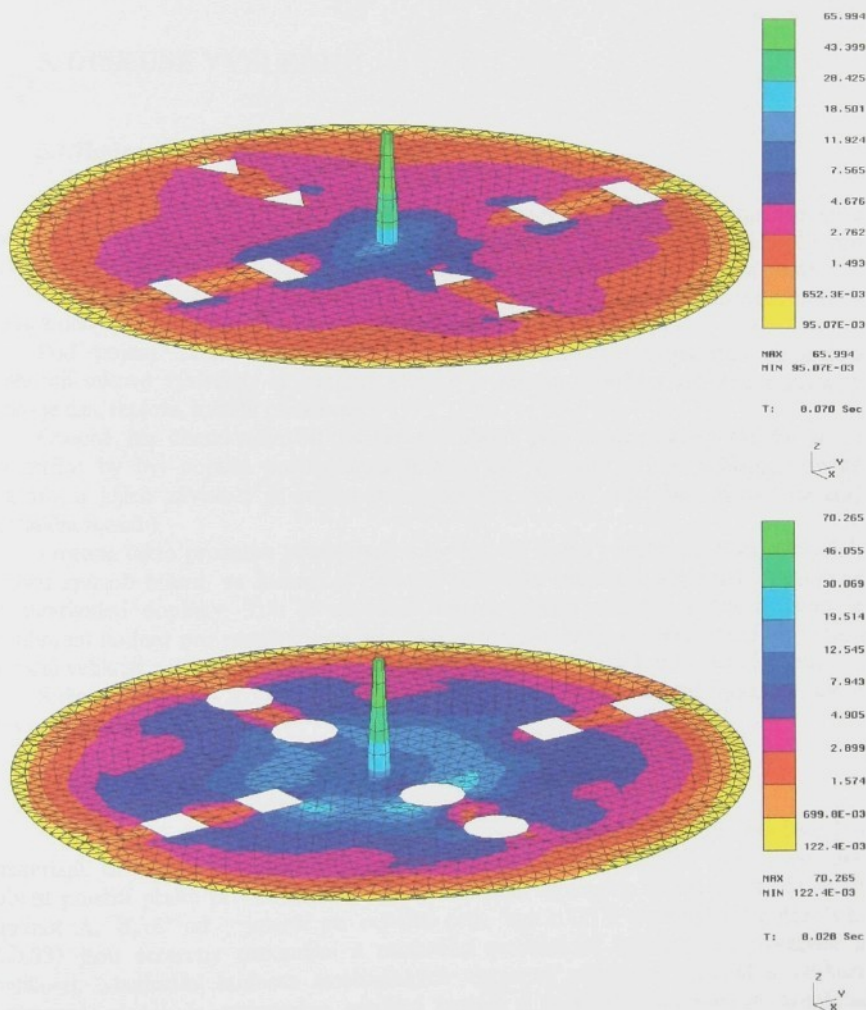
Obr. 77 : Teplotní pole [°C] po zaplnění dutiny formy termoplastem.

Diagramy tlakových ztrát (viz. obr. 78) ve 3 s. na výstřiku ukazují, že tlak je rovnoměrně rozprostřen do 4 pásem a není potřeba ho zvlášť upravovat.



Obr. 78 : Rozložení tlaku [Pa] ve výstřiku v čase 3 s.

Obr. 79 zobrazuje rozložení smykových rychlostí v čase 8 s. Čím větší je smyková rychlost, tím nižší je viskozita a naopak. Tato nepřímá úměrnost zdánlivé viskozity a smykové rychlosti je velmi dobře popsána v teoretické části. Na obou obrázcích je vidět zabrzdění toku v oblasti za kovovými záložky a uzavření těchto pomalejších proudů rychlejšími a to především pro tvar troj./obdélník.



Obr. 79 : Zobrazení smykových rychlostí [s^{-1}] v čase 8 s.

Grafické výsledky výstupy z tokové analýzy pomáhají odhalit nedokonalosti vstřikovacího cyklu, návrhu výrobku a vtokového systému, které vznikají z různých příčin a mohou přerůst v neodstranitelné vady. Ty potom mohou přinést nemalé potíže při jejich řešení a to nejen nákladnými úpravami forem, ale např. i odstávkou výroby. Vyplátí se proto v předvýrobní etapě provést tokové i chladicí analýzy, které pomáhají odstranit případné nedostatky v návrhu výrobku a formy. V našem případě toková analýza bezpečně odhalila SP a navrhla jiné řešení.

5. DISKUSE VÝSLEDKŮ

5.1. Hodnocení dosažených výsledků

Disertační práce přináší dílčí informace do technologie vstřikování resp. vzniku a předcházení studených spojů, které zvyšují prvek provozních jistot, potřebných pro kvalitativní i kvantitativní rozhodování a uvědomělé řízení procesu vstřikování plastů.

Pod pojem „kvalitativních faktorů“ rozumíme takové, u kterých byl nalezen směr, u něhož daný parametr působí, tedy způsobuje či odstraňuje vznik vady.

Pod pojem „kvantitativní faktory“ nebo „kvantitativně“ popsanych parametrů zahrnují takové výsledky, na základě kterých je možno vypočítat základní parametry jako je čas, teplota, kvalita plastů atd.

Obecně lze charakterizovat vstřikování plastů jako proces, který (kdyby se to podařilo) by byl popsán polyvariantní funkcí, jejíž parametry jsou vzájemně složitě vázány a jejich závislost je známá pouze kvalitativně (to ještě bez nároku na celý definiční rozsah).

Protože takto prozatím postupovat nelze (a není to ani v technické praxi obvyklé), nabízí způsob řešení, ve kterém je exaktní výpočtová cesta kombinovaná s logickými kvalitativními doplňky. Tou je například charakteristika rozměrů a tvarů, která je souborem hodnot pro rozdílné typy výstřiků, mnou navržené a volené podle obvyklých vztahů velikost a tloušťku s tím, že výsledek bude upraven podle kvalitativních úvah.

S těmito úvahami a výhradami je nutno přijímat všechny získané výsledky, které lze rozdělit do těchto oblastí :

A) VLIV MATERIÁLU A VELIKOSTI

K experimentálnímu měření jsem použil zástupce nejběžněji používaných materiálů, aby byla pokryta nejen oblast amorfních a krystalických plastů, ale také oblast použití plastů pro konstrukční účely. Velikost kovových vložek se skládá ze tří hodnot **A**, **B**, **C** od nejmenší po největší (viz. kap.3.1). V následující tabulce (viz. tab.33) jsou seřazeny maximální a minimální mechanické hodnoty dle materiálu a velikosti. Maximální hodnota mechanických vlastností pro daný materiál a velikost tvarových vložek je zvýrazněna modrou barvou a minimální hodnota je označena červenou barvou. Pro houževnatost je třeba mít na zřeteli, že zkušební vzorky z materiálu **ABS**, **PE** byly opatřeny vrubem. Jednalo se tedy o vrubovou zkoušku houževnatosti a zkušební vzorky z materiálů **PS**, **PA** vrub neměly, jedná se tedy o

rázovou zkoušku. Tab. 33 jednoznačně ukázala ABS jako nejlepší materiál z hlediska mechanických vlastností SP.

Tab. 33 : Maximální a minimální hodnoty mechanických vlastností pro materiál.

	Pevnost SP v tahu [MPa]				Houževnatost [kJ/m ²]		
	A	B	C		A	B	C
	ABS				ABS		
Max.	47.1	37.5	39.8	Max.	24.4	24.1	25
Min.	30	16.7	17.2	Min.	13.7	10.9	7.9
	PE				PE		
Max.	28.8	34.1	34.2	Max.	18.3	16.2	17.3
Min.	22.5	20.2	20.5	Min.	5.65	6.8	5.9
	PS				PS		
Max.	28.6	29.9	32.7	Max.	11.8	8.5	12.4
Min.	16.2	13.6	12.9	Min.	5.3	4.4	3.06
	PA				PA		
Max.	26.3	28.8	22.3	Max.	8.01	7.8	7.4
Min.	16.7	17.7	15.9	Min.	2.9	2.7	2.2

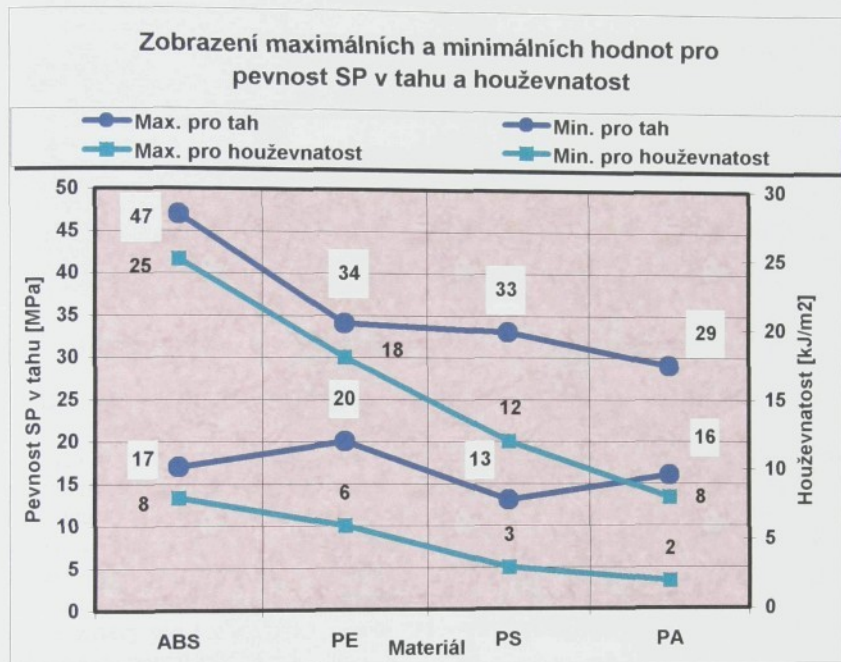
Je známou skutečností, že mechanické vlastnosti ABS, zejména houževnatost, jsou ve srovnání s houževnatým polystyrénem i polyethylenem neobyčejně příznivé. Závisí ovšem poměrně značně na způsobu zpracování, zejména vnesené vnitřní orientaci makromolekulárních řetězců nebo poklesu teplot na čele taveniny, která mohla být příčinou tak rapidního poklesu houževnatosti u velikosti C.

PE je semikrystalický plast, u kterého linearita řetězce a molekulová hmotnost ovlivňují obsah krystalického podílu. Ta se běžně pohybuje v rozmezí 40-50 %. V našem případě se projevil spíše vyšší polymerační stupeň, který zvyšuje houževnatost a snižuje pevnost. PE je také materiál s nízkým rozptylem mechanických hodnot.

Určujícím kritériem pro pevnost v tahu PS je molekulová hmotnost, její distribuce a u houževnatých typů poměr styrenové a butadienové složky v kopolyměru. To spolu s technologickými podmínkami určuje výsledný stav a vlastnosti výstřiku. PS materiál je také citlivý na všechny typy vrubů, přičemž se tato citlivost zvyšuje zejména při nižších teplotách např. pod -20°C. Nutno počítat též s vrubovým účinkem vtoku, zejména v kombinaci s vnitřním pnutím při nevhodně zvolených podmínkách vstřikování. Náchylnost k tvorbě SP je poměrně značná. Ta se projevila především v houževnatosti, v kombinaci s velikostí C, strmým poklesem až na ¼ maximální hodnoty.

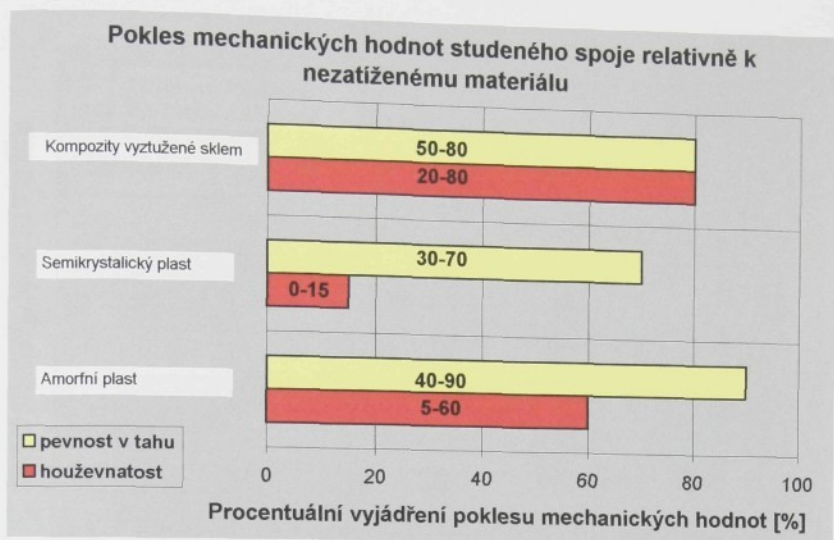
PA se svou pevností v tahu příliš neliší od PE, PS materiálů. Je to konstrukční semikrystalický plast s výhodnými mechanickými vlastnostmi, které se mohou měnit v širokých mezích podle obsahu monomeru, vody a přísad. Používaný polyamid obsahuje 30% skleněných vláken, které výrazně modifikují jeho vlastnosti. Zvýšený obsah skleněných vláken zvyšuje vrubovou houževnatost, účinek SP a orientace vláken snížila mechanické hodnoty až o ½ proti hodnotám nezátíženým SP. Na druhé straně je PA ale velmi kompaktní s nejnižšími hodnotami rozptylu mechanických hodnot.

Celkové hodnocení z pohledu výběru materiálu a velikosti vyznívá spíše pro konstrukční amorfnní materiály, které jsou homogenější a nejsou ovlivněny podílem krystalické fáze nebo obsahem plniv. Rozdíly mezi pevností SP v tahu u PE, PS, PA jsou zhruba 3%. Pro pevnost v tahu se nejvyšší hodnoty posouvají k vyšším velikostem tj. C, B. Vzhledem k houževnatost došlo k rozdělení na amorfnní, u nichž je nejvýhodnější C velikost a semikrystalické, u kterých převažuje úplný opak tj. nejmenší velikost A. (viz. obr. 79)



Obr.79 : Graf zobrazující maximální a minimální hodnoty mechanických vlastností SP.

Minimální hodnoty obou mechanických vlastností se logicky přesouvají k velikosti C. Měřítkem hodnocení materiálu nejsou jenom maximální a minimální mechanické hodnoty SP, ale také snížení mechanických hodnot relativně k materiálu nezatíženému SP. Na obr. 80 je porovnán pokles houževnatosti a pevnosti SP v tahu u jednotlivých typů materiálů /33/ Např. u kompozitů vlivem SP se houževnatost může snížit na 50 % až 80 % původní hodnoty. U amorfnních plastů to může být pokles o 10 - 50%.



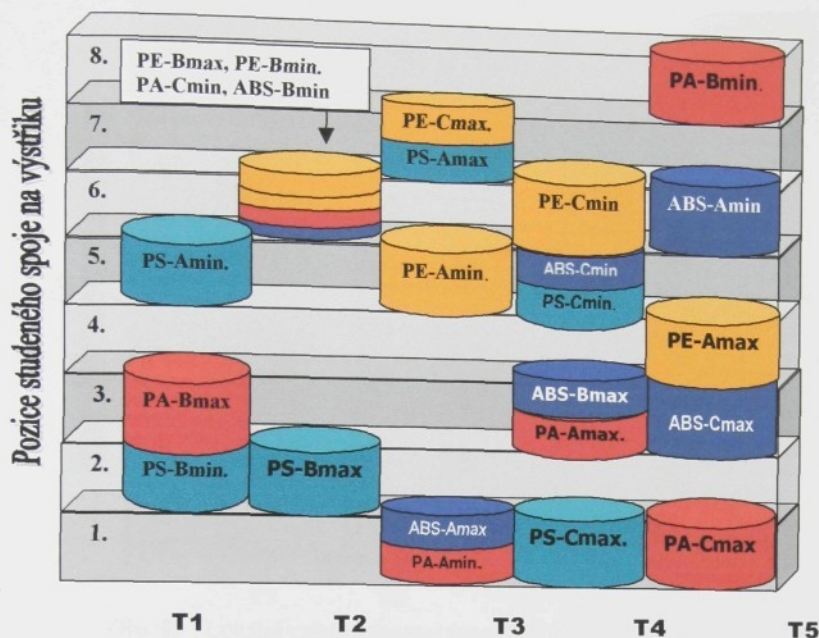
Obr. 80 : Pokles mechanických hodnot relativně k nezatíženému materiálu.

B) VLIV TECHNOLOGIE A VZDÁLENOSTI OD ÚSTÍ VTOKU:

Tyto vlivy byly podrobně popsány v kap.2.2.2.4. Technologické nastavení je jednou z nejobtížnějších částí výrobní etapy. Vychází z dlouholetých zkušeností technologů, kteří musí pečlivě hodnotit celou soustavu: materiál - stroj - nástroj. Ustavení formy a náběh výroby jsou proto také časově velmi náročné. Praktické zjednodušení nastává, pokud se používá jedna forma na stejném stroji, ale i to sebou nese vlivy související se stárnutím nástroje. Na grafech a tabulkách, i při dosti kolísavých průbězích, rezultují určité závěry pro technologické nastavení s přítomností SP ve výstřiku. Jako hodnotící faktor jsem použil lokální extrém.

Tyto extrém jsou maximálními a minimálními hodnotami mechanických vlastností ze všech tvarů v dané velikosti. Např. **PA-Amin**. znamená minimální hodnotu mechanických hodnot SP ze všech tvarů pro **PA** materiál a velikost **A**. Na obr. 82 a obr. 83 jsou ve vzájemném vztahu lokální extrém, technologické nastavení (osa X) a vzdálenost od ústí vtoku (osa Y). Výsledky lze rozdělit na : a) lokální extrém jako funkce technologického nastavení a b) lokální extrém jako funkce pozice SP na výstřiku.

Nejméně vhodné technologické nastavení je **T1** s poměrem **[1/2]** ($1/2$: znamená počet lokálních maxim / počet lokálních minim) a nastavení s největším vlivem na pevnost SP v tahu je v **T4** – **[3/3]**. Prvně zmiňované nastavení se dalo předpokládat, protože leží na spodní hranici zpracovatelnosti materiálu. Druhé nastavení souvisí se změnou vstřikovacího tlaku, tj. především s orientací makromolekul a plniv, rychlým plněním dutiny formy. Technologické nastavení **T3** – **[3/2]**, **T5** – **[3/2]**, **T2** – **[2/3]** mají shodně po pěti lokálních extrémech, přesto je zde vidět určitý posun s rostoucí teplotou taveniny vzrostl i počet lokálních maxim pevnosti SP v tahu.

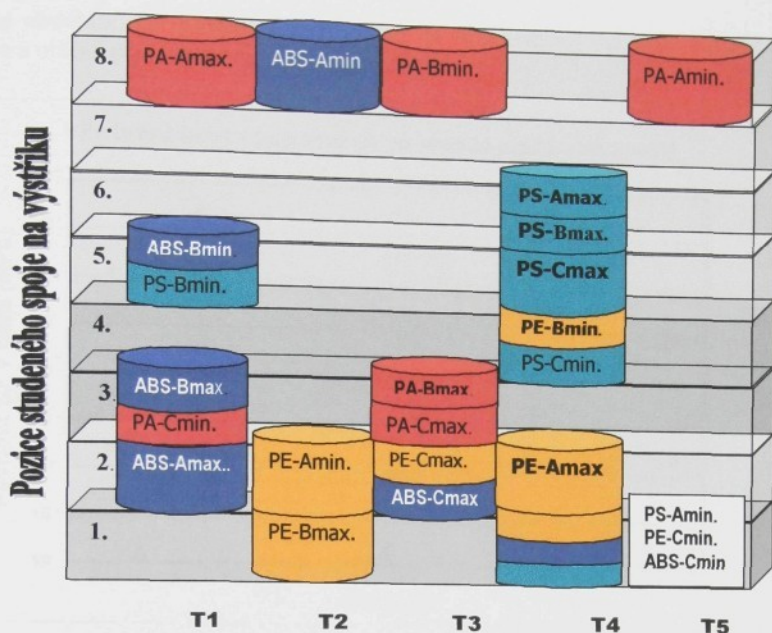


Obr. 82 : Lokální extrémy pevnosti SP v tahu jako funkce. technologie a vzdálenosti od ústí vtoku.

Na obr. 82. je také velmi zřetelně vidět **PS**, který se drží v oblasti středních a nižších teplot taveniny (teplota taveniny roste od T1 do T5 vzestupně), zatímco **PA**, **PS**, **PE** extrémy se drží ve střední až vyšší oblasti technologického zpracování. Pro pevnost SP v tahu je tedy nejvhodnější **T4** nastavení (nastavení se zvýšenou teplotou formy) potom následují **T3**, **T5**, méně vhodné jsou nastavení s nižší teplotou taveniny.

Vliv vzdálenosti od ústí vtoku ve vztahu k tvarům byl popsán v experimentální části. V diskusi bych však chtěl porovnat její vliv vzhledem ke zmiňovaným lokálním extrémům. Např. 2-[1/1] znamená : pozici 2, v které se nachází 1 lokální maximum a 1 lokální minimum. Praktické členění pozice na výstřiku je podle množství lokálních maxim : 3-[4/0], 1-[3/1], 7-[2/0], 4-[1/0], 2-[1/1], 6-[1/5], 8-[0/1], 5-[0/4]. Optimální pozice SP pro pevnost v tahu na výstřiku je v blízkosti ústí vtoku 3, 1 nejméně vhodné umístění je pozice 5, 6 s největším počtem lokálních minim (viz. obr. 82).

Technologické nastavení je paradoxně homogennější pro houževnatost, než pro pevnost SP v tahu, tj. maxima i minima jsou více soustředěna ve sloupcích. Při porovnání lokálních extrémů (viz. obr. 83) nastává tato situace: **T3**-[4/1], **T4**-[4/5], **T1**-[3/3], **T2**-[1/2], **T5**-[0/1]. Změna technologického nastavení je patrná především u **T3** s největším počtem lokálních extrémů a **T4** s největším počtem lokálních minim. Lze tedy říci, že zvýšená teplota formy a teplota taveniny má pozitivní účinek, zatímco zvýšený tlak působí negativně.



Obr. 83 : Lokální extrémů houževnatosti SP v tahu jako funkce. technologie a vzdálenosti od ústí vtoku.

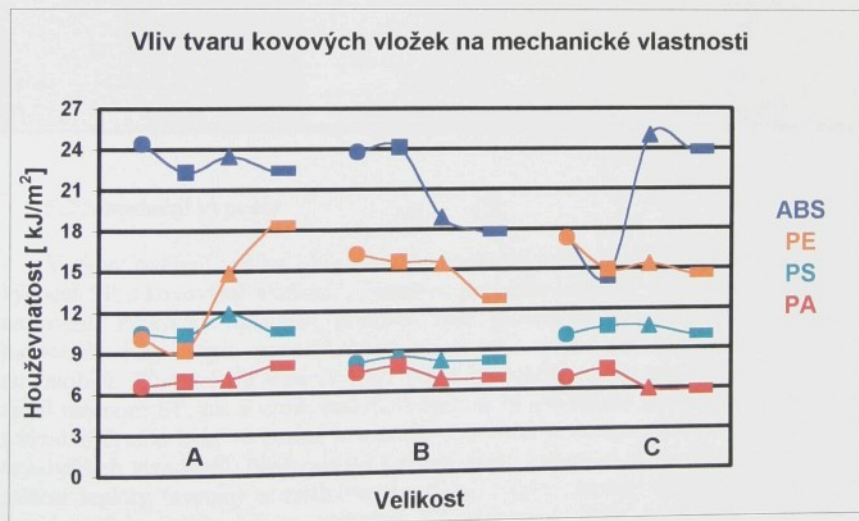
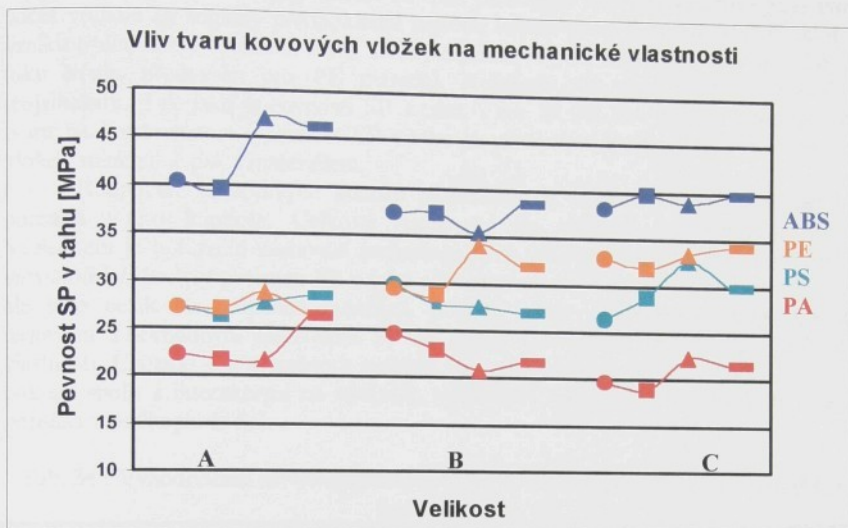
Lokální extrémů pro materiály **PE**, **PA**, **ABS** leží v oblasti nižších a středních teplot taveniny, pro **PS** jsou soustředěny v **T4**. Z toho vyplývá *optimální technologické nastavení* pro houževnatost SP, jenž je **T3**, **T1**, tzn. vyšší vstřikovací tlak a nižší teploty taveniny a to včetně konstrukčních amorfních termoplastů. Z technologického hlediska má největší vliv nastavení **T4** (zvýšená teplota formy), které koncentruje 5 lokálních maxim a 4 lokální minima.

Vzdálenost od ústí vtoku z pozice lokálních maxim: 2-[3/2], 3-[2/2], 6-[2/0], 5 [1/2], 1-[1/3], 8-[1/3], 4-[0/2]. Optimální pozice na výstřiku pro houževnatost SP jsou 2, 3, 6, nejméně vhodné pozice jsou 1, 8, 4. Pozici 7 bych označil jako neutrální, jelikož neobsahuje ani lokální maxima, ani lokální minima. Ve srovnání s pozicemi pro pevnost SP v tahu došlo k posuvu směrem od vtoku.

C) VLIV TVARU KOVOVÝCH VLOŽEK

Vliv tvaru lze nejlépe posoudit na obr. 84. Nelze ho brát izolovaně, ale v souvislosti s ostatními faktory. Rozbor vlivu proto provedu v souvislosti s velikostí kovový vložek a materiálem. Absolutně majoritní vliv na maximální hodnotu pevnosti SP v tahu má tvar **trojúhelník** a to u všech velikostí tvarových vložek i materiálů. Čelo taveniny má první dotyk s vrcholem rovnostranného trojúhelníku a poté druhý největší

vliv má **obdélník**, na výstřiku je situován tak, že čelo taveniny má první dotyk s delší stranou a obtéká podél kratších stěn ke kraji výstřiku.



Obr. 84 : Vliv tvaru kovových vložek na mechanické vlastnosti SP.

Kruh, čtverec mají shodně velký vliv, a to především pro velikost **B, C**. Při hodnocení si lze všimnout velmi podobného chování **PS, PA** materiálů vzhledem k tvarům.

Největší vliv na houževnatost SP měl paradoxně **čtverec**, přestože jeho tvar a počet vrcholů by logicky předpokládal největší vnitřní pnutí a mnohem větší sklon ke vzniku trhlin, než u ostatních tvarů. Druhý největší vliv má z hlediska bezproblémovosti toku **kruh**, především pro **PE** materiál. Nejmenší vliv mají shodně **obdélník a trojúhelník**. Tak jako u pevnosti SP v tahu, i zde se **PS, PA** chovají podobně. Vliv tvaru na houževnatost i pevnost SP v tahu je především spojen s velikostí kovových vložek, minimálně pak s materiálem.

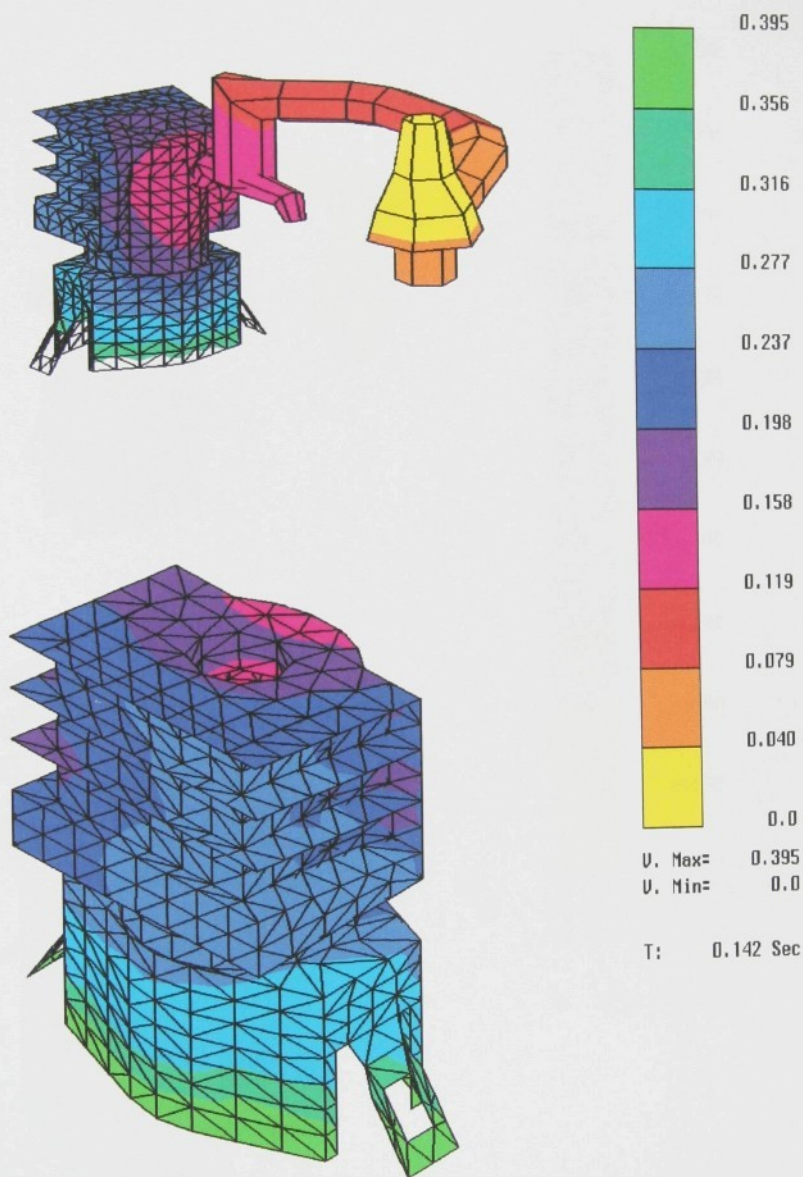
Hodnocení jednotlivých faktorů působících na mechanické vlastnosti SP bylo popsáno v této kapitole. Celkové hodnocení lze shrnout do přehledné tab.34. Výsledkem je optimální nastavení technologických a konstrukčních faktorů při získání *maximálních hodnot* pevnosti SP v tahu a houževnatosti. Faktory nelze brát izolovaně, ale jako celek ve vzájemné interakci, protože výběr optimálního technologického nastavení s nevhodným umístěním SP na výstřiku nepřinese očekávané mechanické vlastnosti. Chceme – li vyhodnotit největší vliv zvolených parametrů u vícefaktorového pokusu spolu s interakcemi na výsledek, poslouží k tomu faktorová analýza, která je popsána v podkapitole 5.3.

Tab. 34 : Vyhodnocení nejvhodnějších faktorů ve vztahu k maximálním mechanickým hodnotám SP.

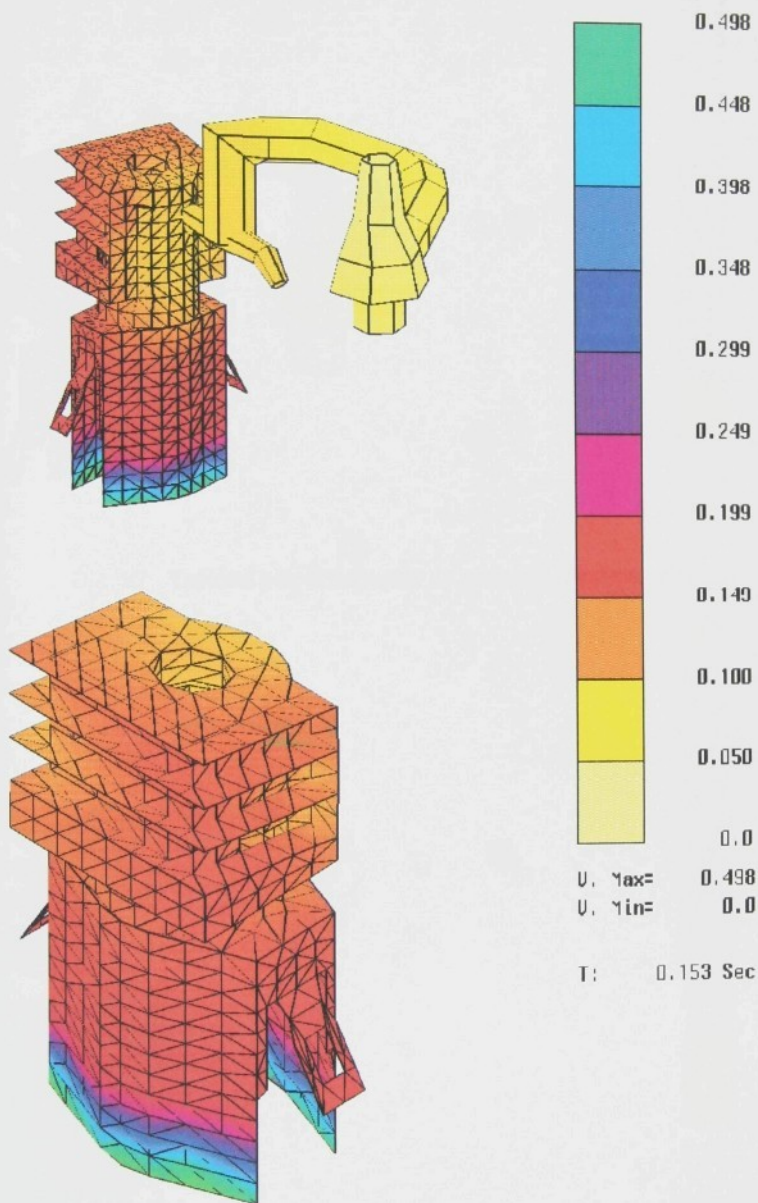
Jednotlivé faktory	Pevnost v SP v tahu	Houževnatost SP
Materiál	ABS,PE,PS,PA	ABS,PE,PS,PA
Velikost	C,B	C,A
Pozice SP na výstřiku	3,1	2,3,6
Technologické nastavení	T4,T3,T5	T3,T4
Tvar	trojúhelník , obdélník	čtverec, kruh

5.2 Simulační výpočty

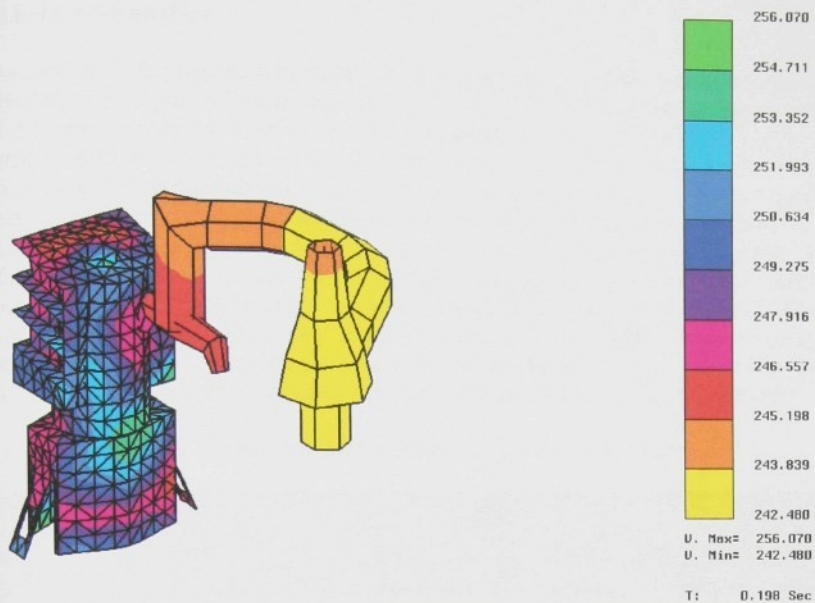
V rámci ověření vzniku SP a vlivu technologických veličin byl proveden simulační výpočet SP s kovovými vložkami. Simulace potvrdila vznik SP a vliv technologického nastavení. Praktické uplatnění simulace bylo provedeno na konstrukčním výrobku, označeném jako „Pipe support“, který slouží jako aretace při otevírání oken u dveří automobilů. Původní díl v horní části žebířů byl křehký a při podrobnější analýze se zjistil nejenom SP, ale i vznik lunek. Navržené řešení tohoto problému ve spolupráci s výrobní firmou bylo ve změně geometrie ústí vtokové soustavy, které se upravilo dle nejnovějších standardů. Následovalo technologické nastavení stroje, které spočívalo ve snížení teploty taveniny a vstřikovacího tlaku, zvýšení teploty formy a zvýšení doby dotlaku. Odpovídalo by to přibližně **T3** nastavení. Byly provedeny také menší konstrukční změny. Tyto návrhy byly podstoupeny simulaci (viz. obr. 85-88), jejímž výsledkem bylo potvrzení navrhovaných změn, které se projeví v odstranění lunek a snížení vlivu SP.



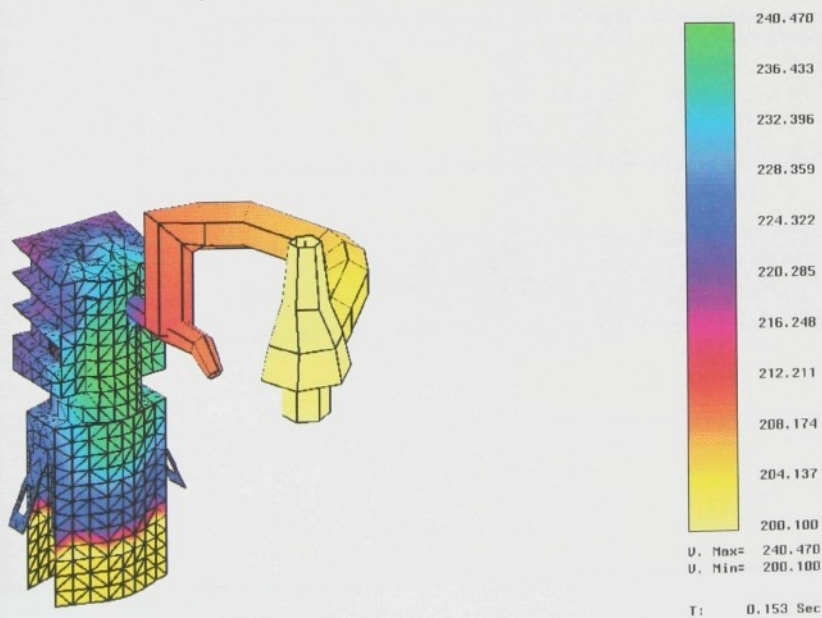
Obr. 85 : Moldflow analýza pro starý díl, odhalení SP.



Obr. 86 : Nový díl se změnami, eliminování SP.



Obr. 87 : Teplotní pole starého dílu ve zvoleném časovém okamžiku.



Obr. 88 : Teplotní pole nového dílu ve zvoleném časovém okamžiku.

5.3 Faktorová analýza

Ve stručnosti byla popsána v kapitole 2.4. Při experimentech byla využita ke zhodnocení vlivu faktorů, a to nejen izolovaně, ale také jejich interakcí. V našem případě jsem pracoval s většími faktorovými pokusy, kterých se užívá při nestejném počtu úrovní (T1-T5, 1-9 pozice v výstřiku, A-C velikost) jednotlivých faktorů, nebo v případech, kdy jeden nebo více faktorů kvalitativně neměřitelných. Faktorové pokusy jsou založené na analýze rozptylu, základním předpokladem je, že pozorování jsou normálně rozdělena a navzájem na sobě nezávislá. Odhady parametrů modelu (μ , τ , ε) se určí z podmínky minimálního součtu čtverců. Cílem je potom získání součtu odchylek jednotlivých pozorování od celkového průměru, které se na základě testu hypotézy vyhodnocují (viz. tab. 35). Pro rozlišení faktorů a velikosti tvarových vložek, které mají stejné označení (A, B, C), ale různý význam, bylo použito barevné rozlišení. Červená písmena v tab. 35 znamenají velikost tvarových vložek a jejich interakce, černá písmena znamenají statisticky významné faktory a jejich interakce.

Tab. 35 : Poddrobný rozbor statisticky významných faktorů.

Materiál PS	Pevnost SP v tahu		Houževnatost SP	
	kruh/čtverec	troj. /obdélník	kruh/čtverec	troj. /obdélník
Statisticky významné faktory	A, B, AB	AB,B,	A,B,C,AB,AC	A,B,C,AC,AB
Statisticky významné úrovně faktorů a interakcí	A – A velikost, B – T2, AB – AT2	A – C velikost, B – T1, AB – CT1	A – A velikost, B – T2, C – pozice 6, AB – AT5 , AC – A6	A – A velikost, B – T5, C – pozice 4, AB – AT5 , AC – A6
Interval spolehlivosti	d ± 1,1	d ± 2,1	d ± 1,1	D ± 0,8
Materiál PE	Pevnost SP v tahu		Houževnatost SP	
	kruh/čtverec	troj. /obdélník	kruh/čtverec	troj. /obdélník
Statisticky významné faktory	A, B, C, AB	A,AB	A,AB,AC	A,B,C,AB,AC
Statisticky významné úrovně faktorů a interakcí	A – C velikost, B – T3, C – pozice 3, AB – CT3	A – B velikost, AB – CT3 ,	A – C velikost, B – T1, C – pozice 2, AB – CT3 , AC – C1	A – C velikost, B – T3, C – pozice 1, AB – CT5 , AC – C5

Pokračování tab. 35 : podrobný rozbor statistických faktorů.

Interval spolehlivosti	$d \pm 1,1$ [MPa]	$d \pm 1,2$ [MPa]	$d \pm 0,5$ [kJ/m ²]	$d \pm 0,9$ [kJ/m ²]
Materiál ABS	Pevnost SP v tahu		Houževnatost SP	
	kruh/čtverec	troj. /obdélník	kruh/čtverec	troj. /obdélník
Statisticky významné faktory	A,B,C,AB	A,B,AB	A,B,C,AB,AC	A,B,C,AC,AB
Statisticky významné úrovně faktorů a interakcí	A – A velikost, B – T4, C – pozice 1, AB – AT3 ,	A – A velikost, B – T3, AB – AT3 ,	A – B velikost, B – T1, C – pozice 3, AB – BT1 , AC – B1	A – C velikost, B – T5, C – pozice 1, AB – CT3 , AC – C5
Interval spolehlivosti	$d \pm 2,2$	$d \pm 3,4$	$d \pm 0,8$	$d \pm 1,3$
Materiál PA	Pevnost SP v tahu		Houževnatost SP	
	kruh/čtverec	troj. /obdélník	kruh/čtverec	troj. /obdélník
Statisticky významné faktory	všechny	C,A	A,B,C,AB,AC	B,C,AB
Statisticky významné úrovně faktorů a interakcí	A – C velikost, B – T3, C – pozice 5, AB – AT3 , AC – C5 , BC – 3T2	A – C velikost, C – pozice 3 ,	A – C velikost, B – T3, C – pozice 4, AB – CT3 , AC – C4	A – B velikost, B – T3, C – pozice 2, AB – AT3 , AC – B3
Interval spolehlivosti	$d \pm 5,8$	$d \pm 3,2$	$d \pm 2,1$	$d \pm 1,2$

Tab. 35 se podrobněji zabývá statisticky významnými faktory a jejich úrovněmi. Zaznamenané úrovně se v mnoha případech shodují s hodnotami jednotlivých faktorů v tab. 4. Faktorová analýza však poskytuje hlubší pohled na experiment, a to především na interakce. V tab. 35 jsou zvýrazněny oblasti, kde jednotlivé úrovně faktorů jsou odlišné od úrovně interakcí. U pevnosti SP v tahu převládají jednotlivé faktory, interakce jsou statisticky nevýznamné, úrovně interakcí jsou ve shodě s úrovněmi jednotlivých faktorů. Převládajícími faktory jsou **A - velikost**, **B - technologické nastavení**. U houževnatosti SP je tomu přesně naopak, interakce se zde projevuje u všech materiálů a především pro tvar troj./obdélník. Statisticky jsou významné všechny faktory, tedy i **C - vzdálenost od ústí vtoku**, což je také dáno charakterem zkoušky. Interval spolehlivosti určují rozmezí, ve kterém se budou nacházet mechanické hodnoty při přechodu z jedné úrovně do druhé (např. T1→T2, C → B, 5 → 5 atd.), z toho plyne také znaménková konvence.

Faktorová analýza potvrdila předpoklad vlivu jak technologických, tak i konstrukčních parametrů na výslednou hodnotu mechanických vlastností SP. Při nastavování optimálních podmínek doporučují hodnoty, které vzešly z interakcí. Interakce se mnohem více blíží ideálním podmínkám než osamocené faktory.

Rozborem sledované problematiky lze konstatovat, že ač se jedná o jeden nejrozšířenějších problémů v oblasti vstřikování, věnuje se mu v literatuře malá pozornost. Existují určitá obecná doporučení jak danou problematiku řešit, ale ta nerozlišují, zda se jedná o „studený spoj“ nebo „horký spoj“ ani konstrukční zásady návrhu dílce. Náplní této práce byla spíše problematika „horkých“ SP, kde z výsledných mechanických hodnot jsem zpětně získal doporučení konstrukčního i technologického charakteru. Získané závislosti pomohou předvýrobní etapě návrhu vstřikovaných dílů vyvarovat se chyb plynoucích z konstrukčního i technologického návrhu a ušetří nemalé náklady spojené s dodatečnými úpravami. Cílem této práce bylo také ukázat, že simulační CAD/CAM programy jsou nedílnou součástí návrhu výrobku, formy a pomáhají optimalizovat výrobní cyklus.

6. Závěr

Předložená práce na téma mechanických vlastností studených spojů je příspěvkem k problematice konstrukčního i technologického řešení nejběžněji se vyskytované vady výrobků. Práce je rozdělena do dvou základních částí a to:

- ① -teoretickou část,
- ① -experimentální část,

V teoretické části jsou nejdříve popsány nejběžnější typy studených spojů včetně praktických příkladů, dále je potom analyzován princip vzniku SP při obtékání kovových vložek a vliv materiálových, technologických parametrů.

V experimentální části, která je hlavní náplní této práce, jsem nejdříve popsal metodiku měření, technologické a konstrukční parametry stroje a používané zařízení. Výsledky byly zaznamenány do tabulek a vyneseny do grafických závislostí. Součástí experimentální práce je "Moldflow analýza", která umožňuje graficky zobrazit postup čela taveniny při obtékání kovových vložek, tlakové a teplotní poměry v určitém časovém okamžiku po zaplnění formy, průběh smykových rychlostí, smrštění atd. Tento komplexní pohled na proces vstřikování umožňuje již při návrhu výrobku zjistit a odhalit možné konstrukční i technologické nedostatky a bez zbytečně velkých zásahů a nákladů je odstranit nebo eliminovat na přijatelnou úroveň. Z vyhodnocení výsledků a vzájemných závislostí je možné provést následující shrnutí:

Získané výsledky lze shrnout do následujících výstupů:

1) Na základě termodynamických vztahů a teorie volného objemu jsem provedl rozbor podmínek pro vznik studeného spoje. Získané hodnoty potvrdily vztah (9) tj. rozhodující vliv smykového napětí a teploty na vznik a houževnatost studeného spoje.

$$\frac{\tau}{T} = \frac{k}{\gamma_0 \nu_0} \left(\ln \dot{\gamma} - \ln \frac{\gamma_0 J_0}{2} + \frac{Q}{kT} \right) \quad (9)$$

2) Na základě simulace tokových podmínek, které byly shodné s podmínkami při vstřikování, jsem určil optimální technologické podmínky a navrhl vhodné úpravy vtokového systému tak, abychom co nejvíce omezili jeho negativní vliv.

3) Pomocí faktorové analýzy jsem stanovil míru vlivu jednotlivých faktorů a jejich interakce na mechanické vlastnosti studeného spoje.

4) Z provedených experimentů jsem odvodil pravidla pro nastavení technologických i konstrukčních parametrů, které povedou k zmenšení negativních důsledků studených spojů (viz tab. 35). *Optimální faktory jsou v tabulce na levé straně řádku a směrem napravo se jejich účinnost snižuje.*

- a) Navržené zařízení, sestavené pro získání vzorků, jenž se skládá ze vstřikovacího stroje, formy, kovových vložek různých tvarů a velikostí, se osvědčilo a umožnilo získat dostatečně přesné mechanické hodnoty pevnosti studených spojů v tahu a jejich houževnatosti.
- b) Použitá metoda získání vzorků vystřihováním byla již v minulosti úspěšně aplikovaná a má své výhody např. nulové teplotní ovlivnění, získání přesných rozměrů, reprodukovatelnost.

Tab. 35 : Pravidla pro nastavení konstrukčních a technologických parametrů, které povedou ke zmenšení vlivu studených spojů.

Jednotlivé faktory	Pevnost v SP v tahu	Houževnatost SP
Materiál	ABS,PE,PS,PA	ABS,PE,PS,PA
Velikost	C,B	C,A
Pozice SP na výstřiku	3,1	2,3,6
Technologické nastavení	zvýšená teplota formy	zvýšený vstřikovací tlak
Tvar	trojúhelník , obdélník	čtverec, kruh

Jsem si vědom, že formulované výstupy řeší jen určitou část problematiky studených spojů. Celkové řešení je podstatně komplikovanější a nezahrnuje např. vliv tloušťky stěny výstřiku, což je jeden z důležitých parametrů při návrhu tvaru a celé koncepce budoucího výrobku, ale to již může být námětem dalšího studia této problematiky.

7. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY :

- /1/ SOVA M. - KREBS J. A KOL.: **Termoplasty v praxi – příručka pro konstruktéry, výrobce, zpracovatele a uživatele termoplastů.** (kap. 8/9), Verlag Dashofer , svazek 2, Praha, 2000.
- /2/ **Směrnice pro vstřikování konstrukčních termoplastů**, Divize plasty - Bayer, Leverkusen, 1999.
- /3/ Kříž J. – Vávra P.: **Strojírenská příručka**, Svazek 8, SCIENTIA s.r.o. pedagogické nakladatelství, Praha 1998.
- /4/ Šafařík M.: **Nástroje pro tváření kovů a plastů**, VŠST Liberec, Liberec 1991, ISBN 80-7083-014-X.
- /5/ BOWN JOHN: **Injection moulding of plastics components**. MC Graw –Hill Book Company , Berkshire England, 1989, ISBN 0-07-084521-2.
- /6/ Stevenson J. F.: **Innovation in polymer processing Molding**, Hanser/Gardner publication, New York, 1996, ISBN 1-56990-197-X.
- /7/ GABRIEL J.: **Moldflow-počítačový optimalizační program temperačního systému vstřikovacích forem**, Plasty a kaučuk č.8., VUGPT Zlín, 1991.
- /8/ INTELLIGENT SYSTEMS LABORATORY- WWW PAGES ,**Injection moulding**, Michigan State University 1999.
- /9/ KOLOUCH J.: **Strojírenské výrobky z plastů vyráběné vstřikováním**, SNTL, Praha 1986.
- /10/ BROSTOW-CORNELIUSSEN: **Failure of plastics**, Hanser Publisher, New York 1986, ISBN 3-446-141199-5.
- /11/ BOUNDY R.H. – R.F. BOYER: **Styrene: Its Polymers, Copolymers and Derivates**, p.490, New York 1952.
- /12/ MC CRUM N. G. – C. P. BUCKLEY - C.B. BUCKNALL: **Principles of polymer Engineering**, Oxford University press, Oxford 1988, ISBN 0-19-856155-5.
- /13/ HAGERMAN E.M.: *Plast. Eng. Sci.* 1974, 14, pg. 621.
- /14/ HOBBS S.Y.: *Polymer Eng. Sci.* 1974, 14, pg. 621.
- /15/ GIBBS J.H. - E.A. DIMARZIO, J.: *Chem. Phys.* 1958, 28, pg.373.
- /16/ PÍŠEK, F. - JENÍČEK, L. - RÝŠ, P.: **Nauka o materiálu I/1.**, Praha Academia 1966.
- /17/ PÍŠEK, F. - JENÍČEK, L. - RÝŠ, P.: **Nauka o materiálu I/2.**, Praha Academia 1968.
- /18/ MEISSNER B. – ZILVAR V.: **Fyzika polymerů**, SNTL Praha, 1987.
- /19/ INSTITUT FOR PROCESTEKNIK - WWW PAGES, **Push –Pull injection moulding**, Danmark Tekniske Universitet 1996.
- /20/ RAAB MIROSLAV: **Co je to houževnatost polymerů?**, Plasty a kaučuk , číslo 12, str. 361-364, SNTL Praha, 1981.
- /21/ DIN 53 455 : *Prufung von Kunststoffen –Zugversuch*, FNK, NMP, 1981.
- /22/ KREBS J.: **Teorie zpracování nekovových materiálů**, VŠST Liberec, 1991, ISBN 80-7083-074-3.
- /23/ ČSN 640611 : *Vrubová a rázová zkouška Dynstat*, ÚNM Praha, 1981.
- /24/ FELIX M. – BLÁHA K.: **Matematicko statistické metody chemického průmyslu**, SNTL Praha, 1962.
- /25/ DRAB V. – MOC L.: **Teorie spolehlivosti a řízení jakosti**, VŠST Liberec, 1992, ISBN 80-7083-098-0.
- /26/ LOUFEK, J - LENFELD, P. - KREBS, J.: **Aplikace systému STRIM 100 při vstřikování termoplastů**, In : *Sborník přednášek z mezinárodní konference „Vstřikování plastů“*, str. 148-155, Praha 1998.

- /27/ LOUFEK, J.: **Studium možností využití CAD/CAM/CAE systému STRIM 100 pro kompletní analýzu vstřikování termoplastů**, Diplomová práce, TU Liberec 1996.
- /28/ RADOSTA T.: **Analýza vstřikování pro vybraný díl z automobilového průmyslu**, Diplomová práce, TU Liberec, 2000.
- /29/ **Krasten 127, Krasten 336**, materiálové listy, Kaučuk Kralupy nad Vltavou a.s., 1999.
- /30/ **Katalog plastů a elastomerů**, Chemopetrol Litvínov, 1986.
- /31/ **Technische Thermoplaste von Bayer**, Produkte und Anwendungen, BAYER – Leverkusen, 1999.
- /32/ **BERGAMID B65 G30**, quality certificate, Bergmann GmbH, 2000
- /33/ **Materiálové listy**, internetové stránky firmy DUPONT, www.Dupont.com.
- /34/ Moslé H. G, - O.S. Bruller and H Dick: Proc.38 th. ANTEC, SPE, p. 290,1980.
- /35/ Moslé H. G, - O.S. Bruller and H Dick: Proc.39 th. ANTEC, SPE, p. 290,1981.
- /36/ Moslé H. G, - O.S. Bruller and H Dick: **Erarbeitung von Kennwerten für das kunststoffgerechte Konstruieren**, Opladen 1980.
- /37/ **Advances in Rheology**, vol. 3 Polymers, Elsevier Science Publishing Company, Universidad Nacional Autonoma De Mexico, Mexico 1984, ISBN 0 – 444 – 99573 – 0.
- /38/ Bolton W.: **Engineering Material 2,3**, Heineman Professional Publishing, Oxford 1988, ISBN 0434 90139 3, ISBN 043490169 5.
- /39/ Waller J.: **Press tools and presswork**, Portcullis Press Ltd., Sussex 1978, ISBN 0 861081684

Poděkování:

Děkuji všem, kteří mi poskytli velmi dobré podmínky, cenné rady a připomínky při vypracování mé doktorandské práce, nejvíce pak Doc. Dr. Ing. Petrovi Lenfeldovi, Doc. Ing. Josefu Krebsovi, CSc. a Doc. Ing. Ivě Nové, CSc. Chtěl bych také poděkovat svým rodičům za morální i finanční podporu a neutuchající trpělivost během celého mého doktorandského studia. Zvláštní poděkování patří Mgr. Barboře Hercikové, která mi dodatečně pomáhala s jazykovou a stylistickou úpravou disertační práce.

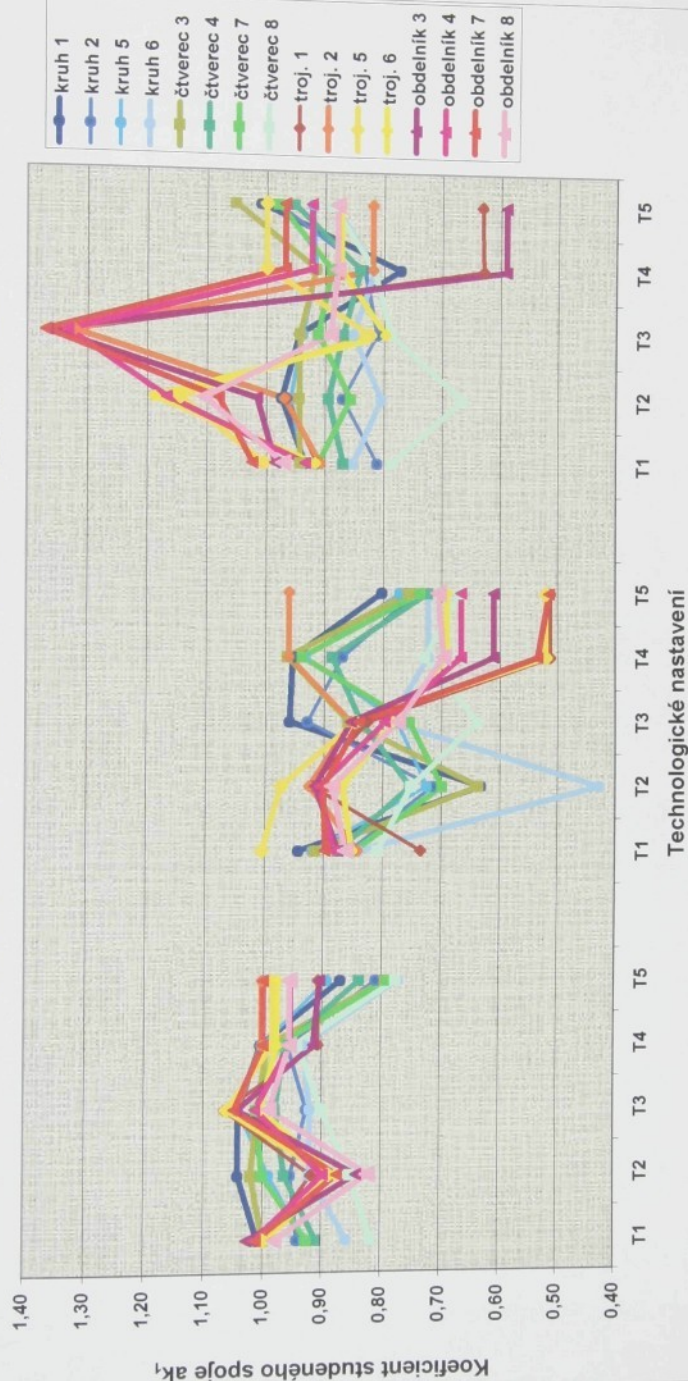
Seznam příloh:

- Příloha 1 : Grafické zobrazení koeficientu ak_1 pro ABS materiál.
- Příloha 2 : Tabulka hodnot ak_1 pro materiál ABS.
- Příloha 3 : Grafické zobrazení koeficientu ak_1 pro PE materiál.
- Příloha 4 : Tabulka hodnot ak_1 pro materiál PE.
- Příloha 5 : Grafické zobrazení koeficientu ak_1 pro PS materiál.
- Příloha 6 : Tabulka hodnot ak_1 pro materiál PS.
- Příloha 7 : Grafické zobrazení koeficientu ak_1 pro PA materiál.
- Příloha 8 : Tabulka hodnot ak_1 pro materiál PA.
- Příloha 9 : Grafické zobrazení rázové houževnatosti pro PS materiál a zvolené faktory.
- Příloha 10 : Grafické zobrazení rázové houževnatosti pro PS materiál a zvolené faktory.
- Příloha 11 : Grafické zobrazení rázové houževnatosti pro PA materiál a zvolené faktory.
- Příloha 12 : Grafické zobrazení rázové houževnatosti pro PA materiál a zvolené faktory.
- Příloha 13 : Grafické zobrazení vrubové houževnatosti pro PE materiál a zvolené faktory.
- Příloha 14 : Grafické zobrazení vrubové houževnatosti pro PE materiál a zvolené faktory.
- Příloha 15 : Grafické zobrazení vrubové houževnatosti pro ABS a zvolené faktory.
- Příloha 16 : Grafické zobrazení vrubové houževnatosti pro ABS a zvolené faktory.

Komentář:

Některé hodnoty koeficientu ak_1 jsou vyšší než jedna. Lze předpokládat, že mechanické hodnoty studeného spoje jsou vyšší než mechanické hodnoty nezatiženého materiálu. Tuto nesrovnalost můžeme zdůvodnit volbou nezatižené pozice (referenční vzorek), která vyplynula z velikosti zkušebních vzorku a výstřiku. Vzhledem k tomu, že tato pozice je v blízkosti vtoku, nechá se předpokládat, že lokální vnitřní stav tohoto vzorku bude pro některé materiály a tvary horší než v místech vzdálenějších a zatížených SP. Přesto zbývající hodnoty koeficientu ak_1 odpovídají běžně měřitelnému snížení mechanických hodnot, jak bylo ukázáno na obr. 81.

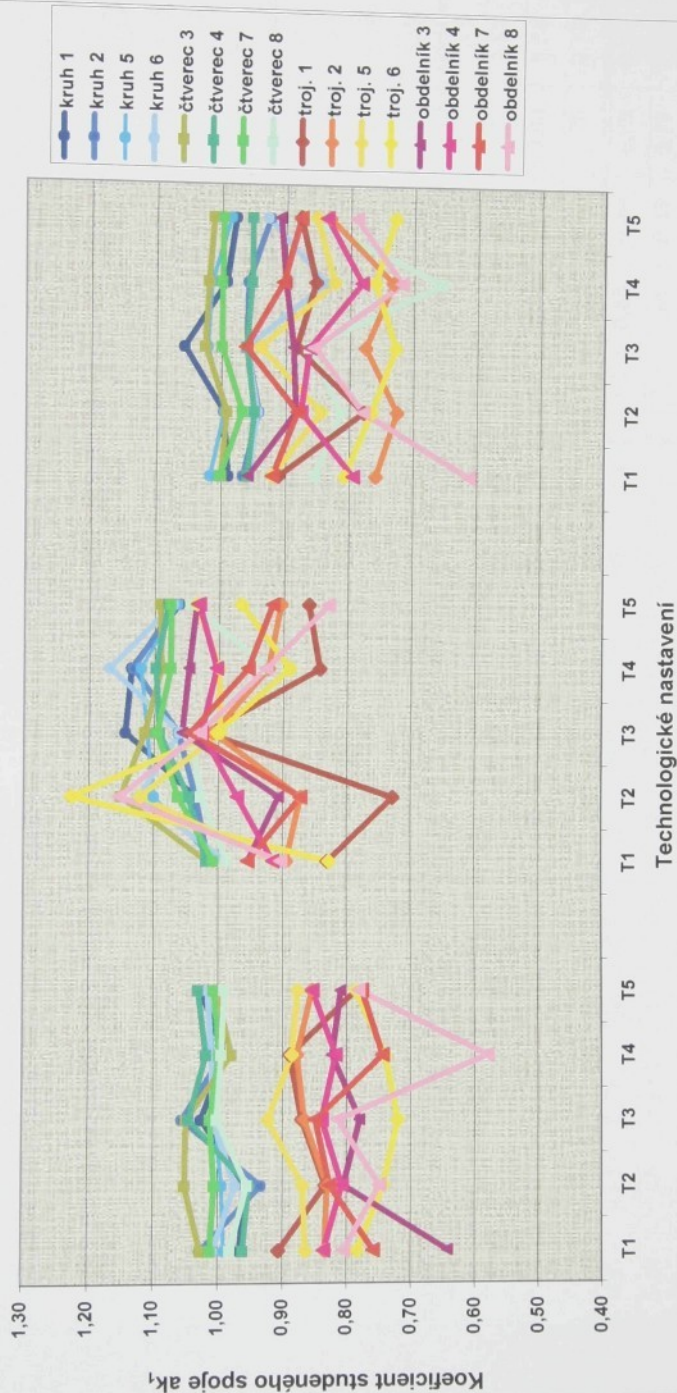
Porovnání koeficientu SP (ak_1) studeného spoje pro ABS



Příloha 1 : Grafické zobrazení koeficientu ak_1 pro materiál ABS.

Příloha 2 : Tabulka hodnot ak_1 pro materiál ABS.

ABS	VELIKOST A					VELIKOST B					VELIKOST C				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
KOEFIČIENT ak_1															
kruh 1	1,01	1,04	1,04	1,00	0,87	0,94	0,63	0,96	0,95	0,80	0,93	0,97	0,94	0,77	1,01
kruh 2	0,94	0,95	0,93	0,96	0,81	0,86	0,72	0,93	0,87	0,75	0,81	0,87	0,81	0,83	0,98
kruh 5	0,93	0,99	1,04	1,00	0,89	0,92	0,72	0,78	0,93	0,77	0,94	0,96	0,94	0,92	0,92
kruh 6	0,86	0,92	0,92	0,93	0,77	0,84	0,43	0,79	0,72	0,72	0,85	0,81	0,85	0,82	0,88
čtverec 3	1,00	1,02	1,01	0,99	0,79	0,91	0,64	0,86	0,96	0,76	0,94	0,94	0,94	0,92	1,05
čtverec 4	0,91	0,96	0,98	0,96	0,84	0,88	0,75	0,84	0,89	0,72	0,87	0,89	0,87	0,84	0,95
čtverec 7	0,93	1,00	1,01	0,97	0,79	0,85	0,70	0,76	0,94	0,74	0,91	0,86	0,91	0,89	0,98
čtverec 8	0,82	0,85	0,90	0,94	0,78	0,81	0,75	0,64	0,73	0,67	0,79	0,67	0,79	0,82	0,89
troj. 1	1,00	0,92	1,06	0,91	0,91	0,73	0,92	0,83	0,51	0,51	0,91	0,97	1,32	0,63	0,63
troj. 2	1,00	0,89	1,04	1,00	1,00	0,84	0,93	0,86	0,96	0,96	0,91	0,97	1,32	0,82	0,82
troj. 5	1,00	0,89	1,06	0,98	0,98	1,00	0,97	0,85	0,52	0,52	1,00	1,15	0,82	1,00	1,00
troj. 6	1,00	0,88	1,00	0,98	0,98	0,85	0,87	0,78	0,69	0,69	0,92	1,19	0,80	0,87	0,87
obdélník 3	1,03	0,84	1,04	0,91	0,90	0,88	0,92	0,85	0,61	0,61	0,98	1,02	1,37	0,59	0,59
obdélník 4	1,01	0,90	1,01	0,95	0,95	0,88	0,91	0,80	0,67	0,67	0,93	1,17	1,33	0,92	0,92
obdélník 7	1,01	0,87	1,05	1,00	1,00	0,90	0,90	0,84	0,53	0,51	1,02	1,08	1,37	0,97	0,97
obdélník 8	0,98	0,82	0,99	0,96	0,96	0,86	0,89	0,77	0,70	0,71	0,97	1,10	0,89	0,88	0,88

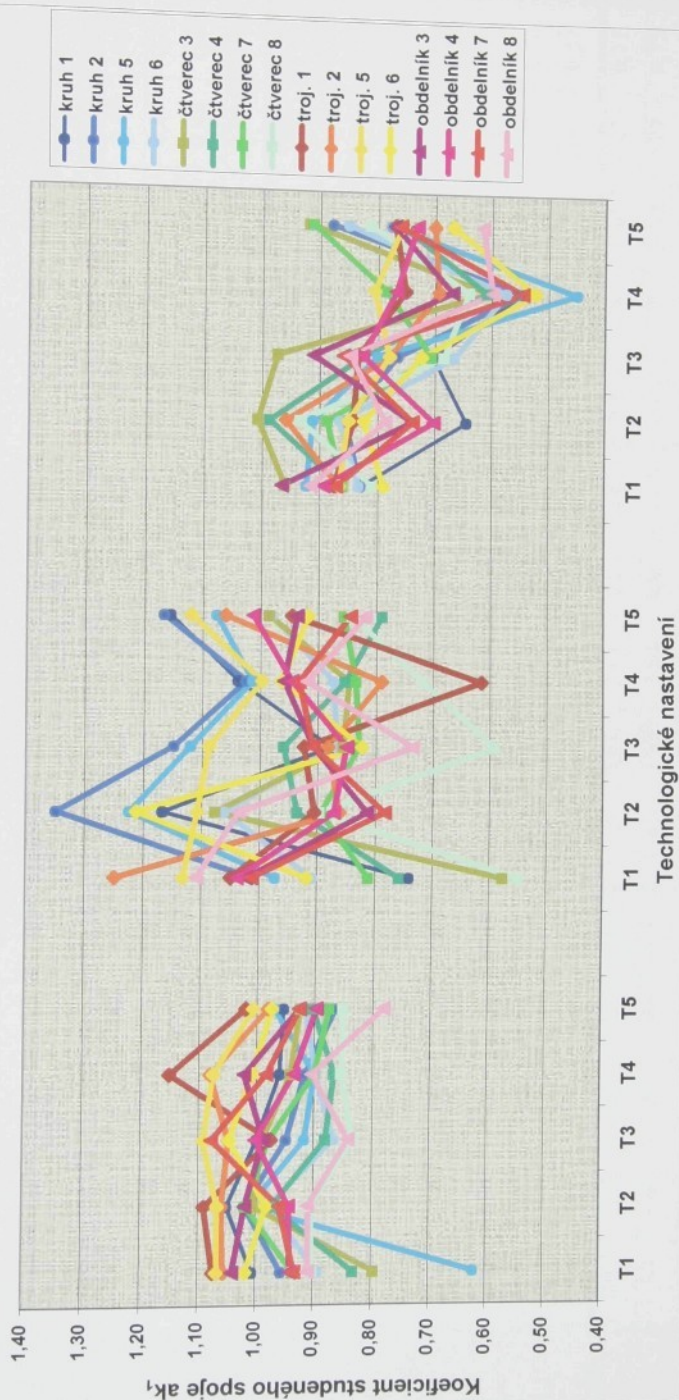


Príloha 3 : Grafické zobrazení koeficientu α_1 pro materiál PE.

Příloha 4 : Tabulka hodnot ak_1 pro materiál PE.

PE	VELIKOST A					VELIKOST B					VELIKOST C				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
KOEFCIENT ak_1															
kruh 1	0,97	0,96	1,03	0,99	1,03	1,02	1,04	1,14	1,14	1,06	0,99	1,00	1,06	0,99	0,98
kruh 2	1,03	0,93	1,06	0,99	1,00	1,01	1,03	1,06	1,13	1,07	0,97	0,94	0,96	0,96	0,92
kruh 5	0,99	0,99	1,00	1,01	1,01	1,01	1,10	1,11	1,12	1,06	1,02	1,00	1,02	1,01	0,98
kruh 6	1,01	0,97	1,01	1,01	1,02	0,99	1,12	1,06	1,17	1,07	0,96	0,94	0,96	0,84	0,93
čtverec 3	1,03	1,05	1,05	0,98	1,00	1,02	1,15	1,11	1,09	1,09	1,00	0,99	1,02	1,02	1,01
čtverec 4	0,96	0,95	1,04	1,02	1,03	1,02	1,05	1,09	1,10	1,08	0,96	0,95	0,96	0,95	0,95
čtverec 7	1,01	1,01	1,01	1,00	1,01	1,01	1,06	1,10	1,07	1,08	1,00	0,97	1,00	1,00	1,00
čtverec 8	0,98	0,95	1,00	0,99	0,99	0,99	1,03	1,04	0,92	1,04	0,85	0,81	0,86	0,65	0,87
troj. 1	0,91	0,83	0,87	0,89	0,79	0,83	0,73	1,02	0,84	0,86	0,91	0,78	0,88	0,85	0,88
troj. 2	0,83	0,83	0,87	0,88	0,85	0,89	0,87	1,01	0,92	0,90	0,76	0,73	0,78	0,73	0,83
troj. 5	0,86	0,87	0,92	0,89	0,88	0,91	1,12	1,00	1,00	1,04	0,92	0,85	0,94	0,83	0,85
troj. 6	0,78	0,74	0,72	0,74	0,79	0,83	1,23	1,00	0,89	0,97	0,81	0,77	0,73	0,76	0,73
obdélník 3	0,64	0,81	0,78	0,82	0,81	0,95	0,91	1,06	1,05	1,04	0,96	0,88	0,89	0,90	0,91
obdélník 4	0,84	0,81	0,84	0,82	0,85	0,92	0,97	1,03	1,00	1,03	0,79	0,88	0,86	0,78	0,84
obdélník 7	0,76	0,83	0,85	0,74	0,78	0,95	0,87	1,04	0,95	0,92	0,92	0,88	0,96	0,90	0,88
obdélník 8	0,80	0,75	0,81	0,58	0,78	0,90	1,15	1,03	0,93	0,83	0,61	0,78	0,86	0,72	0,79

Porovnání koeficientu SP (ak₁) studeného spoje pro PS

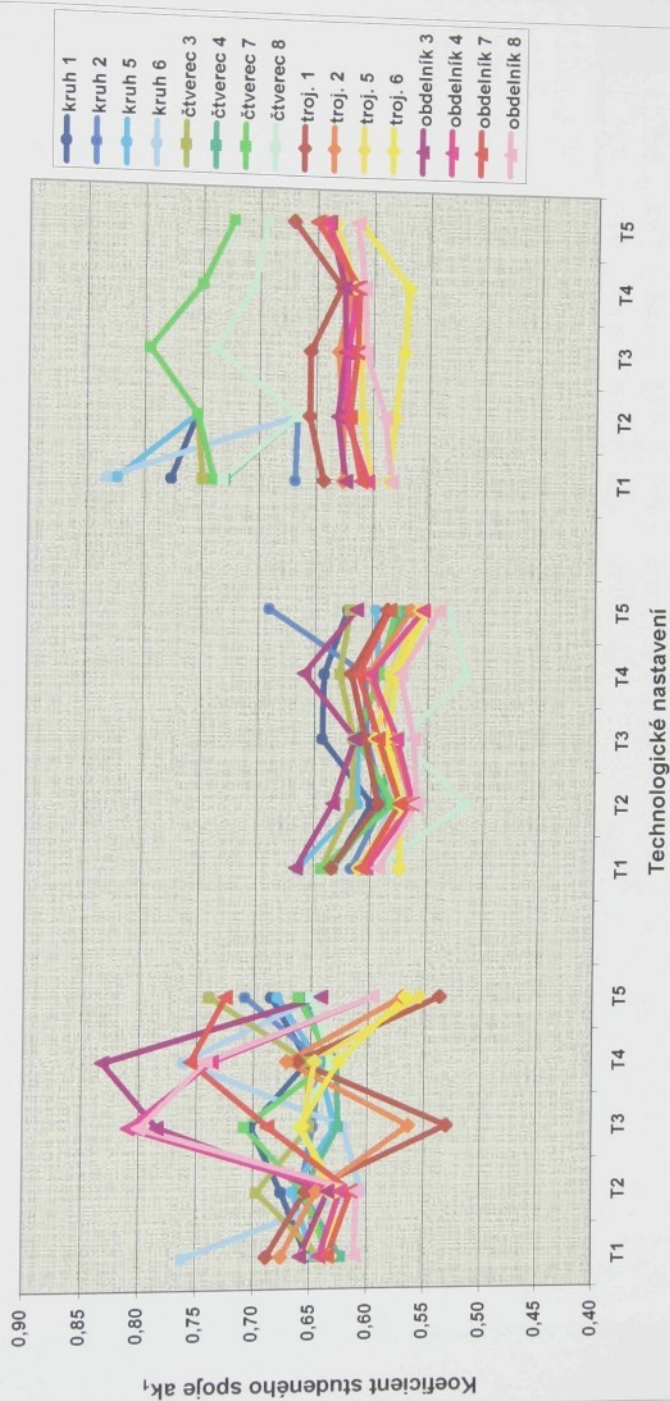


Príloha 5 : Grafické zobrazení koeficientu ak_1 pro materiál PS.

Příloha 6 : Tabulka hodnot ak_1 pro materiál PS.

PS	VELIKOST A					VELIKOST B					VELIKOST C				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
KOEFIČIENT ak_1															
kruh 1	1,01	1,05	1,00	0,96	0,95	0,74	1,17	0,88	1,04	1,16	0,83	0,64	0,70	0,55	0,76
kruh 2	0,96	1,02	0,95	0,92	0,86	1,01	1,35	1,15	1,03	1,17	0,83	0,86	0,77	0,55	0,88
kruh 5	0,62	1,01	0,92	0,90	0,97	0,97	1,22	1,12	1,01	1,08	0,92	0,91	0,80	0,45	0,78
kruh 6	0,89	0,98	0,87	0,90	0,92	0,91	1,06	0,87	0,87	0,98	0,83	0,87	0,67	0,58	0,85
čtverec 3	0,80	1,00	0,99	0,94	0,93	0,58	1,08	0,86	0,85	0,99	0,96	1,01	0,97	0,61	0,92
čtverec 4	0,83	0,97	0,88	0,87	0,90	0,76	0,94	0,96	0,85	0,79	0,86	0,99	0,83	0,61	0,76
čtverec 7	0,93	1,02	0,98	0,90	0,87	0,81	0,89	0,83	0,84	0,86	0,86	0,89	0,71	0,79	0,91
čtverec 8	0,90	0,91	0,83	0,85	0,85	0,55	0,90	0,59	0,72	0,84	0,81	0,93	0,68	0,64	0,81
troj. 1	1,07	1,09	0,97	1,15	1,02	1,05	0,91	0,92	0,62	0,95	0,87	0,84	0,84	0,75	0,77
troj. 2	1,06	1,06	1,05	1,08	0,98	1,25	0,86	0,88	0,79	1,06	0,87	0,96	0,78	0,69	0,70
troj. 5	1,07	1,07	1,09	1,08	1,01	1,13	1,11	1,09	1,00	1,12	0,87	0,85	0,78	0,81	0,76
troj. 6	1,02	0,98	1,05	1,01	0,97	0,92	1,21	0,82	0,96	0,92	0,79	0,82	0,72	0,52	0,67
obdélník 3	1,04	1,02	0,99	1,02	0,93	1,02	0,81	0,91	0,96	0,94	0,97	0,74	0,91	0,67	0,77
obdélník 4	0,94	0,94	1,00	0,94	0,90	1,04	0,87	0,85	0,95	1,01	0,89	0,70	0,83	0,77	0,73
obdélník 7	0,93	0,96	1,08	0,98	0,93	1,01	0,78	0,91	0,93	0,85	0,87	0,74	0,86	0,55	0,76
obdélník 8	0,91	0,91	0,84	0,90	0,78	1,11	1,04	0,74	0,92	0,82	0,92	0,79	0,85	0,60	0,62

Porovnání koeficientu SP (ak_1) studeného spoje pro PA

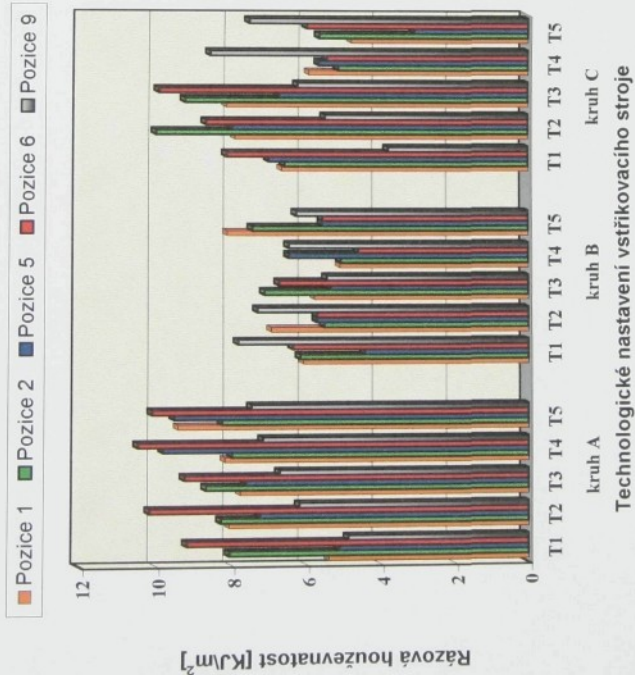


Příloha 7 : Grafické zobrazení koeficientu ak_1 pro materiál PA.

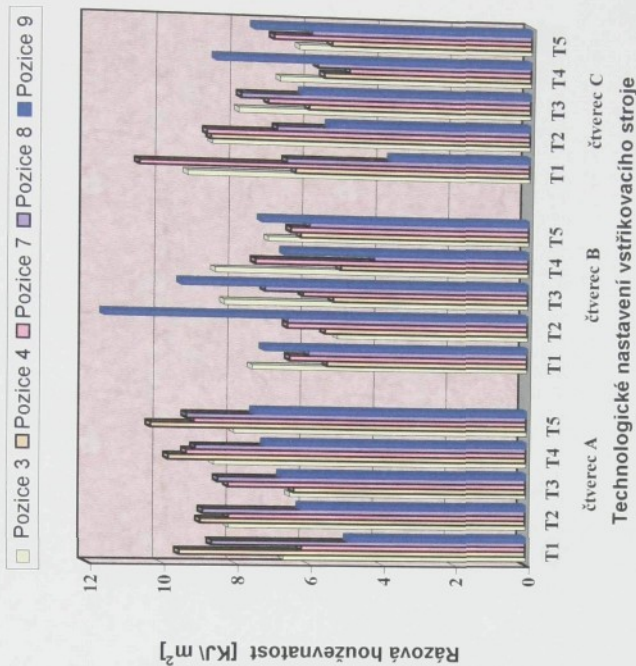
Príloha 8 : Tabuľka hodnôt a_k pro materiál PA.

PA	VELIKOST A					VELIKOST B					VELIKOST C				
	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5
KOEFIČIENT a_{k1}															
kruh 1	0,65	0,68	0,70	0,65	0,69	0,63	0,60	0,64	0,64	0,62	0,78	0,75	0,80	0,75	0,72
kruh 2	0,63	0,66	0,65	0,64	0,71	0,62	0,59	0,60	0,61	0,69	0,67	0,67	0,74	0,70	0,69
kruh 5	0,65	0,67	0,63	0,64	0,68	0,66	0,61	0,61	0,59	0,60	0,82	0,75	0,80	0,75	0,72
kruh 6	0,76	0,60	0,62	0,76	0,64	0,60	0,58	0,59	0,58	0,57	0,83	0,67	0,74	0,70	0,69
čtverec 3	0,64	0,70	0,65	0,65	0,74	0,64	0,62	0,62	0,63	0,62	0,75	0,75	0,80	0,75	0,72
čtverec 4	0,62	0,66	0,63	0,63	0,66	0,63	0,59	0,58	0,60	0,57	0,73	0,67	0,74	0,70	0,69
čtverec 7	0,63	0,66	0,71	0,63	0,66	0,64	0,58	0,61	0,59	0,58	0,74	0,75	0,80	0,75	0,72
čtverec 8	0,63	0,63	0,66	0,63	0,65	0,59	0,52	0,57	0,52	0,53	0,73	0,67	0,74	0,70	0,69
troj. 1	0,69	0,65	0,53	0,66	0,54	0,63	0,59	0,61	0,62	0,59	0,64	0,66	0,66	0,63	0,67
troj. 2	0,68	0,64	0,56	0,67	0,57	0,61	0,56	0,58	0,60	0,57	0,63	0,63	0,63	0,62	0,64
troj. 5	0,66	0,63	0,66	0,65	0,55	0,61	0,57	0,60	0,58	0,56	0,60	0,61	0,61	0,62	0,63
troj. 6	0,63	0,63	0,66	0,63	0,57	0,57	0,57	0,59	0,58	0,55	0,59	0,58	0,57	0,57	0,61
obdélník 3	0,66	0,63	0,78	0,83	0,64	0,66	0,63	0,61	0,66	0,61	0,62	0,63	0,62	0,63	0,64
obdélník 4	0,64	0,62	0,81	0,74	0,60	0,60	0,56	0,58	0,60	0,55	0,60	0,62	0,62	0,62	0,64
obdélník 7	0,63	0,61	0,69	0,76	0,73	0,61	0,57	0,59	0,61	0,58	0,61	0,62	0,61	0,61	0,65
obdélník 8	0,61	0,61	0,80	0,74	0,60	0,59	0,56	0,56	0,57	0,54	0,58	0,59	0,61	0,61	0,61

Vliv zvolených faktorů na rázovou houževnatost studeného spoje [PS-kruh (A,B,C)]



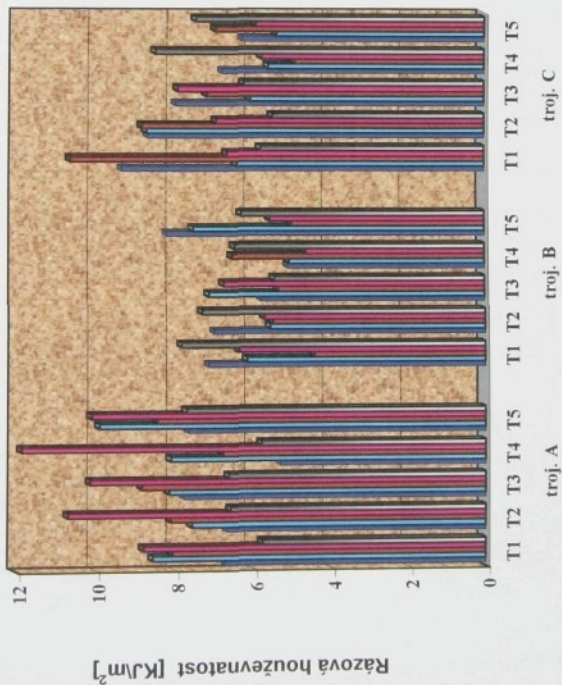
Vliv zvolených faktorů na rázovou houževnatost studeného spoje [PS-čtverec (A,B,C)]



Příloha 9 : Grafické zobrazení rázové houževnatosti pro PS materiál a zvolené faktory.

Vliv zvolených faktorů na rázovou houževnatost studeného spoje [PS-trojúhelník (A,B,C)]

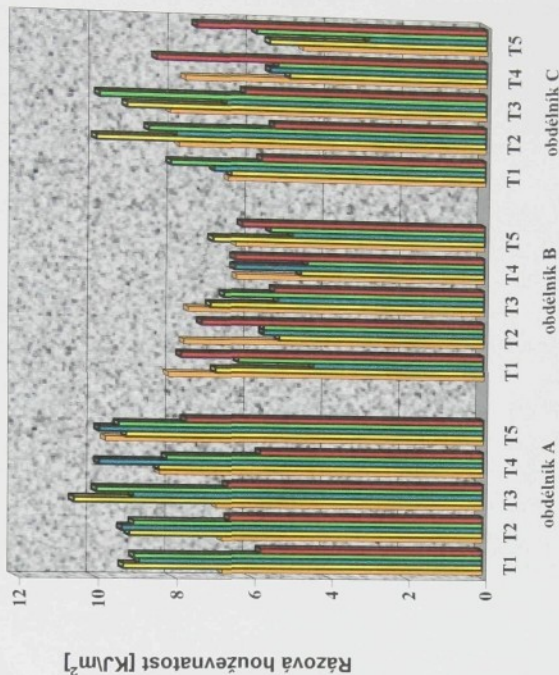
■ Pozice 1 ■ Pozice 2 ■ Pozice 5 ■ Pozice 6 ■ Pozice 9



Technologické nastavení vstřikovacího stroje

Vliv zvolených faktorů na rázovou houževnatost studeného spoje [PS-obdélník (A,B,C)]

■ Pozice 3 ■ Pozice 4 ■ Pozice 7 ■ Pozice 8 ■ Pozice 9

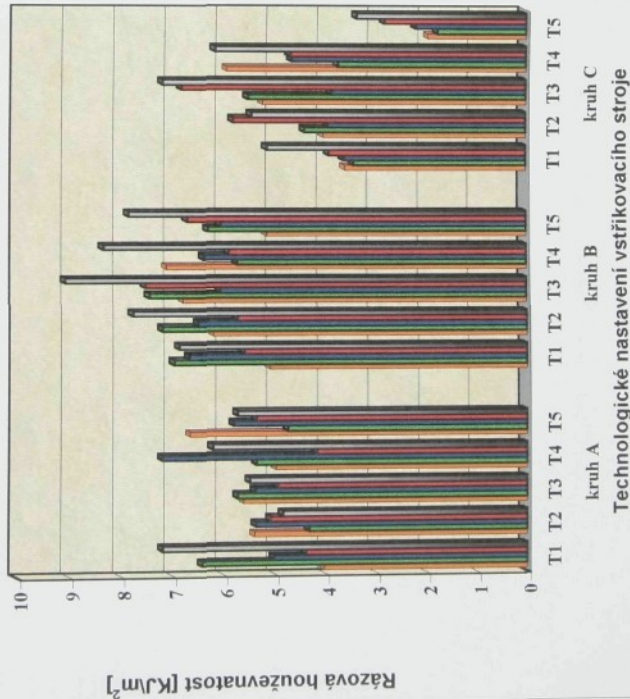


Technologické nastavení vstřikovacího stroje

Příloha 10 : Grafické zobrazení rázové houževnatosti pro PS materiál a zvolené faktory.

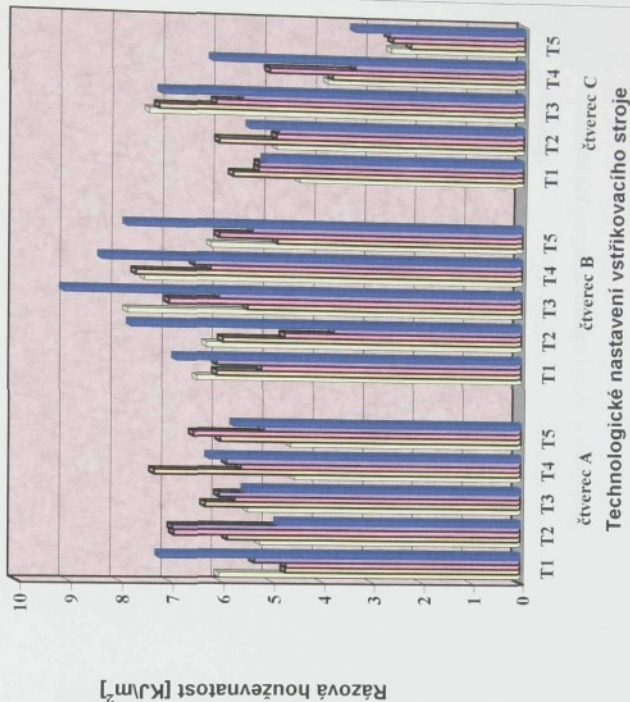
Vliv zvolených faktorů na vrubovou houževnatost studeného spoje [PA-kruh (A,B,C)]

■ Pozice 1 ■ Pozice 2 ■ Pozice 5 ■ Pozice 6 ■ Pozice 9



Vliv zvolených faktorů na rázovou houževnatost studeného spoje [PA-čtverec (A,B,C)]

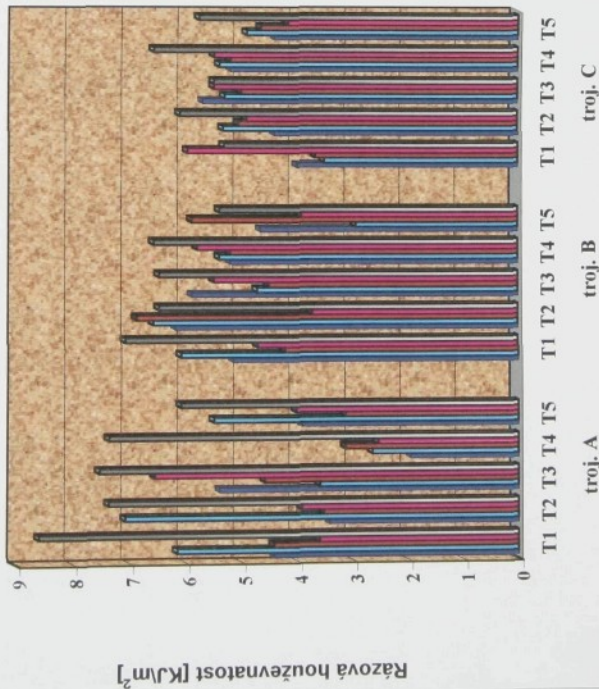
■ Pozice 3 ■ Pozice 4 ■ Pozice 7 ■ Pozice 8 ■ Pozice 9



Příloha 11 : Grafické zobrazení rázové houževnatosti pro PA materiál a zvolené faktory.

Vliv zvolených faktorů na vrubovou houževnatost studeného spoje [PA-trojúhelník (A,B,C)]

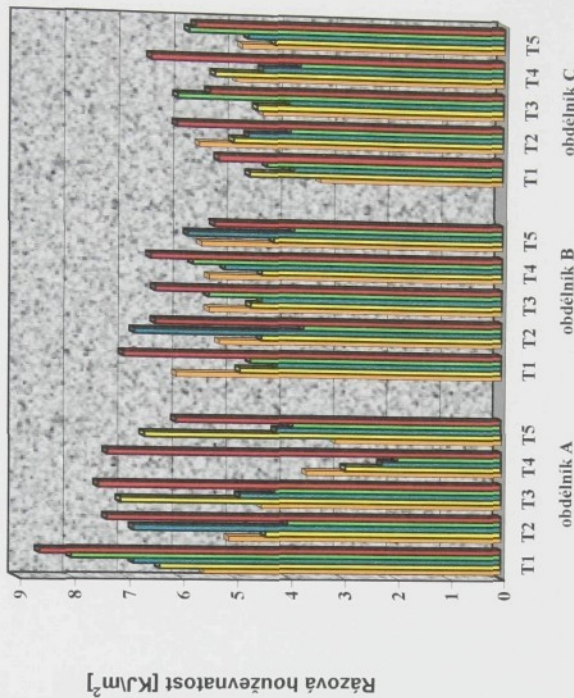
■ Pozice 1 ■ Pozice 2 ■ Pozice 3 ■ Pozice 4 ■ Pozice 5 ■ Pozice 6 ■ Pozice 7 ■ Pozice 8 ■ Pozice 9



Technologické nastavení vstřikovacího stroje

Vliv zvolených faktorů na vrubovou houževnatost studeného spoje [PA-obdélník (A,B,C)]

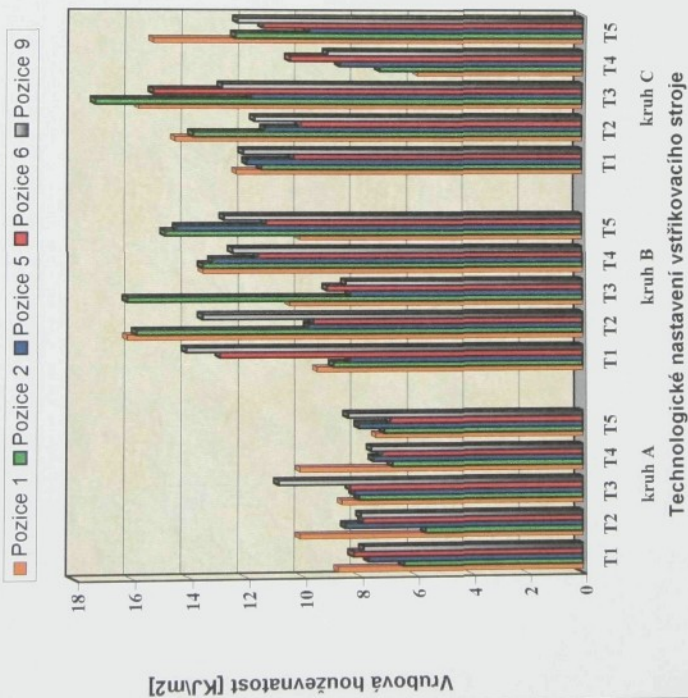
■ Pozice 3 ■ Pozice 4 ■ Pozice 7 ■ Pozice 8 ■ Pozice 9



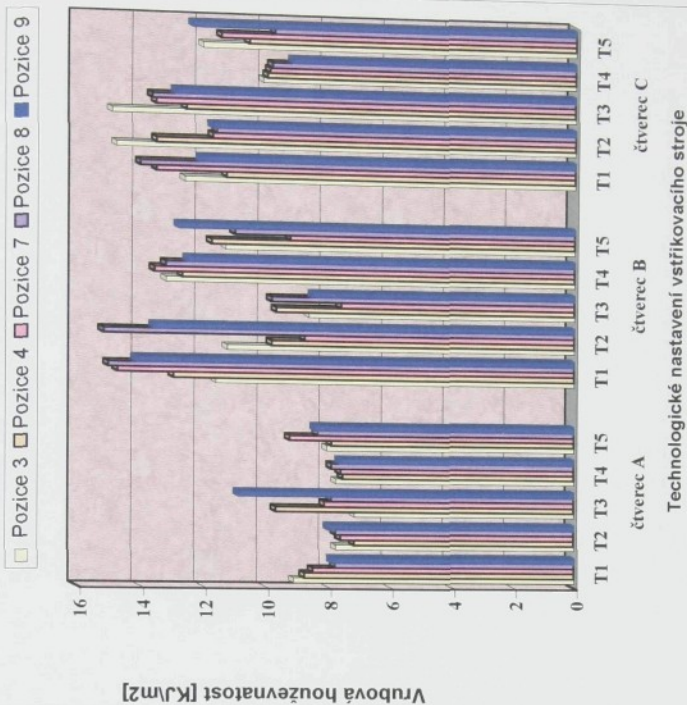
Technologické nastavení vstřikovacího stroje

Príloha 12 : Grafické zobrazení rázové houževnatosti pro PA materiál a zvolené faktory.

Vliv zvolených faktorů na vrubovou houževnatost studeného spoje [PE-kruh (A,B,C)]

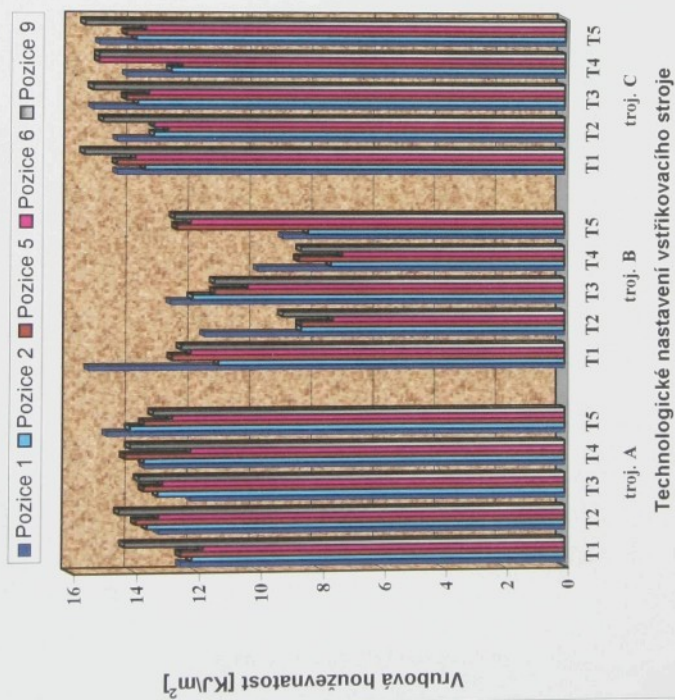


Vliv zvolených faktorů na vrubovou houževnatost studeného spoje [PE-čtverec (A,B,C)]

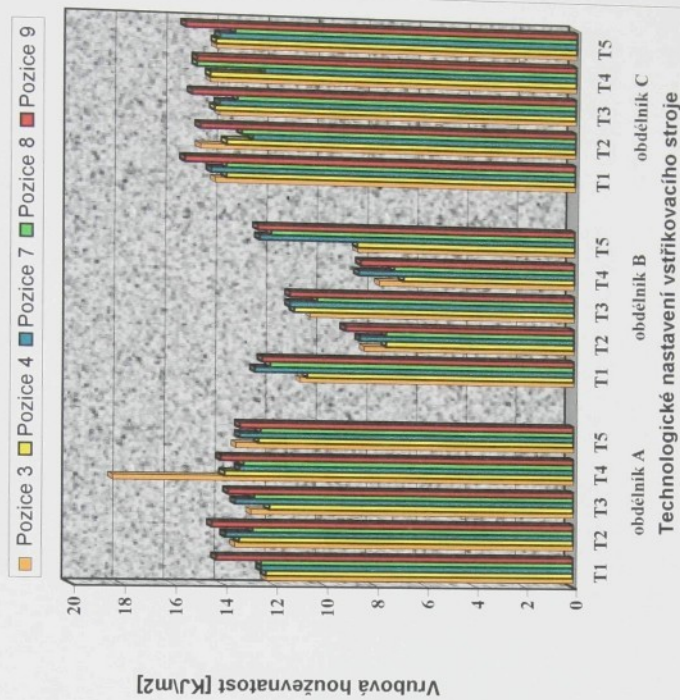


Příloha 13 : Grafické zobrazení vrubové houževnatosti pro PE materiál a zvolené faktory.

Vliv zvolených faktorů na vrubovou houževnatost studeného spoje [PE-trojúhelník (A,B,C)]



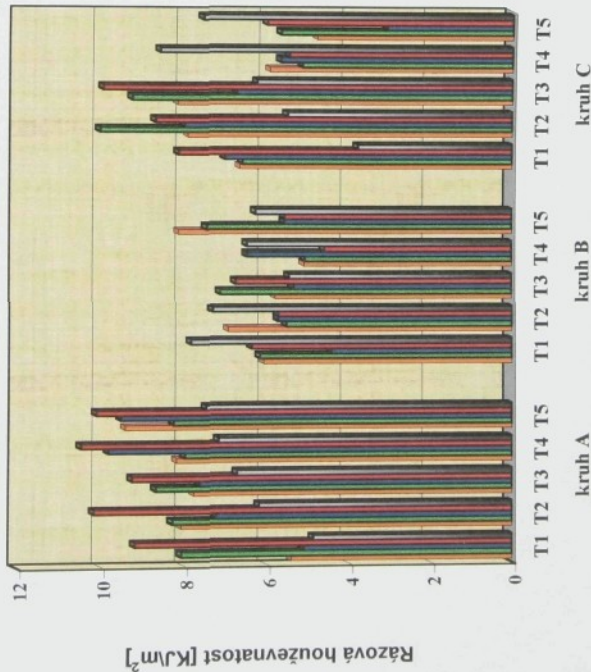
Vliv zvolených faktorů na vrubovou houževnatost studeného spoje [PE-obdélník (A,B,C)]



Příloha 14 : Grafické zobrazení vrubové houževnatosti pro PE materiál a zvolené faktory.

Vliv zvolených faktorů na rázovou houževnatost studeného spoje [ABS-kruh (A,B,C)]

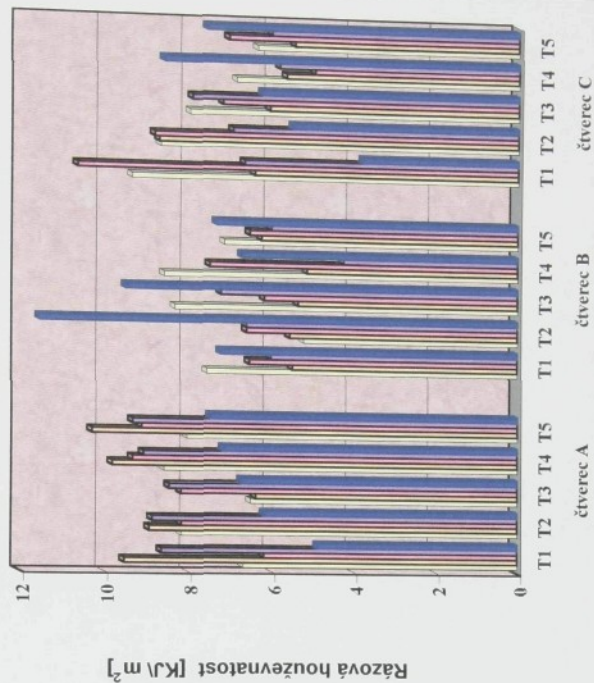
■ Pozice 1
 ■ Pozice 2
 ■ Pozice 5
 ■ Pozice 6
 ■ Pozice 9



Technologické nastavení vstřikovacího stroje

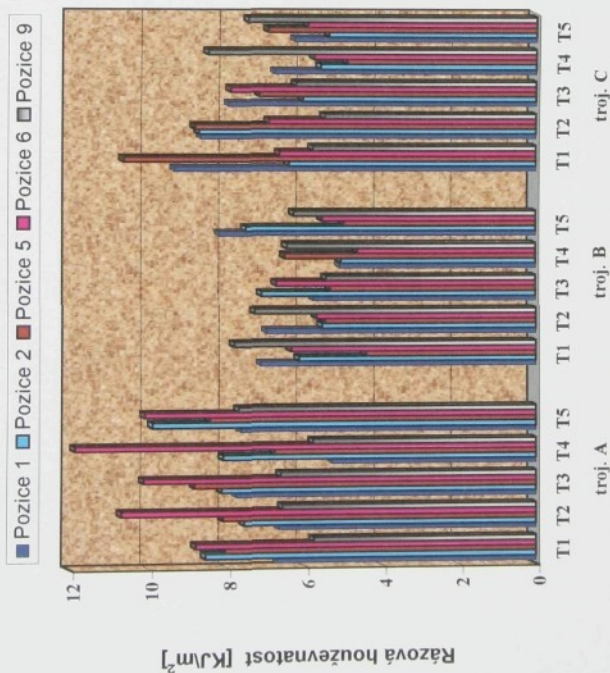
Vliv zvolených faktorů na rázovou houževnatost studeného spoje [ABS-čtverec (A,B,C)]

■ Pozice 3
 ■ Pozice 4
 ■ Pozice 7
 ■ Pozice 8
 ■ Pozice 9



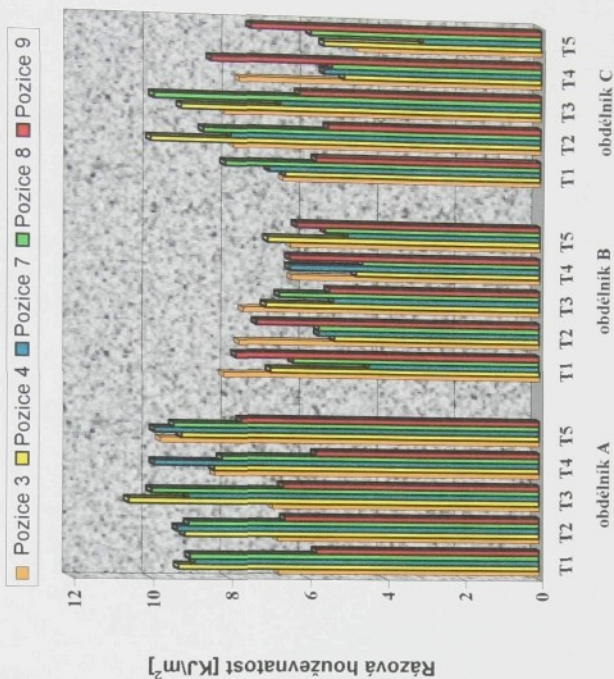
Technologické nastavení vstřikovacího stroje

Vliv zvolených faktorů na rázovou houževnatost studeného spoje [ABS-trojúhelník (A,B,C)]



Technologické nastavení vstřikovacího stroje

Vliv zvolených faktorů na rázovou houževnatost studeného spoje [ABS-obdélník (A,B,C)]



Technologické nastavení vstřikovacího stroje

