

Návrh fixačního konceptu pro FR4 desky

Bc. Radek Machuča

Diplomová práce
2013

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Radek Machuča**

Osobní číslo: **T12677**

Studijní program: **N3909 Procesní inženýrství**

Studijní obor: **Konstrukce technologických zařízení**

Forma studia: **prezenční**

Téma práce: **Návrh fixačního konceptu pro FR4 desky**

Zásady pro vypracování:

1. Literární přehled
2. Návrh upevňovacích elementů
3. Experiment
4. Vytvoření numerického modelu
5. Ověření a vyhodnocení modelu

Rozsah diplomové práce:
Rozsah příloh:
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:
Dle doporučení vedoucího DP

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jakub Javořík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství
Datum zadání diplomové práce: **10. února 2014**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**

Ve Zlíně dne 10. února 2014


doc. Ing. Roman Čermák, Ph.D.
děkan




prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D.
ředitel ústavu

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby ¹⁾;
- beru na vědomí, že diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen na příslušném ústavu Fakulty technologické UTB ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3 ²⁾;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 ³⁾ odst. 2 a 3 mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Ve Zlíně 23. dubna 2014

.....

¹⁾ zákon č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, § 47 Zveřejňování závěrečných prací:

(1) Vysoká škola nevdělečně zveřejňuje disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce, u kterých proběhla obhajoba, včetně posudků oponentů a výsledku obhajoby prostřednictvím databáze kvalifikačních prací, kterou spravuje. Způsob zveřejnění stanoví vnitřní předpis vysoké školy.

(2) Disertační, diplomové, bakalářské a rigorózní práce odevzdané uchazečem k obhajobě musí být též nejméně pět pracovních dnů před konáním obhajoby zveřejněny k nahlížení veřejnosti v místě určeném vnitřním předpisem vysoké školy nebo není-li tak určeno, v místě pracoviště vysoké školy, kde se má konat obhajoba práce. Každý si může ze zveřejněné práce pořizovat na své náklady výpisy, opisy nebo rozmnoženiny.

(3) Platí, že odevzdáním práce autor souhlasí se zveřejněním své práce podle tohoto zákona, bez ohledu na výsledek obhajoby.

²⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 35 odst. 3:

(3) Do práva autorského také nezasahuje škola nebo školské či vzdělávací zařízení, užije-li nikoli za účelem přímého nebo nepřímého hospodářského nebo obchodního prospěchu k výuce nebo k vlastní potřebě dílo vytvořené žákem nebo studentem ke splnění školních nebo studijních povinností vyplývajících z jeho právního vztahu ke škole nebo školskému či vzdělávacího zařízení (školní dílo).

³⁾ zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, § 60 Školní dílo:

(1) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení mají za obvyklých podmínek právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla (§ 35 odst. 3). Odpírá-li autor takového díla udělit svolení bez vážného důvodu, mohou se tyto osoby domáhat nahrazení chybějícího projevu jeho vůle u soudu. Ustanovení § 35 odst. 3 zůstává nedotčeno.

(2) Není-li sjednáno jinak, může autor školního díla své dílo užít či poskytnout jinému licenci, není-li to v rozporu s oprávněnými zájmy školy nebo školského či vzdělávacího zařízení.

(3) Škola nebo školské či vzdělávací zařízení jsou oprávněny požadovat, aby jim autor školního díla z výtěžku jím dosaženého v souvislosti s užitím díla či poskytnutím licence podle odstavce 2 přiměřeně přispěl na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložily, a to podle okolností až do jejich skutečné výše; přitom se přihlédne k výši výtěžku dosaženého školou nebo školským či vzdělávacím zařízením z užití školního díla podle odstavce 1.

ABSTRAKT

Cílem této diplomové práce je návrh fixačního elementu FR4 desky a následně vytvoření parametrického modelu.

Teoretická část se stručně zabývá spojováním plastových výrobků, technologií vstřikování, deskami plošných spojů. Jako dalším se zabývá popisem prostorové napjatosti a deformace v plastových výrobcích a popisem FEM metody výpočtu.

Praktická část je tvořena dvěma hlavními částmi. V první části je popsáno vytvoření FEM modelu, jeho okrajové podmínky a zatížení a materiály, které byly použity pro analýzu v programu Catia V5R18. Dále je vysvětlen způsob sestavení parametrického modelu, určení závislých a nezávislých veličin. V druhé části je charakterizován měřicí přípravek pro měření průhybu FR4 desky. Následně je popsán způsob měření a vyhodnocení výsledků dle normy IPC/JEDEC-9704.

Klíčová slova: Deska plošných spojů, fixační element, parametrické modelování, Von Misesovo napětí, FEM analýza, norma IPC/JEDEC-9704.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to design the fixation element of the FR4 board followed by creation of parametric model.

The theoretical part deals with assembling technique of plastic products, injection molding technology and description of printed circuit boards. As further deals with description of stress and deformation in plastic products and description of FEM calculation method.

The practical part consists of two main parts. The first part describes how to create FEM model, its boundary conditions and loads and materials, which have been used for the analysis in CATIA V5R18. Further describes how to create a parametric model, determining of dependent and independent variables. The second section describes the measurement device for measuring deflection of the FR4 board. Subsequently describes how to measure and evaluate the results according to IPC/JEDEC-9704 standard.

Keywords: Printed circuit boards, fixation element, parametric design, Von Mises stress, FEM analysis, IPC/JEDEC-9704 standard

Touto cestou bych chtěl poděkovat za odborné vedení, cenné připomínky a návrhy k vypracování svému vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jakubu Javoříkovi, Ph.D. Poděkování patří také Ing. Františkovi Palackému. Za možnost provedení diplomové práce děkuji firmě Varroc Lighting Systems, s.r.o.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně 23. dubna 2014

.....

OBSAH

ÚVOD	12
I. TEORETICKÁ ČÁST	13
1 SPOJOVÁNÍ PLASTOVÝCH VÝROBKŮ	14
1.1 ROZEBÍRATELNÉ SPOJE	14
1.1.1 Nalisování.....	14
1.1.2 Šroubové spoje.....	16
1.1.3 Samořezné šrouby.....	17
1.1.4 Pružné spoje.....	18
1.2 NEROZEBÍRATELNÉ SPOJE	21
1.2.1 Svařování	22
1.2.2 Spojování pomocí razníku.....	27
1.2.3 Lepení.....	28
2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ	30
2.1 VSTŘIKOVACÍ STROJ	30
2.1.1 Vstřikovací jednotka	31
2.1.2 Uzavírací jednotka.....	31
2.1.3 Řídící jednotka	31
2.2 VSTŘIKOVACÍ FORMA	32
2.3 VSTŘIKOVACÍ CYKLUS	32
2.4 HLAVNÍ ZÁSADY KONSTRUKCE VSTŘIKOVANÝCH VÝROBKŮ	33
2.4.1 Tloušťky stěn	33
2.4.2 Zaformovatelnost	34
2.4.3 Úkosy a podkosy	35
2.4.4 Rádiusy.....	35
3 DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ	36
3.1 ROZDĚLENÍ DESEK PLOŠNÝCH SPOJŮ DLE KONSTRUKCE	36
3.1.1 Ohebné desky plošných spojů	36
3.1.2 Neohebné desky plošných spojů.....	37
3.2 FR4 DESKA	39
4 PROSTOROVÁ NAPJATOST A DEFORMACE	40

4.1	ZÁKLADNÍ VZTAHY	40
4.2	ROVNICE ELASTICITY 3D NAPJATOSTI	41
4.3	HOOKŮV ZÁKON V OBJEMOVÉM TVARU- STLAČITELNOST	41
4.4	MĚRNÁ ENERGIE NAPJATOSTI	42
4.5	VON MISESOVO NAPĚTÍ	44
5	SOFTWAREVÁ PODPORA.....	45
5.1	METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	45
5.2	FEM SYSTÉMY	45
6	ODPOROVÉ TENZOMETRY	47
6.1	ZÁKLADNÍ PRINCIP MĚŘENÍ ODPOROVÝMI TENZOMETRY	47
6.2	KOVOVÉ TENZOMETRY	49
6.3	POLOVODIČOVÉ TENZOMETRY	51
II.	PRAKTICKÁ ČÁST	53
7	STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE.....	54
8	NUMERICKÁ ANALÝZA KLIPU	55
8.1	MODELOVÁNÍ KLIPU	55
8.2	MATERIÁLOVÉ VLASTNOSTI.....	57
8.2.1	<i>Kopolymer akrylonitril butadien styren (ABS)</i>	57
8.2.2	<i>Polymetylmetakrylát (PMMA)</i>	58
8.2.3	<i>Polykarbonát (PC)</i>	60
8.2.4	<i>Směs PC a ABS</i>	62
8.3	OKRAJOVÉ PODMÍNKY A ZATÍŽENÍ	64
8.4	TVORBA SÍTĚ	65
9	VÝPOČET.....	67
9.1	VÝPOČET- TERLURAN HH-112.....	69
9.2	VÝPOČET- ALTUGLAS V 825 T.....	71
9.3	VÝPOČET- BAYBLEND T80 XG.....	73
9.4	VÝPOČET- CYCOLOY C1100 HF.....	75
9.5	VÝPOČET- LUSTRAN ABS H802.....	77
9.6	VÝPOČET- MAKROLON 1260 A LEXAN LS1.....	79
9.7	VÝPOČET- MAKROLON AL2447 A MAKROLON AL2647.....	81

10	TVORBA PARAMETRICKÉHO MODELU.....	83
10.1	POSTUP VYTVOŘENÍ KLIPU O POŽADOVANÝCH ROZMĚRECH	86
11	NORMA IPC/JEDEC-9704	89
11.1	URČENÍ DEFORMAČNÍCH LIMITŮ	90
11.2	LIMIT DEFORMACE DLE RYCHLOSTI DEFORMACE	90
12	NÁVRH MĚŘÍČÍHO PŘÍPRAVKU	92
12.1	ROZBOR A ČÁSTI KONSTRUKČNÍHO ŘEŠENÍ	92
12.1.1	<i>Podstava.....</i>	92
12.1.2	<i>Krajní zobáček.....</i>	94
12.1.3	<i>Přítlačná deska</i>	95
12.1.4	<i>Střední zobáček.....</i>	96
13	MĚŘENÍ PRŮHYBU FR4 DESKY	97
13.1	PŘÍSTROJOVÉ A PROGRAMOVÉ VYBAVENÍ.....	98
13.2	POSTUP PŘI MĚŘENÍ.....	99
14	VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ	100
14.1	PRŮHYB 10 MM.....	100
14.1.1	<i>Tloušťka $h = 1,3$ mm.....</i>	100
14.1.2	<i>Tloušťka $h = 1,6$ mm.....</i>	102
14.2	PRŮHYB 20 MM.....	103
14.2.1	<i>Šířka $h = 1,3$ mm.....</i>	103
14.2.2	<i>Šířka $h = 1,6$ mm.....</i>	105
14.3	PRŮHYB 30 MM.....	106
14.3.1	<i>Šířka $h = 1,3$ mm.....</i>	106
14.3.2	<i>Šířka $h = 1,6$ mm.....</i>	108
14.4	PRŮHYB 40 MM.....	109
14.4.1	<i>Šířka $h = 1,3$ mm.....</i>	109
14.4.2	<i>Šířka $h = 1,6$ mm.....</i>	111
14.5	PRŮHYB 50 MM.....	112
14.5.1	<i>Šířka $h = 1,3$ mm.....</i>	112
14.5.2	<i>Šířka $h = 1,6$ mm.....</i>	114
	ZÁVĚR	116

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	117
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	119
SEZNAM OBRÁZKŮ	121
SEZNAM TABULEK.....	125
SEZNAM PŘÍLOH.....	127

ÚVOD

Žijeme v době, kdy výpočetní technika zaujímá v našem životě velmi významné místo. Ve valné většině jde o využití výpočetní techniky v praxi, konkrétně v automobilovém průmyslu, kdy daný software pomáhá konstruktérovi s návrhem budoucího výrobku. Využití softwaru nám také napomáhá zamezení vzniku chyb na výrobku a predikci jeho chování.

V diplomové práci byl použit pro návrh fixačního elementu modul Generative structural analysis design softwaru Catia V5R18 , který využívá metod konečných prvků, slouží k simulaci průběhů napětí, deformací, vlastních frekvencí aj. Princip FEM spočívá v diskretizaci spojitého kontinua do určitého (konečného) počtu prvků, přičemž zjišťované parametry jsou určovány v jednotlivých uzlových bodech. Metoda je užívána především pro kontrolu již navržených zařízení, nebo pro stanovení kritického místa konstrukce nebo prvku. Ačkoliv jsou principy této metody známy již delší dobu, k jejímu masovému využití došlo teprve s nástupem moderní výpočetní techniky.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 SPOJOVÁNÍ PLASTOVÝCH VÝROBKŮ

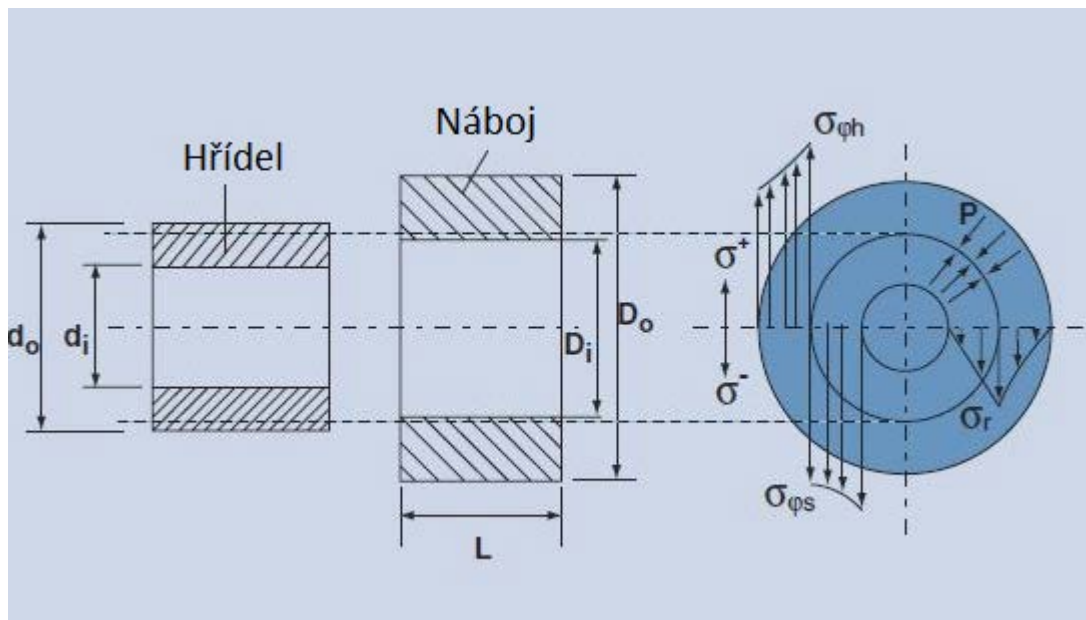
Výrobky vyrobené z plastů mohou být spojeny různými způsoby a mohou být také spojovány i s různými materiály jakou jsou kovy, sklo nebo keramika. Obecně se tyto spoje rozdělují do dvou skupin, a to na spoje rozebíratelné a na nerozebíratelné. Je potřeba myslet na to, jakým způsobem bude díl sestavován, a podle toho se rozhodnout, který způsob spojení je pro danou aplikaci nejvhodnější.

1.1 Rozebíratelné spoje

Rozebíratelné spoje jsou používány u výrobků, u kterých je potřeba opakovaně rozebrat dané spojení, aniž by došlo k poškození jednotlivých částí výrobku.

1.1.1 Nalisování

Nalisování nabízí jednoduchý, rychlý a ekonomický způsob spojení dvou částí. Nalisování je nejčastěji používáno pro spojení hřídele a náboje. Rozdíl v průměrech hřídele a náboje zajišťuje dostatečný tlak, díky kterému je zabráněno axiálnímu posuvu a přenosu kroutícího momentu z hřídele na náboj. [1]



Obr. 1. Rozměrové požadavky na nalisovaný spoje [1]

Hřídel a náboj mohou být jak obojí z plastu nebo z plastu a kovu. Pokud jsou použity různé materiály, je potřeba brát v úvahu teplotní roztažnost jednotlivých materiálů. Vlivem rozdílu teplot může dojít k rozpojení součástí nebo k velkému nárůstu napětí ve výrobku vyrobeného z plastu. [1]

Jelikož jsou výrobky pod trvalým napětím, objevuje se u plastových výrobků další negativní jev, a to relaxace napětí. K relaxaci napětí dochází téměř okamžitě po sestavení. Při spojení dochází k deformaci výrobku o diferenci průměrů, která se časem nemění. Dochází avšak k poklesu napětí v průběhu času. Tento pokles může za určitý čas způsobit, že hodnota tlaku může klesnout pod kritickou hodnotu a dojde k porušení spoje. [1]

Pro výpočet tlaku vzniklého mezi hřídelí a nábojem je zobrazen v rovnici č. 1. [1]

$$p = \frac{\delta}{d_o} \cdot \frac{\delta}{\frac{(A - \nu_s)}{E_s} + \frac{(B + \nu_h)}{E_h}} \quad (1)$$

Kde A a B jsou geometrické konstanty a jsou definovány jako:

$$A = \frac{1 + \left(\frac{d_i}{d_o}\right)^2}{1 - \left(\frac{d_i}{d_o}\right)^2} \quad (2)$$

$$B = \frac{1 + \left(\frac{d_o}{D_o}\right)^2}{1 - \left(\frac{d_o}{D_o}\right)^2} \quad (3)$$

Kde d_i je vnitřní průměr hřídele, d_o je vnější průměr hřídele, D_i je vnitřní průměr náboje, D_o je vnější průměr náboje, E_h je modul pružnosti hřídele, E_n je modul pružnosti náboje, ν_s je poissonova konstanta materiálu hřídele, ν_h je poissonova konstanta materiálu náboje, δ se rovná $d_o - D_i$.

Průběh napětí je zobrazen na Obr. 1. Maximální hodnota tangenciálního napětí v náboji $\sigma_{\phi h}$ bude ve většině případů napětím kritickým. [1]

Maximální hodnota radiálního napětí se nachází na rozmezí mezi hřídelí a nábojem. Toto napětí je stejné jak v hřídeli tak i v náboji. Je určen rovnicí č.4.

$$\sigma_r = -p \quad (4)$$

Maximální hodnota tangenciálního napětí v náboji je dána vztahem:

$$\sigma_{\phi h} = p \cdot B \quad (5)$$

Maximální hodnota tangenciálního napětí v hřídeli je dána vztahem:

$$\sigma_{\phi s} = \frac{-2p}{1 - \left(\frac{d_i}{d_o}\right)^2} \quad (6)$$

1.1.2 Šroubové spoje

Šroubové spoje se používají u výrobků, u kterých je požadováno časté rozebírání. Šroubové spoje jsou poměrně drahé a mohou také rušit celkový vzhled výrobku. Při jeho návrhu je potřeba dbát na to, aby byl přístup k šroubu nebo matici co nejjednodušší. [1]

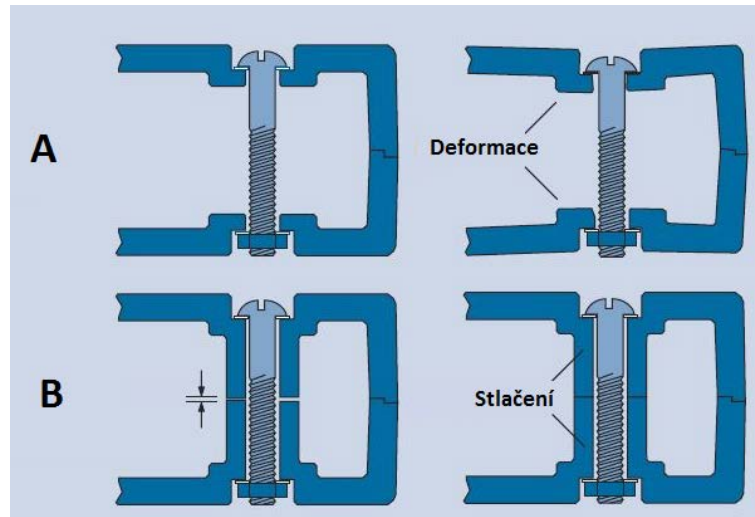
Šrouby a matice jsou vyráběny nejen z oceli, ale také z termoplastů. Šrouby a matice vyrobené z termoplastů jsou používány v aplikacích, kde je požadována vysoká chemická odolnost nebo elektrická izolace. [1]

Při návrhu šroubového spoje je potřeba dbát na několik bodů, a to například vyhnout se používání šroubů s kuželovou hlavou. Tyto šrouby vytváří nežádoucí napětí v spojované části. Proto je doporučováno tyto šrouby nepožívat. Použitím podložek dojde k lepší distribuci utahovací síly. Vhodné šrouby jsou zobrazeny na Obr. 2. [2]



Obr. 2. Doporučované druhy šroubů [2]

Na Obr. 3. jsou zobrazeny návrhy šroubového spoje. Varianta A ukazuje špatný návrh šroubového spoje. Při utahování dochází k deformaci stěny a nárůstu napětí. U varianty B je vidět optimalizovaný šroubový spoj. Byla přidána lokální výztuha. Při utahování dochází k stlačování výztuhy a díky tomu nedochází k nežádoucím deformacím stěn výrobku. [2]

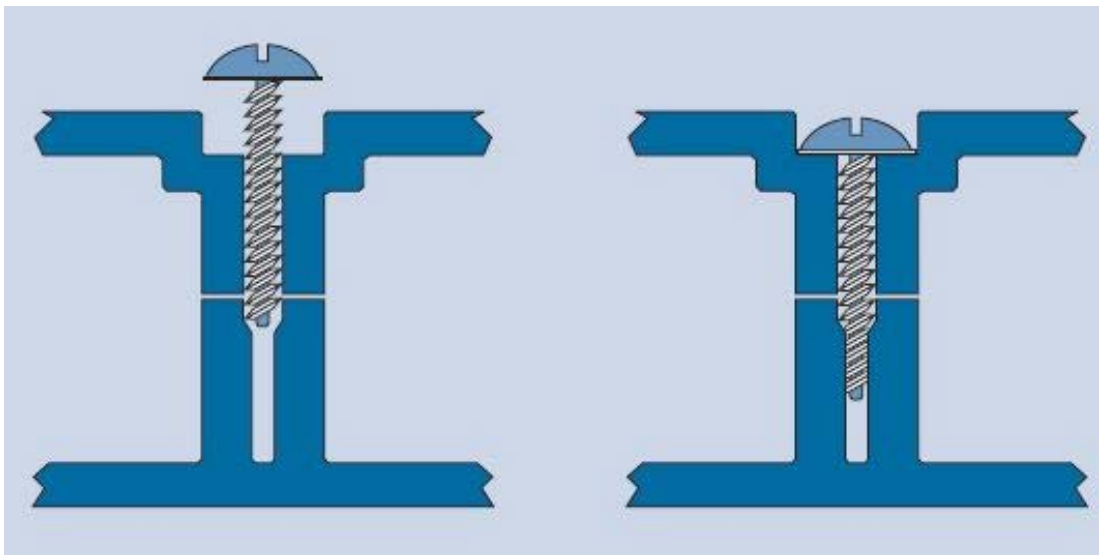


Obr. 3. Ukázka návrhu šroubového spoje [1]

1.1.3 Samořezné šrouby

Samořezné šrouby poskytují ekonomický způsob spojování platových výrobků. Při porovnání s šroubovým spoji není potřeba matice, levnější a jednodušší nástroje. [3]

Závit vzniká přímo ve výrobku v průběhu utahování. Avšak tyto závity mají limitovanou životnost a kvalita závitů klesá s opakujícím se rozebíráním. [2]



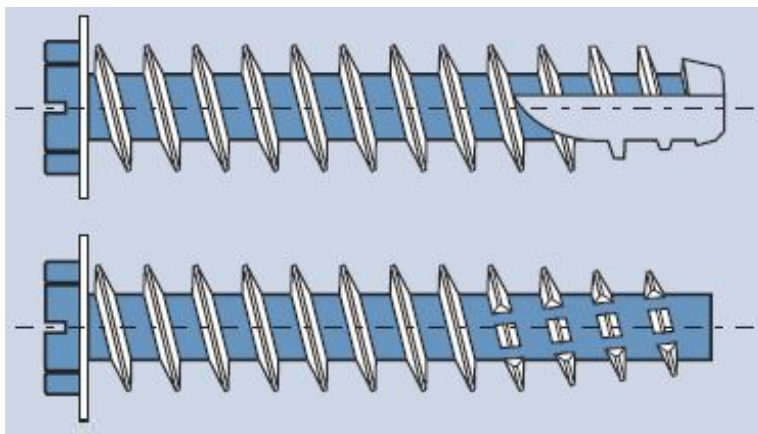
Obr. 4. Příklad spoje pomocí samořezných šroubů [1]

Samořezné šrouby mohou být rozděleny ještě do dvou skupin.

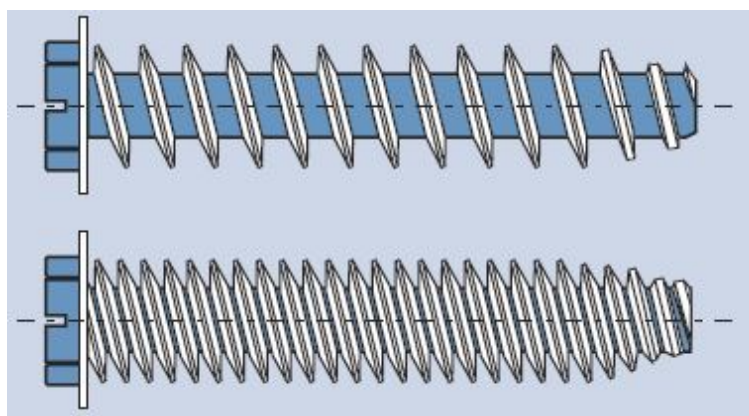
První skupinu tvoří závitorezné šrouby (Obr. 5), které při zašroubování vyřezávají do výrobku závit. Což znamená, že při každém zašroubování dochází k úbytku materiálu výrobku v místě spoje. Proto není doporučováno používat tyto typy šroubů u spojů, u kterých je potřeba

opakované rozebírání spoje. Tento typ šroubu je používán u křehkých typů plastů (nízkou hodnotou relativní deformace na mezi pevnosti). [2]

Druhou skupinu tvoří šrouby, které při zašroubování nevyřezávají závit, ale pouze ho deformují (Obr 6.). Tento typ se obecně používá u plastů s nižším modulem pružnosti ($E < 3000 \text{MPa}$). Tyto šrouby mohou být používány u spojů, u kterých je požadováno opakované rozebírání spoje. [2]



Obr. 5. Samořezné šrouby 1. typu [1]

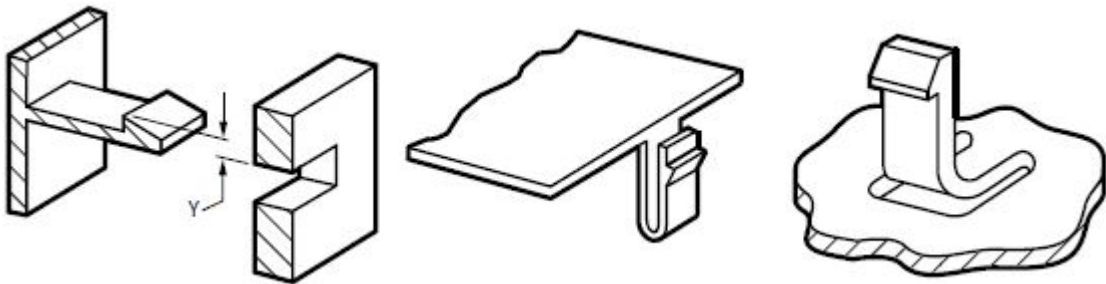


Obr. 6. Samořezné šrouby 2. typu [1]

1.1.4 Pružné spoje

Použití pružných spojení v oblasti konstruování výrobků z plastů má vzrůstající tendenci, neboť části takto spojované vyhovují požadavku jak snadné montáže, tak demontáže. Použití pružných spojů přináší ekonomické výhody. Spoj je totiž integrální součástí výrobku, což eliminuje použití dodatečných částí resp. materiálů. Operace spojování plastových dílů pomocí pružných elementů je jednoduchá, vyžadující obvykle pouze zasunutí. [4]

V technické praxi se pružné spoje vyznačují značnou variabilitou svým provedením a geometrií, jejich princip je však společný. Během spojovací operace dochází ke krátkodobé deformaci určitého pružného členu, po níž se deformovaná část vrátí do původního tvaru, bez výraznějších viskoelastických či plastických efektů. V případě jednorázových spojení mohou deformace nabývat relativně značných hodnot. Pokud je vyžadováno časté spojování a separace, volí se úroveň deformací, a tím i nahánání pružných elementů úměrně nižší. [4]



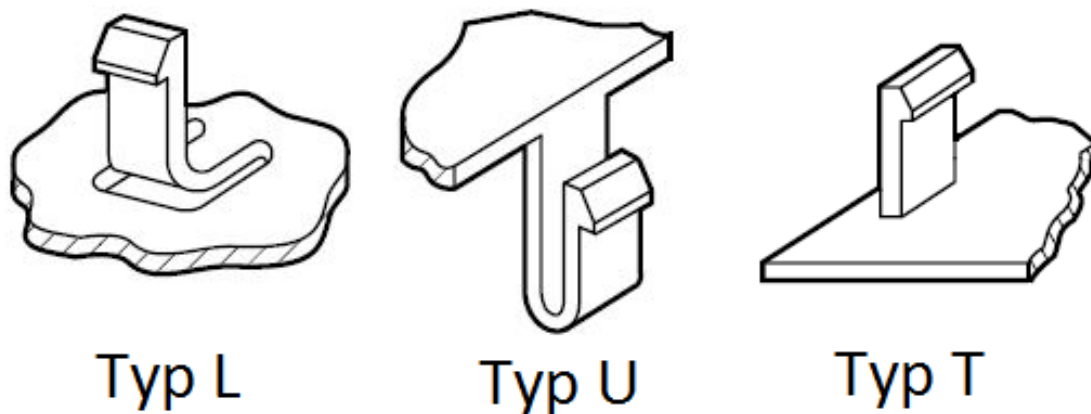
Obr. 7. Ukázka typů pružných spojení [5]

Nevýhodou pružných spojení je jejich náchylnost k poruchám, a to ať již z důvodu nesprávného dimenzování nebo nesprávné manipulace. Tento problém se týká zejména křehkých a plněných typů plastů. Jelikož je spojovací element integrální součástí plastového výrobku, představuje porucha pružného spoje obvykle i znehodnocení celého výrobku. Oprava porušeného spoje je totiž obtížná. V některých případech je z tohoto hlediska užitečné “předimenzovat” počet spojovacích pružných členů tak, aby náhodným ulomením jednoho členu nedošlo k předčasnému ukončení životnosti výrobku. [4]

Další nevýhodou pružných spojů lze spatřit v nutnosti dodržení relativně úzkých tolerančních polí funkčních rozměrů spoje. Správná funkce spoje je ovlivňována jeho výslednou geometrií a tím i stavem napětí v průběhu a po spojení dílů. Nadměrná interference spojovaných částí může vést k případné potuše, zatímco její nedostatek způsobuje nedostatečnou soudržnost spoje. [4]

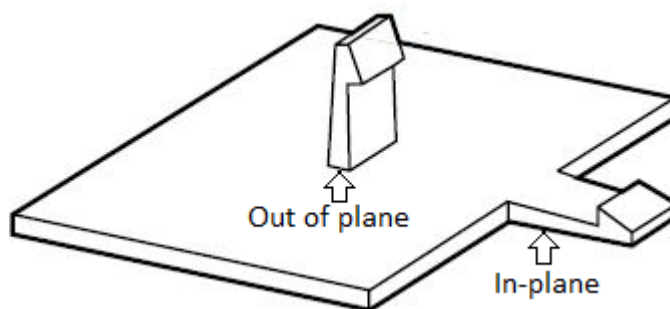
Co do typu lze převážnou část pružných spojení zařadit do jedné ze dvou skupin. Do první skupiny řadíme tzv. háčkové spoje, do druhé pak spoje cylindrického a kulového tvaru. [4]

Nejobvyklejší provedení pružného spoje představují pružné háčky. Existuje velké množství typů háčkových spojů. Na Obr. 8. jsou zobrazeny nejčastější typy háčkových spojů.



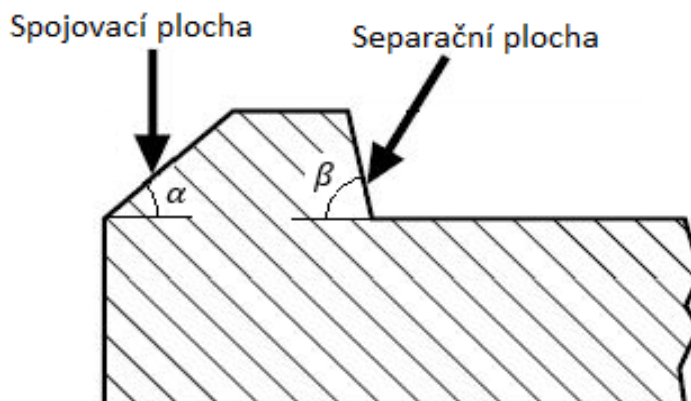
Obr. 8. Typy háčkových spojů [5]

Nejčastěji používaný typ je typ T. Tyto “vetknuté” nosníčky tvoří buď prodloužení stěny výrobku (in-plane), nebo častěji vystupují kolmo je stěně (out of plane).



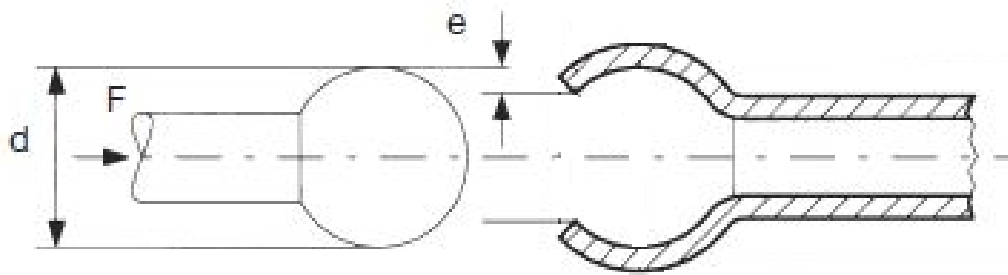
Obr. 9. Umístění zobáčků na výrobku [5]

Funkce háčkového spoje spočívá v jeho pružné ohybové deformaci. Jak je znázorněno na Obr. 10., úhel sklonu kontaktní plochy na straně separace je obvykle větší (úhel β), takže síla potřebná k separaci je větší než síla spojovací. Pokud má být separaci zamezeno, je hodnota úhlu β 90° a k případné demontáži je nutný přístup k háčku pro jeho manuální ohnutí. [4]

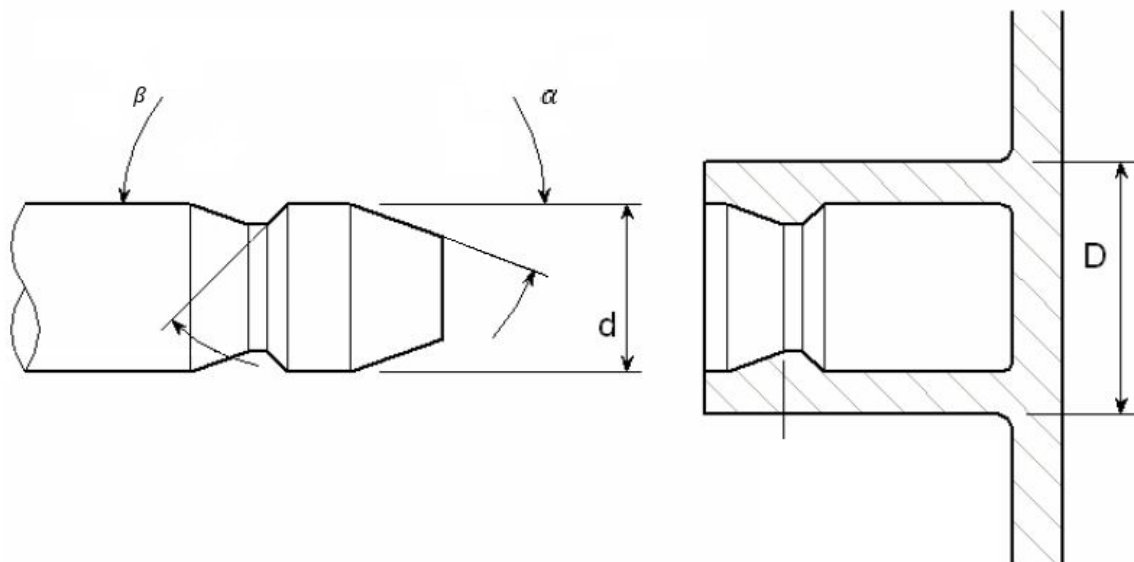


Obr. 10. Detail zobáčku

Další skupinu pružných spojů tvoří spoje cylindrického a kulového tvaru. Tento typ je spoje je obecně silnější, avšak vyžaduje větší síly při montáži a demontáži. Síla potřebná k montáži nebo demontáži se skládá ze dvou částí a to z části potřebné na deformaci náboje a síly potřebné k překonání tření mezi materiály. Spoje cylindrického typu mohou být navrženy jak rozebíratelné, tak nerozebíratelné (záleží na úhlu separační plochy). [3]



Obr. 11. Pružný spoj kulového tvaru [3]



Obr. 12. Pružný spoj cylindrického tvaru [3]

1.2 Nerozebíratelné spoje

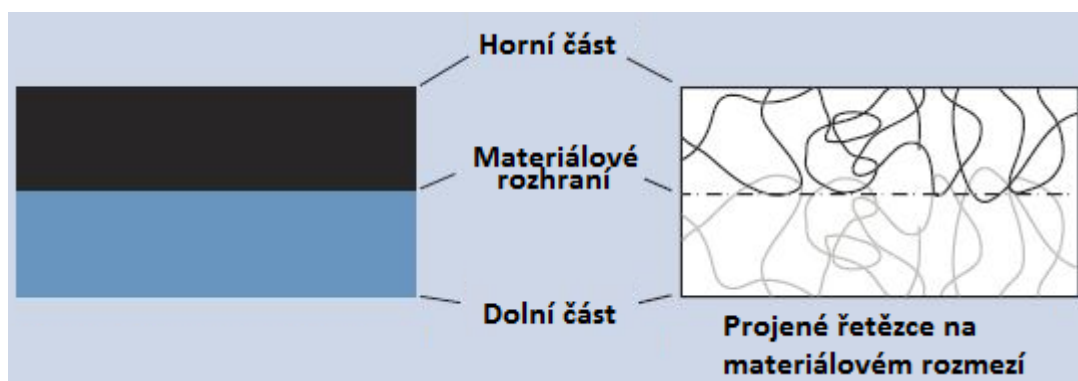
Nerozebíratelné spoje slouží k vytvoření trvalého spoje. Jsou používány u výrobků, u kterých není potřeba opakovaně rozebrat dané spojení. Při rozebrání dojde k poškození určitých částí spoje.

1.2.1 Svařování

Svařování je efektivní metoda stálého spojení plastových výrobků. Existuje velké množství typů svařování.

Svařování pracuje na principu roztavení materiálu a vlivem ochlazení nastane spojení součástí. Nicméně při svařování dvou různých plastů je potřeba dbát na to, aby byly dané materiály kompatibilní. Pokud nejsou dané materiály kompatibilní, nedojde ke spojení. Pomocí svařování lze také spojovat mnoho různorodých materiálů s kompatibilními body tání např. kompozity a textilie.

Svařování u termoplastů je děj založený na difuzi molekulových řetězců. Pro získání kvalitního svaru je potřeba dodržet správnou teplotu, aplikovat tlak po určitou dobu. [2]

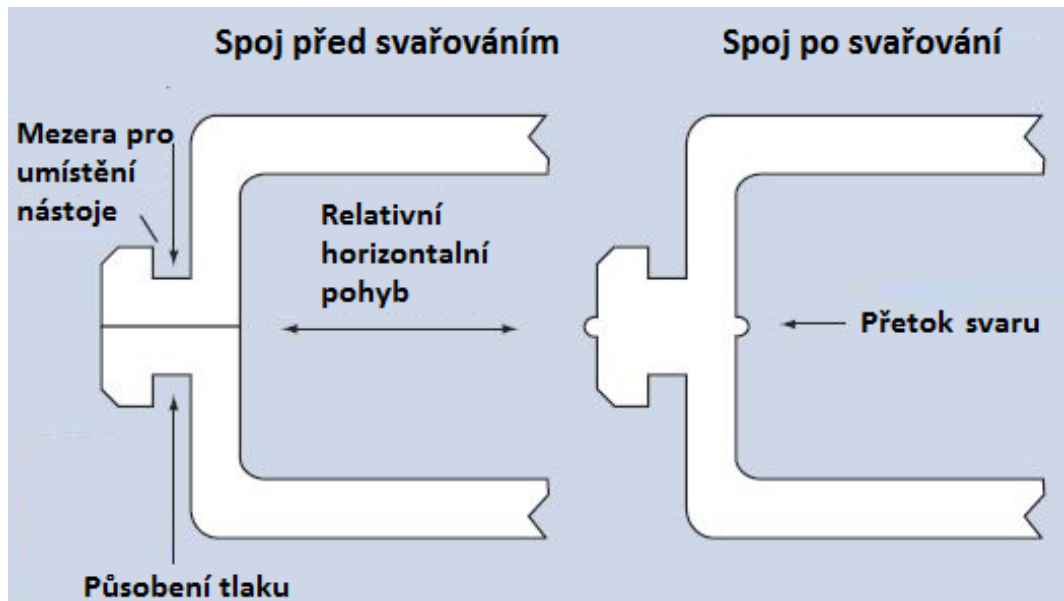


Obr. 13. Princi svařování termoplastů [1]

Vibrační svařování

Principem vibračního svařování je pohyb jedné ze dvou spojovaných částí vodorovně s přítlakem proti druhé. Povrchové tření, které vzniká, vytváří teplo, které roztaví a po ochlazení spojí obě části. Vibrační svařování je poměrně levné s krátkými výrobními cykly. [2]

Jako výhodou u vibračního svařování lze považovat, že tavenina ve sváru není vystavena vzduchu. Což může být velmi důležité u polymerů, které jsou velmi náchylné na vzdušnou oxidaci. Vytvořený spoj může být velmi pevný, nicméně při samotném svařování je pak výrobek vystaven poměrně velkým vibracím, což může být v některých aplikacích nežádoucí. [2]



Obr. 14. Ukázka spoje pomocí vibračního svařování [1]

Obecně lze pomocí vibračního svařování spojování i poměrně rozměrově velké součástí jako např. kapalinové nádrže, nárazníky automobilů, přístrojové desky, koncová světla.

Typické procesní parametry jsou: [2]

- Frekvence: 100-400 Hz
- Amplituda: 0,5-2,5 mm
- Doba cyklu: 10 s
- Přítlak: 0,5-5 MPa

Ultrazvukové svařování

Ke svařování plastů pomocí ultrazvuku dochází za pomoci tepla, které vzniká z vysokofrekvenčních mechanických kmitů. Nejprve se však musí elektrická energie přeměnit na vysokofrekvenční mechanický pohyb. Tento mechanický pohyb spolu s působící silou vytváří frikční teplo na rozhraní spojovaných součástí. Plastický materiál taje a tvoří tak molekulový svar mezi částmi.

Výhody a nevýhody jsou stejné jako u vibračního svařování.

Pomocí ultrazvukového svařování se častěji spojují menší výrobky.

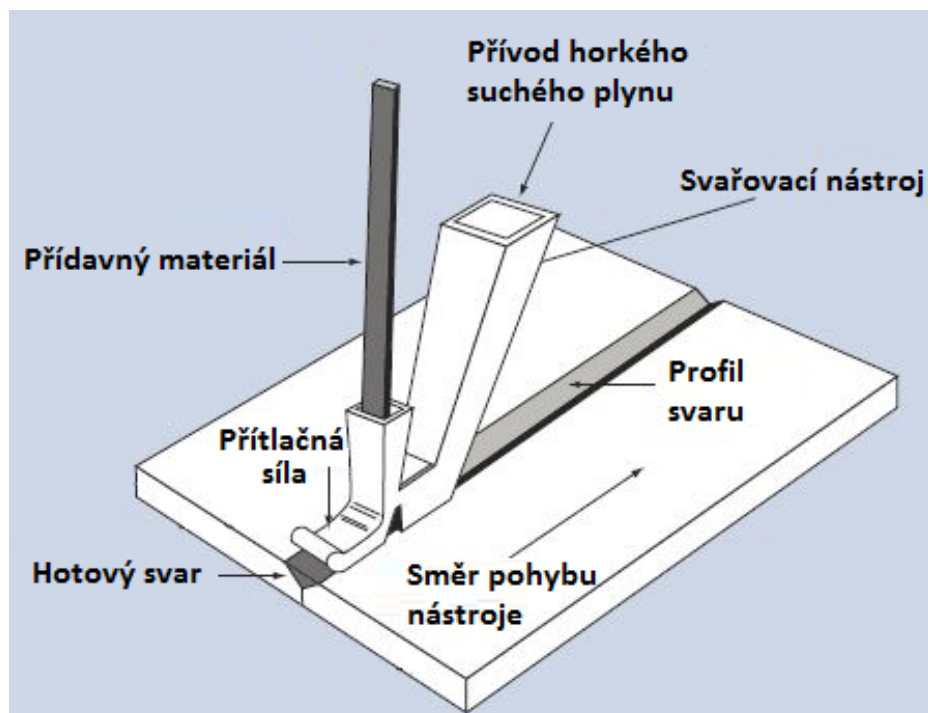
Typické procesní parametry jsou: [2]

- Frekvence: 20-40 kHz
- Amplituda: 10-50 μm
- Doba cyklu: 1 s
- Přítlak: 1-10 MPa

Svařování pomocí horkého plynu

Svařování pomocí plynu využívá horký suchý plyn, který kontinuálně natavuje plochu spojovaných součástí a přídavný materiál z termoplastu. Tavenina z přídavného materiálu vyplňuje předpřipravený profil pro svar a po zchlazení vytvoří svar. [2]

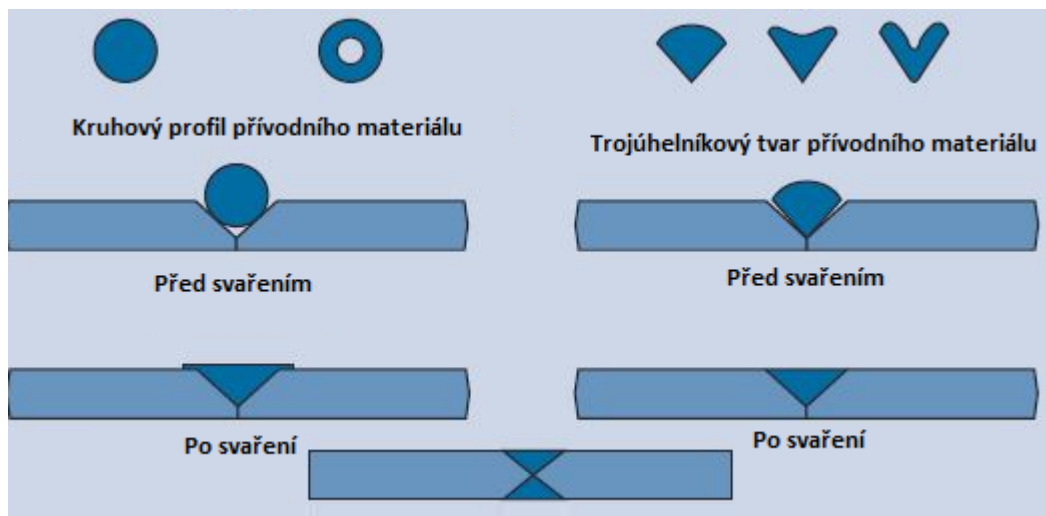
Svařování pomocí horkého plynu se používá pro spojování velkých součástí, různě tlusté díly, vést svary složitých tvarů libovolně umístěné v prostoru. Jako hlavní nevýhodu lze označit rychlost procesu. Jedná se o poměrně pomalý proces. Rychlost posuvu svařovacího nástroje se pohybuje v rozmezí 0,1 až 0,3 metru za minutu.



Obr. 15. Svařování pomocí horkého plynu [1]

Jako plyn může být použit vzduch, nebo pro materiály citlivé na vzdušnou oxidaci, může být použit plyn jako např. dusík nebo oxid uhličitý. Teplota plynu se pohybuje těsně nad teplotou tání či tečení termoplastů. Plyn a plochy svaru musí být čisté, suché a odmaštěné. Okraje spoje jsou upraveny do tvaru svaru. Druhy svarů se používají stejně jako u svařování

kovů. Na následujícím obrázku jsou zobrazeny základní druhy svarů a profil přídavného materiálu. [2]



Obr. 16. Druhy svarů [1]

Svařování pomocí laseru

Při svařování laserem dochází k zahřívání a plastifikaci svařované oblasti díky absorpci infračervených paprsků do materiálu. Absorpce neboli přeměna infračerveného záření v teplo, se liší podle použitého typu laseru, podle druhu materiálu a jeho přísad. [2]

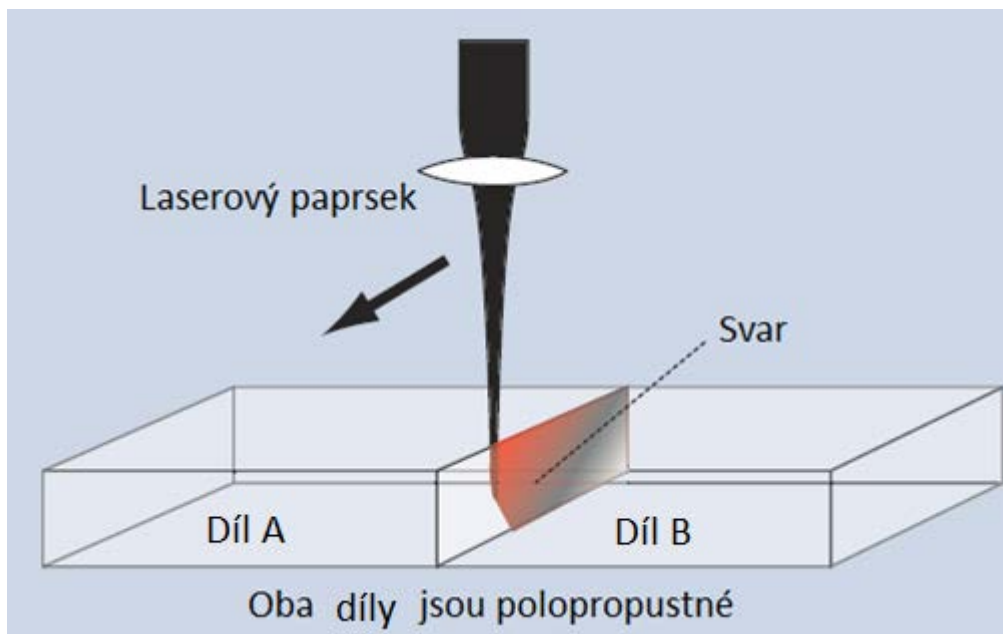
Jako u jiných svařovacích technologií tak i zde lze svařovat pouze termoplasty nebo termoplastické elastomery. Pevnost svaru určuje nastavení technologických parametrů, jako jsou teplota, čas teplotního účinku, tlak, případně přetok taveniny. [2]

Výhody laserového svařování plastů: [2]

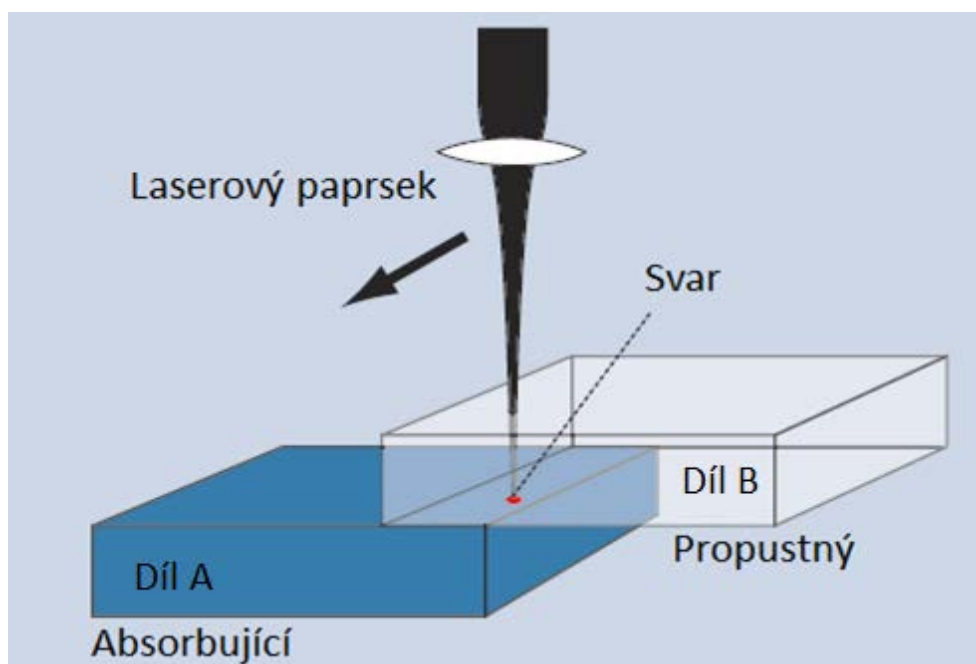
- žádné kmitání spojovaných částí
- žádný brusný otěr
- žádné problémy s adhezí
- místně omezený přívod tepla

Svařování plastů laserem může být rozděleno do dvou skupin:

- svařování na tupo - není moc běžné
- transmisivní (propustné) svařování



Obr. 17. Svařování na tupo pomocí laseru [1]

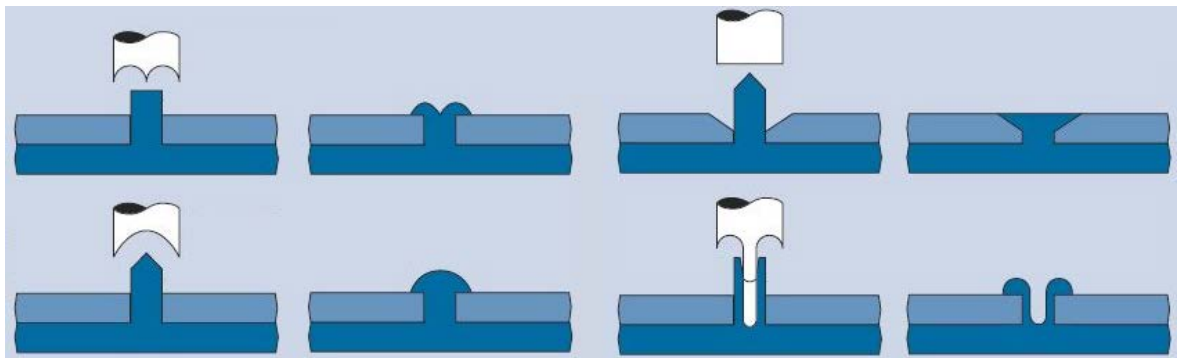


Obr. 18. Svařování transmittivní pomocí laseru [1]

1.2.2 Spojování pomocí razníku

Spojování pomocí razníku je proces, který se ve většině případů používá pro spojování součástí z různých materiálů. Jeden výrobek obsahuje výstupky, které zapadají do děr v druhém výrobku. Výstupky jsou pomocí speciálně tvarovaného nástroje (razníku) deformovány anebo dojde k jejich roztavení a vytvoření spoje. Tato technologie je rychlá a ekonomická a redukuje nebo úplně nahrazuje spojování pomocí šroubů. [2]

Spojování pomocí razníku se používá např. v automobilovém průmyslu, v elektrotechnice (tištěné plošné spoje), na výrobu lékařského vybavení.



Obr. 19. Ukázka spoje pomocí razníku [1]

Na předchozím obrázku jsou zobrazeny ukázky spojů včetně ukázky geometrie razníku. Existuje velké množství typů spojů, záleží pouze na požadavcích na spoj a na představivosti konstruktéra.

Technologie tvorby spoje se může lišit. V následující části jsou popsány nejčastější druhy.

Spojování pomocí studeného razníku

Spoj vytvořený pomocí studeného razníku (není zahříván) vzniká po aplikaci vysokého tlaku, který má za důsledek deformaci výstupku. Nicméně při aplikaci tohoto vysokého tlaku vzniká poměrně velké napětí, a proto se použití studeného razníku hodí pouze pro houževnaté polymery. [2]

Spojování pomocí horkého razníku

Při použití horkého razníku je výstupek ohříván, a tím není potřeba tak vysokého tlaku, a napětí vznikající je mnohem menší než při použití studeného razníku. Pomocí horkého razníku můžeme spojovat celé spektrum termoplastů včetně plněných typů. Kvalita spoje zaleží na kontrole procesních parametrů (teplota, tlak a čas). Doba cyklu se pohybuje v rozmezí jedné až pěti sekund. [2]

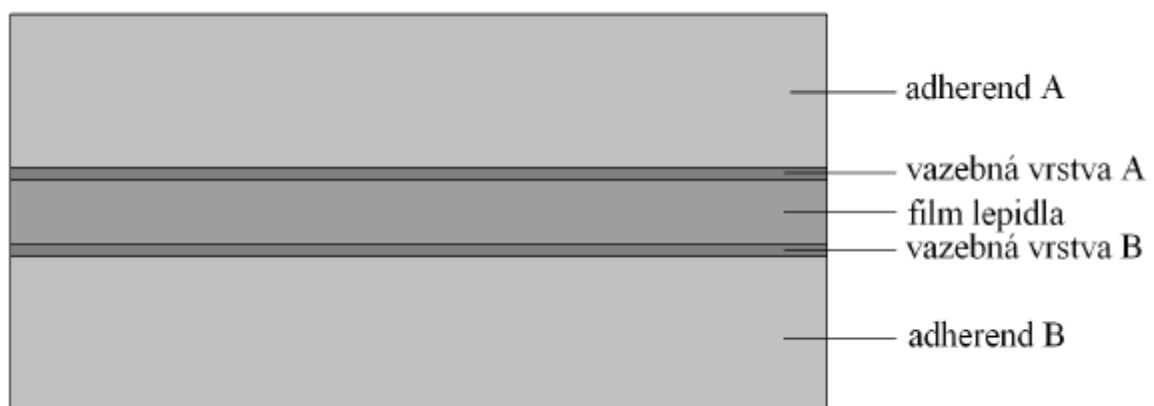
Spojování pomocí ultrazvukového razníku

Spoj vytvořený pomocí ultrazvukového razníku vzniká roztavením výstupku pomocí pohybujícího se razníku. V průběhu kontinuálního tlaku razníku, roztavený materiál vyplňuje kavitu razníku s požadovaným tvarem spoje. Doba cyklu se pohybuje většinou méně než dvě sekundy. [2]

1.2.3 Lepení

Lepení je technologický postup, při kterém se dosahuje trvalého spoje stejných nebo rozdílných materiálů, pomocí lepidla. Lepidlo je látka, která spojuje povrchy přilnavostí (adhezí) a vlastní soudržností (koheze), aniž se podstatně mění struktura slepované hmoty. Hodnoty koheze závisí na složení filmu lepidla v konečné fázi lepení. Adheze i koheze se uplatňují ve slepovaném spoji současně. [6]

Lepený spoj si lze představit jako systém složený z pěti vzájemně vázaných vrstev. Pevnost spoje je určena fyzikálními a chemickými vlastnostmi lepidla a spojovaného materiálu. [6]



Obr. 20. Struktura lepeného spoje [6]

U kvalitního spoje nastává při jeho destrukci zlom mimo vazebné vrstvy. V takovém případě má spoj velkou pevnost. Probíhá-li však zlom některou vazebnou vrstvou, má menší pevnost

vlivem tzv. slabé vazebné vrstvy mezi lepidlem a adherendem. Nejčastější příčinou vzniku slabých vrstev je vzduch, který ulpívá při nanášení na fázovém rozhraní ve formě bublin. [6]

Mezi přednosti lepeného spoje patří možnost spojování stejných nebo různorodých materiálů, bez ohledu na jejich tloušťku, a navíc aplikací lepidel není narušena celistvost spojovaných dílců. Dále je možné připravit spoje vodotěsně i plynotěsná a není narušován profil nebo estetický vzhled výroku. [6]

Nevýhodou lepených spojů je nutnost speciálních úprav adherentů se špatnými adhezivními vlastnostmi a vysoké požadavky na rovinnost a čistotu povrchů lepených dílců. Většina spojů je citlivá vůči namáhání na odlupování. [6]

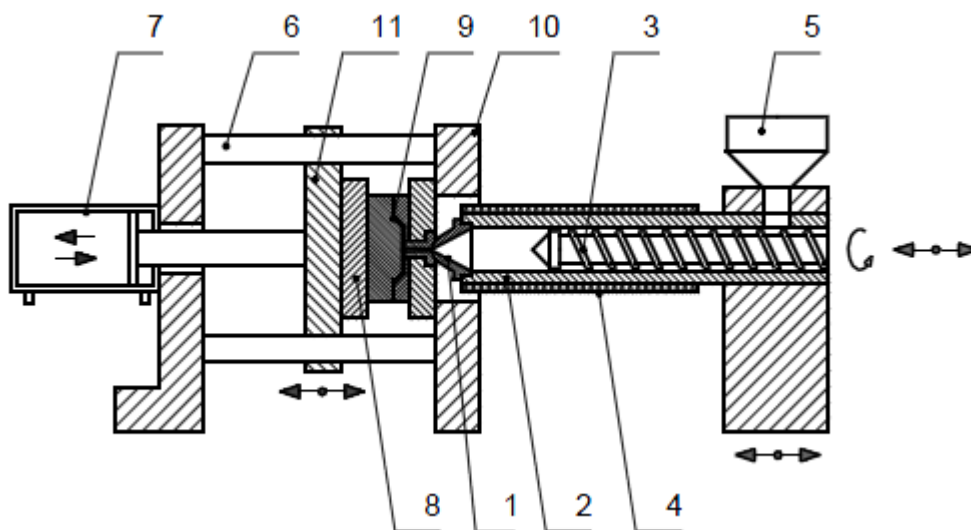
2 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Technologie vstřikování je nejrozšířenějším způsobem výroby požadovaných dílů z plastu. Vyznačuje se poměrně složitým fyzikálním procesem, na kterém se podílí polymer, vstřikovací stroj a forma. V průběhu vstřikování je roztavený plast ve vstřikovacím stroji tlakem dopravován do dutiny formy a tam ochlazen ve tvaru vyráběné součásti. [7]

2.1 Vstřikovací stroj

Vstřikovací stroj, jako jeden z hlavních činitelů výroby, má nejrůznější uspořádání. Vyžaduje se od něj, aby kvalitou svých parametrů a dokonalým řízením, byla zajištěna výroba jakostních výstřiků. V současné době existuje velký počet konstrukcí vstřikovacích strojů, které se od sebe liší svým provedením, stupněm řízení, stálostí a reprodukovatelností jednotlivých parametrů, rychlostí výroby, snadnou obsluhou i cenou. Konstrukce stroje je charakterizována podle: [7]

- vstřikovací jednotky
- uzavírací jednotky
- ovládání a řízení stroje



Obr. 21. Schéma vstřikovacího stroje

1 - vstřikovací tryska, 2 - pracovní válec, 3 - plastikační šnek, 4 - topné pásy, 5 - násypka, 6 - vodící sloupy, 7 - uzavírací hydraulický válec, 8 - forma, 9 - dutina formy, 10 - opěrná deska pevná, 11 - upínací deska pohyblivá

2.1.1 Vstřikovací jednotka

Připraví a dopraví požadované množství roztaveného plastu s předepsanými technologickými parametry formy. Množství dopravované taveniny musí být menší, než je kapacita vstřikovací jednotky při jednom zdvihu. Při malém množství zase setrvává plast ve vstřikovací jednotce delší dobu a tím může nastat jeho degradace. [7]

Vstřikovací jednotka pracuje tak, že do tavného válce je dopravován zpracovaný plast z násypky pohybem šneku. Plast je posouván šnekem s možnou změnou otáček přes vstupní, přechodové a výstupní pásma. Postupně se plastikuje, homogenizuje a hromadí před šnekem. Současně ho odtlačuje do zadní polohy. [7]

Tavná komora je zakončena vyhřívanou tryskou, která spojuje vstřikovací jednotku s formou. Kulové zakončení trysky zajišťuje přesné dosednutí do sedla vtokové vložky formy. Jejich souosost, menší průměr otvoru a menší poloměr trysky než je u sedla vtokové vložky jsou podmínkou správné funkce. [7]

2.1.2 Uzavírací jednotka

Ovládá formu a zajišťuje její dokonalé uzavření, otevření i případné vyprázdnění. Velikost uzavíracího tlaku je stavitelná a je přímo závislá na velikosti vstřikovacího tlaku a ploše dutiny a vtoků v dělicí rovině. Hlavní částí uzavírací jednotky jsou opěrná deska pevná, upínací deska, vodící sloupky a uzavírací mechanismus. Uzavírací mechanismus je ukazatelem kvality uzavírací jednotky. Má nejrůznější provedení. Hydraulické uzavírací jednotky umožňují pootevření nástroje hydraulickým tlakem a vyžadují zajištění závorou. [7]

Výhodou těchto jednotek je nastavení libovolné hloubky otevření nástroje. Hydraulicko-mechanická jednotka je nejčastěji používána u strojů malých gramáží. Zaručuje vyšší rychlost uzavírání s potřebným zpomalením před uzavřením formy a dostatečnou tuhost. Je konstruována jako kloubový mechanismus ovládaný hydraulickým válcem. [7]

2.1.3 Řídící jednotka

Řízení a regulaci je nutno považovat neoddělitelnou součástí funkce vstřikovacího stroje. Pod pojmem řízení a regulace se rozumí snímání a sledování vstřikovacích a technologických parametrů spolu s jejich následnou regulací tehdy, překročí-li naměřené hodnoty přípustnou toleranci. Regulace vstřikovacího procesu umožňuje využít naměřených hodnot pro korekci případných odchylek od nastavených hodnot. Snahou je omezit v procesu lidský faktor na nejmenší míru. U běžných vstřikovacích strojů je zajištěn automatický sled jednotlivých

operací, tj. plastikace, uzavření formy, vstřík, dotlak, chlazení výstříku, otevření formy, vyhození výstříku. [7]

2.2 Vstříkovací forma

Vstříkovacích forem se používá při zpracování termoplastů, reaktoplastů i kaučukových směsí. Řešení vstříkovací formy vychází z technologického projektu příslušného výstříku. V podstatě se musí respektovat jak vlastnosti zpracovávaných materiálů, tak také možnosti výrobních zařízení i požadavky na kvalitu výrobků a produktivitu práce. Zpravidla se požaduje, aby výstříky nevyžadovaly náročné dokončovací operace. [7]

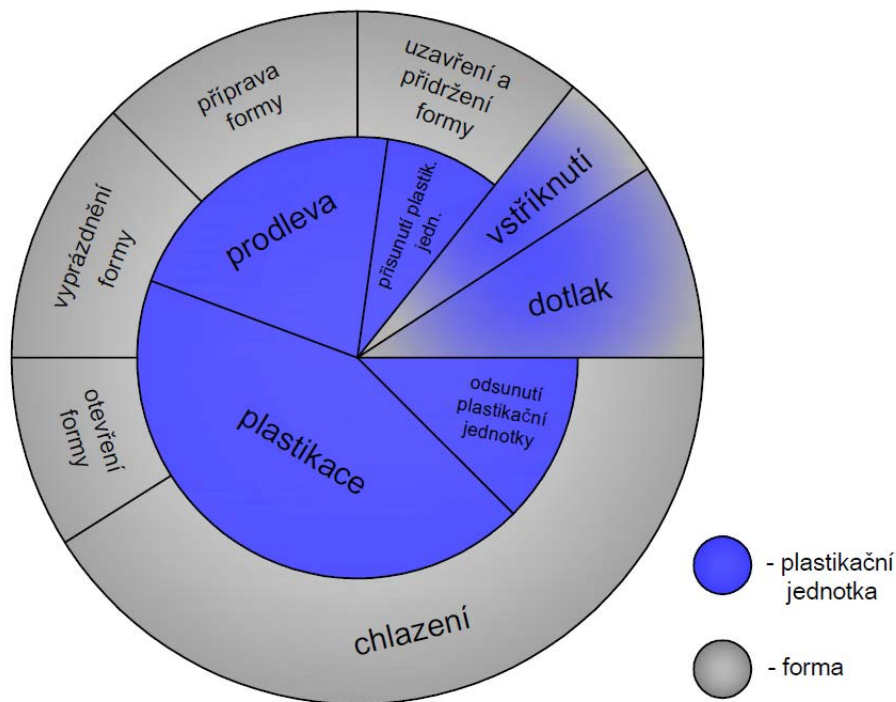
Mnohoznačnost požadavků vede k různým řešením forem. Používané typy forem zpravidla mají tyto hlavní části:

- tvarové díly vymezující dutinu formy
- vtokový systém
- temperační nebo topný systém
- vyhazovací zařízení pro výstřík i vtokový zbytek
- upínací a vodící elementy

Vyšší nároky na přesnost a jakost forem se projeví ve zvýšené pracnosti při jejich konstrukci i výrobě. Větší robustnost forem, kterou vyžadují použité tlaky při vstříkování, často svádí k méně citlivému zacházení. To bývá někdy příčinou jejich nedokonalé funkce, snížené přesnosti i životnosti. [7]

2.3 Vstříkovací cyklus

Vstříkovací cyklus se realizuje na vstříkovacím stroji. Připravený granulový plast se ve vstříkovacím stroji roztaví, zhomogenizuje a vstříkne do dutiny formy. Před vstupem taveniny do formy se musí forma také připravit. Příprava spočívá v temperaci, vložení zástříků, závitových jader a jiných. Po uzavření formy ve stroji je polymerní tavenina požadované teploty vstříknuta do formy nastaveným tlakem při určité rychlosti. Tavenina zůstává pod tlakem v uzavřené formě, dokud se nezačne ochlazovat. Hned potom nastoupí dotlak, který skončí při částečném ochlazení plastu ve formě. Po skončení dotlaku se vstříkovací jednotka od formy oddálí a začne v ní plastikace další dávky hmoty. Po dostatečném ochlazení výstříku se forma otevře a výstřík se vyhodí. Po očištění a přípravě formy pro další cyklus (prodleva) následuje další cyklus. [7]



Obr. 22. Vstřikovací cyklus [7]

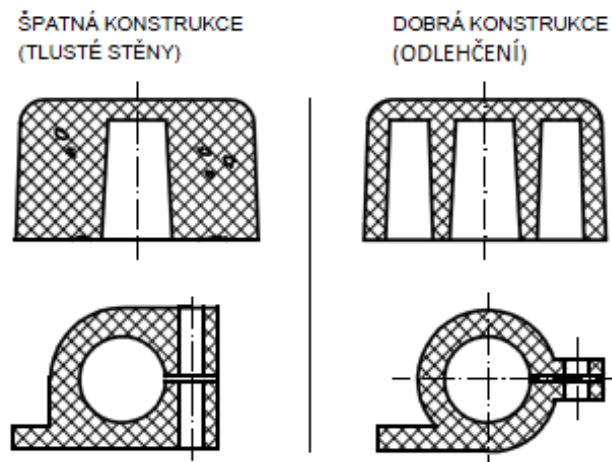
2.4 Hlavní zásady konstrukce vstřikovaných výrobků

Nejdůležitější fází realizace plastového dílu je jeho správná konstrukce, a to jak z hlediska funkčního, tak z pohledu výrobního. Konstrukce vstřikovaných výrobků musí splňovat v zásadě dvě hlavní hlediska: [7]

- funkci plastového dílu v daném zařízení a dále užité, estetické, ergonomické a bezpečnostní hlediska
- technologické zásady, mezi které spadá zaformovatelnost, tloušťky stěn, žeber, nálitky, rádiusy, úkopy, volba vhodného druhu plastu apod.

2.4.1 Tloušťky stěn

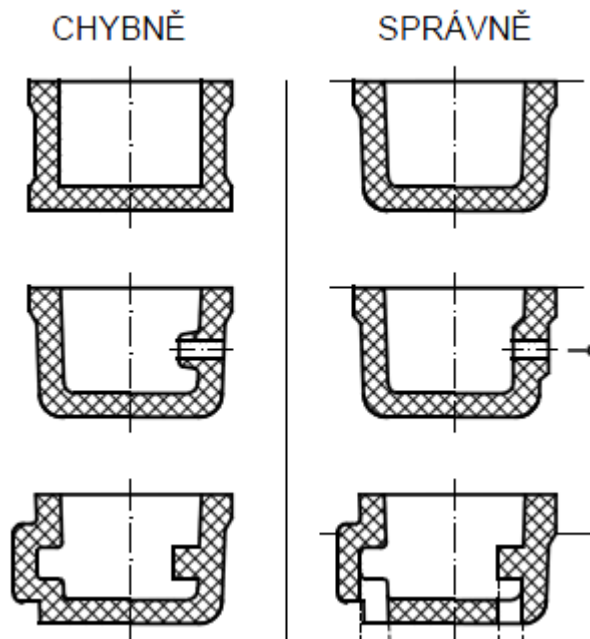
Zásady správné konstrukce tloušťky stěn vyžadují jednotnou tloušťku, náhlé přechody mají být bez ostrých hran a v případě, kde se nelze vyhnout tlustším stěnám (místům), se provede vhodné vylehčení, nejlépe na opačné straně. Tloušťka bočních stěn, nebo žeber se zaoblenou přechodovou hranou nemá překročit 0,8 tloušťky hlavní stěny. [7]



Obr. 23. Ukázka návrhu výrobku s různou tloušťkou stěny [7]

2.4.2 Zaformovatelnost

Zaformovatelností se rozumí způsob optimálního zaformování ve formě (volba dělicích rovin), aby výstřik, odformovatelný pomocí různých konstrukčních prvků (čelistí, vytáček prvků apod.), mohl být ekonomicky vyráběn, nejlépe v automatickém chodu. [7]



Obr. 24. Zaformování výrobku [7]

2.4.3 Úkosy a podkosy

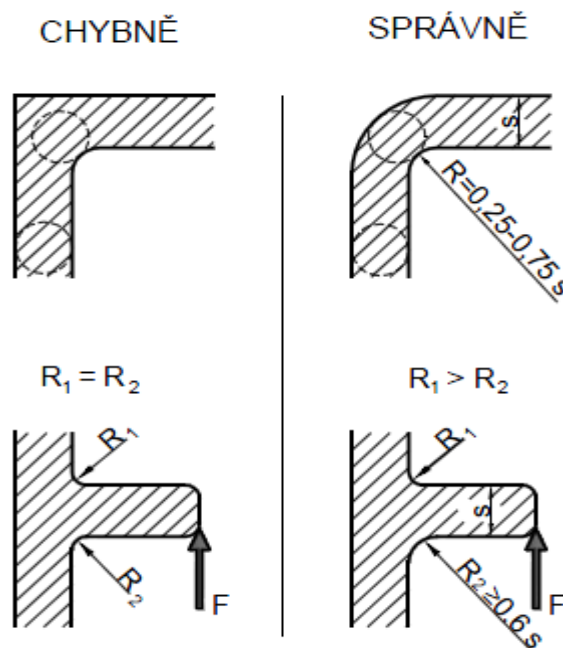
Úkosy a podkosy jsou sklony stěn výstřiků kolmo k dělicí rovině. Úkosy umožňují snadné vyjmutí výstřiků z dutiny formy. Jejich velikost se řídí požadovanou funkcí. Svým uspořádáním jsou buď vnější, nebo vnitřní. Volbu jejich velikosti ovlivňuje především smrštění, elasticita plastu, povrch stěn formy a automatizace výroby. Podkosy s výjimkou technologických, komplikují konstrukci i funkci formy a proto je snaha se jim vyhnout. [7]

Tab. 1: Doporučené hodnoty úkosů

Úkos pro	Velikost úkosu
Vnější plochy	30' - 2° (1°)
Vnitřní plochy	30' - 3° (2°)
Otvory do hloubky 2 D	30' - 1° (45')
Hluboké otvory	1° - 10°
Žebra, nálitky	1° - 10° (3°)
Výstupky	2° - 10°

2.4.4 Rádiusy

Zaoblením hran, rohů a koutů se usnadní tok taveniny, zabrání se koncentraci napětí a těchto místech a sníží se i opotřebení formy, protože přechody s ostrými hranami vyžadují vyšší vstřikovací tlaky. Rázová houževnatost součástí se tím zvýší až o 50 %. [7]



Obr. 25. Zaformování výrobku [7]

3 DESKY PLOŠNÝCH SPOJŮ

Desky plošných spojů (DPS) nachází široké uplatnění v elektronických přístrojích k mechanickému připevnění a propojení součástek. K vodivému elektrickému propojení mezi jednotlivými součástkami dochází přes měděné cesty, které jsou vyrobeny procesem leptání za pomoci fólie nanesené na izolační laminátové panely různé tloušťky, různých rozměrů a s různou tloušťkou povrchové vrstvy mědi. Samotné součástky jsou na DPS připájeny cínovou pájkou. Klasická provedení součástek mají vývody ve formě drátů nebo kolíčků. Desky plošných spojů v dnešní době umožňují výrobu levných a přitom dostatečně robustních elektronických zařízení. [8]



Obr. 26. Ukázka desky plošných spojů [9]

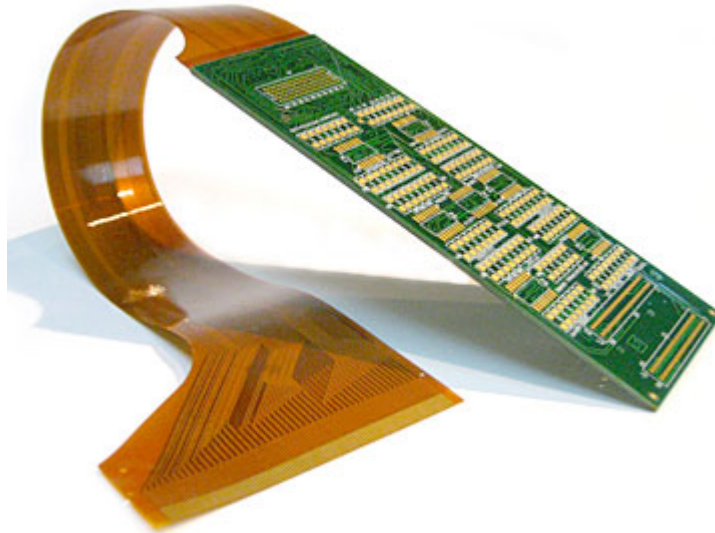
3.1 Rozdělení desek plošných spojů dle konstrukce

3.1.1 Ohebné desky plošných spojů

Ohebné plošné spoje byly navrženy, aby nahradily tradiční drátové kabeláže. Tyto spoje vedle základní výhody ohebnosti, díky které umožňuje snazší instalaci a servis, nabízí spoustu dalších výhod, jako např. zvýšenou spolehlivost, úsporu hmotnosti a místa, popřípadě lepší kontrolu impedance. Spoje musí být navrženy tak, aby dokázaly snést nespočet ohybů bez sebemenší poruchy a abychom mohli být instalovány do míst, kam nelze umístit jiné spoje. Jedním z prvních průmyslových odvětví, kde byly využívány výhody ohebných spojů pro zjednodušování kabeláží, byl průmysl automobilový. Ohebné plošné spoje jsou nyní běžně užívány jako náhrada za svazky vodičů nacházejícími se pod karoserií. [10]

Ohebné plošné spoje jsou nejtenčí technologií pro propojování. Tloušťka základního nosného dielektrického filmu bývá kolem 0,1 mm, ale i méně. Vrstva mědi se pohybuje podle účelu mezi 0,015 mm až 0,07 mm, tedy shodně jako u normálních desek. Pro šířku vodiče a

mezery pak platí stejné zásady jako pro pevné desky. Tam kde mají tyto spoje nahrazovat běžné vodiče, bývají rozteče vodičů větší, právě s ohledem na větší průměr izolací PVC. [10]



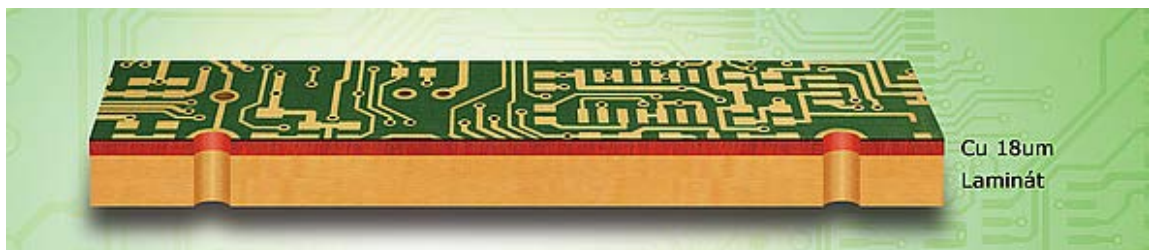
Obr. 27. Ukázka ohebné desky plošných spojů [9]

3.1.2 Neohebné desky plošných spojů

Neohebné desky plošných spojů lze dále dělit na jednostranné, dvoustranné, vícestranné, s nosnou deskou a s omezovacím jádrem.

Jednostranné desky plošných spojů

Jednostranné desky plošných spojů jsou složeny pouze z jedné vrstvy propojovacích struktur a nemají pokovené otvory. Nejběžnější způsob výroby je pomocí. Jsou vhodné na jednoduché aplikace. [9]



Obr. 28. Schéma jednostranné desky plošných spojů [11]

Dvoustranné desky plošných spojů

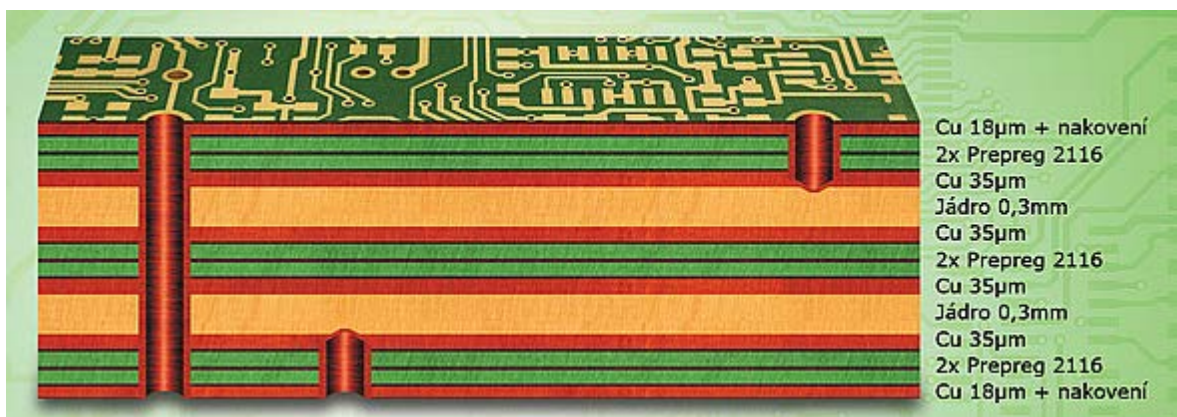
Dvouvrstvé desky mají dvě vrstvy propojovacích struktur (vrstva BOT a TOP). Otvory jsou obvykle pokoveny. Materiál je oboustranně plátován mědí příslušné tloušťky. Používají se pro náročnější aplikace, na rozdíl od jednovrstvých desek se zde dosahuje vyšší propojitelnosti. [9]



Obr. 29. Schéma dvoustranné desky plošných spojů [11]

Vícevrstvé desky plošných spojů

Zavedení metod pokovení propojovacích otvorů jako běžného způsobu elektrického propojování přes základní izolační materiál desky s plošnými spoji prakticky umožnilo rozvoj vícevrstevných desek. Při použití pokovených propojovacích otvorů lze zhotovit vícevrstvé desky s podstatně menšími otvory, než je možné u zastaralých metod vrtání přístupových otvorů. Je také možné propojit libovolný počet základních desek a jejich obrazců u kteréhokoliv propojovacího otvoru. Standardně se vyrábějí desky v sudém počtu vrstev. Nejběžnějším provedením jsou čtyřvrstvé desky, které se skládají ze dvou vnějších a dvou vnitřních vrstev. [9]



Obr. 30. Schéma šesti vrstvé desky plošných spojů se slepým vrtáním [11]

3.2 FR4 deska

V současné době je převážná většina aplikací založena na FR-4 deskách. Tento materiál získává svoji mechanickou výztuž ze spřádaného sklotextilu. Jednotlivá skleněná vlákna jsou stáčena do svazků (nití), jež se pak spřádají do textilie. Nejobvyklejší textilie používá 408 vláken o průměru 9,6 μm , stáčených každých 5 cm. Hustota osnovy je 17 nití na cm, zatímco hustota útku je 13 nití na cm. Tloušťka měděné fólie se volí od 5, 9, 18, 35, 70 až do 105 mikronů. [12]

Na začátku se textilie impregnuje epoxidem, a to rozpuštěním pryskyřice v rozpouštědle a jejím vsáknutím do látky. Materiál v nevytvrzeném stavu je znám jako prepreg a po vysušení je možno s ním manipulovat a řezat na potřebnou velikost. Materiál se řeže tak, aby „zrnitost“ tkaniny byla pod úhlem 45° ve směru materiálu. To pomáhá omezit deformace. [12]

Materiál FR-4 může být složen až z několika vrstev prepregu tak, aby vznikl materiál o řízené tloušťce mezi 0,65 mm až 1,6 mm. [12]

Výroba základní dvouvrstvé desky probíhá následovně: měděná fólie vytvořená galvanicky plátováním válce z nerezové oceli, otáčejícího se v tekutém elektrolytu, se nanese na obě strany laminátu. Tato fólie, je po jedné straně hladká a lesklá a po druhé straně matná a zrnitá. Aplikuje se zrnitou stranou dolů, aby se podpořila přilnavost k prepregu. Vícevrstvé desky se vyrábí skládáním více dvouvrstvých prepregů, které se lisují za tepla ve vakuu nebo bez něj. [12]

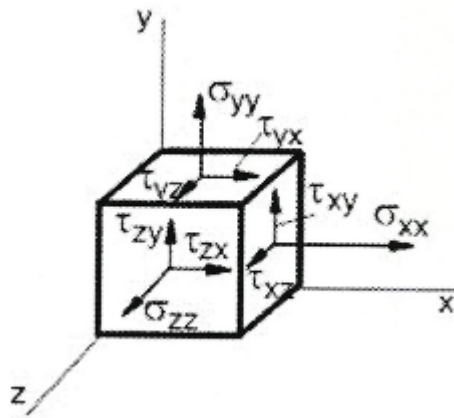
Vícevrstvé desky se slepují z více desek s plošnými spoji. Ke spojení se používá tzv. lepicí list, což je materiál s nedotvrzenou pryskyřicí. Celek se musí pečlivě složit a lisovat za tepla. Po té následují stejné operace jako u dvouvrstvých desek (vrtání a pokovení otvorů). Vícevrstvé spoje jsou velmi náročné na výrobu a i dnes je procento vadných poměrně vysoké (10-20%). Po slepení a vytvrzení se celek provrtá a otvory se pokoví. Obecně platí, že u pokovených děr je nutné, aby hrana měla alespoň 1 μm tloušťky pokovení. [12]

4 PROSTOROVÁ NAPJATOST A DEFORMACE

4.1 Základní vztahy

Složky prostorové napjatosti znázorněny na následujícím obrázku. Z momentových podmínek rovnováhy elementární částice vyplývá pro smykové složky symetrie tenzoru napjatosti.

Tudíž platí $\tau_{ij} = \tau_{ji}$. [13]



Obr. 31. Složky prostorové napjatosti [13]

Napjatost v bodě tělesa je tak určena šesti nezávislými složkami. Při přechodu od jednoho ke druhému pootočenému souřadnicovému systému platí pro složky prostorové napjatosti i deformace transformační vztahy: [13]

$$(\sigma)' = [A] \cdot (\sigma) \cdot [A]^T \quad (7)$$

$$(\varepsilon)' = [A] \cdot (\varepsilon) \cdot [A]^T \quad (8)$$

Kde A je maticí směrových cosinů.

$$[A] = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \quad (9)$$

S označením $a_{11} = \cos \alpha_{ij}$, kde α_{ij} je úhel mezi i -tou pootočenou osou a j -tou osou původního souřadnicového systému. [13]

Pro 3D napjatost platí, že existuje hlavní souřadnicový systém, v němž smykové složky vymizí a v ploškách elementární částice působí pouze hlavní normálová napětí. [13]

4.2 Rovnice elasticity 3D napjatosti

Rozšířením rovnic elasticity dvouosé napjatosti na prostorovou 3D napjatost obdržíme pro normálové složky napětí vztahy: [13]

$$\varepsilon_i = \frac{1}{E} (\sigma_i - \nu\sigma_j - \nu\sigma_k) \quad (10)$$

Kde $i, j, k = x, y, z$.

Inverzí rovnic elasticity obdržíme pro jednotlivá normálová napětí vztahy: [13]

$$\sigma_i = 2G(\varepsilon_i + k) \quad (11)$$

Kde $i = x, y, z$.

S označením

$$k = \frac{\nu e}{1 - 2\nu} 2G(\varepsilon_i + k) \quad (12)$$

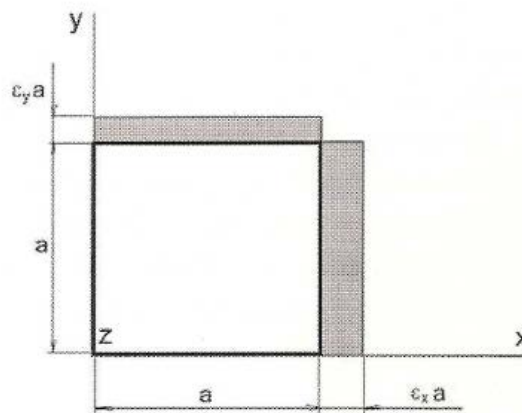
4.3 Hookův zákon v objemovém tvaru- stlačitelnost

Při prostorové napjatosti změní obecně elementární krychlová část jak svůj tvar, tak i objem. Je-li původní (nedeformovaný) objem elementu $dV = a^3$, je jeho změna objemu po malé deformaci přibližně dána následující rovnicí. [13]

$$\Delta dV = a^2 \varepsilon_x a + a^2 \varepsilon_y a + a^2 \varepsilon_z a = a^3 (\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) \quad (13)$$

Poměrná změna objemu v daném místě tělesa je dána vztahem:

$$e = \frac{\Delta dV}{dV} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z \quad (14)$$



Obr. 32. Zobrazení deformace elementu [13]

Spojením rovnic (13) a (14) platí:

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \frac{Ee}{1 - 2\nu} = \text{konst.} \quad (15)$$

Je-li částice materiálu namáhána všestranným tlakem, neboli napjatostí hydrostatického typu, kdy $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = -p$, budou příslušné deformace $\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = -\varepsilon$. [13]

$$\varepsilon = \frac{p}{E}(1 - 2\nu) \quad (16)$$

Stlačení neboli poměrná změna objemu je tedy dána:

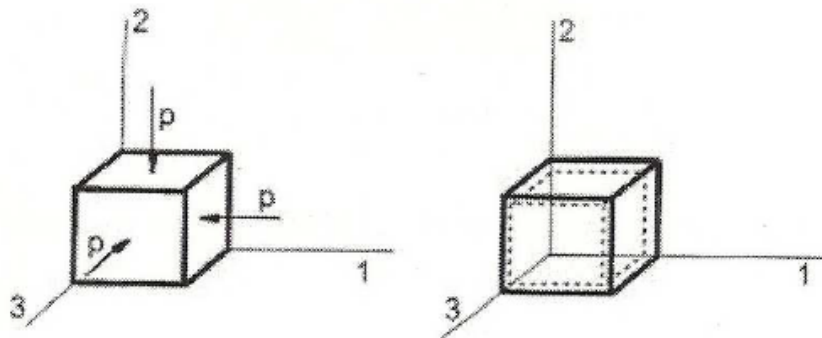
$$e = 3\varepsilon = \frac{3p(1 - 2\nu)}{E} \quad (17)$$

Vzorec 17 lze zjednodušit do formy:

$$p = Ke \quad (18)$$

$$\text{Kde } K = \frac{E}{3(1-2\nu)}.$$

Konstanta K se nazývá objemový modul pružnosti. [13]



Obr. 33. Hydrostatická napjatost [13]

4.4 Měrná energie napjatosti

Vztáhneme-li energii prostorové napjatosti U na jednotku objemu, položíme

$$W = \frac{dU}{dV} \quad (19)$$

Hovoříme o veličině W jako o měrné energii napjatosti, resp. hustotě deformační energie.

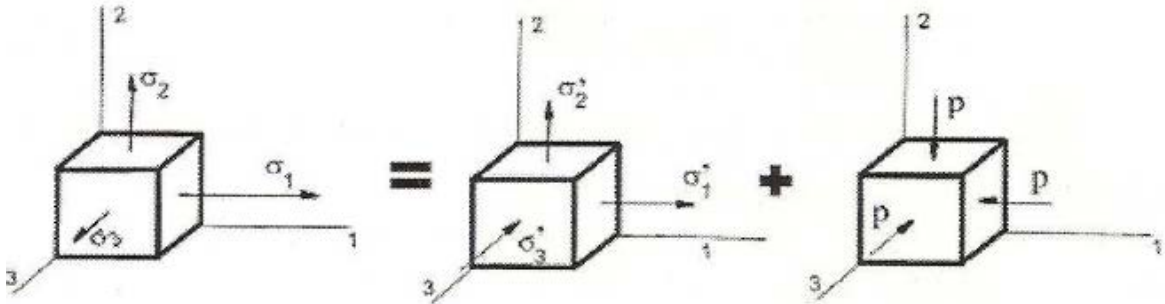
[13]

$$W = \frac{1}{2}(\sigma_1\varepsilon_1 + \sigma_2\varepsilon_2 + \sigma_3\varepsilon_3) \quad (20)$$

Dosažením za složky deformace z rovnice elasticity lze obdržet:

$$W = \frac{1}{2E} [(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) - 2\nu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (21)$$

Rozdělením obecné prostorové napjatosti, danou pro přehlednost hodnotami hlavních napětí, na dvě dílčí části napětí σ_i' způsobuje pouze změnu tvaru elementární krychle, napětí $\sigma_i'' = p$ způsobí pouze změnu objemu (obr. 29). [13]



Obr. 34. Obecná napjatost rozdělená na dílčí napětí [13]

První z napjatostí, způsobující pouze změnu tvaru, se nazývá distorzní částí napjatosti. Druhá napjatost je již zmíněnou hydrostatickou (objemovou) částí napjatosti. [13]

Pro distorzní část napjatosti $e=0$. Pak platí:

$$\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3' = 0 \quad (22)$$

Součtem dílčích napětí je získán:

$$\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_1'' + \sigma_2'' + \sigma_3'' = 3p \quad (23)$$

Velikost hydrostatické (objemové) části napjatosti je dána:

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} \quad (24)$$

Tímto vztahem je tak rozdělení prostorové napjatosti na část distorzní a objemovou uskutečněno, neboť již: [13]

$$\sigma_i = \sigma_i' + \sigma_i'' + p; tj \sigma_i' = \sigma_i - p \quad (25)$$

Měrná energie objemové části napjatosti:

$$W'' = \frac{1 - 2\nu}{6E} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 \quad (26)$$

Měrná energie distorzní části lze obdržet jako rozdíl celkové měrné energie a měrné energie objemové části: [13]

$$W' = W - W'' \quad (27)$$

$$W' = \frac{1 + 4\nu}{3E} [(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)] \quad (28)$$

4.5 Von Misesovo napětí

Jedná se o skalár, pomocí kterého lze určit selhání isotropního materiálu zatíženého obecným víceosým (prostorovým) napětím. Je srovnáváno s pevnostními parametry materiálu získanými při jednoosém zatížení.

Von Misesova hypotéza srovnává napjatosti na základě hodnoty měrné energie části napjatosti, potřebné na změnu tvaru, tj. distorzní napjatosti. Měrná energie distorzní části napjatosti, vyjádřené hlavními napětími je dána rovnicí 28. [13]

Hledáme-li obecnou prostorovou napjatost srovnávací jednoosou napjatost σ_s , která bude mít shodnou velikost W' , bude $W'=W_1$, [13]

$$\sigma_s = [(\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2) - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]^{1/2} \quad (29)$$

Pro případy rovinné napjatosti je srovnávací Von Misesovo napětí dáno vztahem: [13]

$$\sigma_s = [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1\sigma_2]^{1/2} \quad (30)$$

5 SOFTWAREVÁ PODPORA

Protože analyzovaný prvek je tvarově složitější, je vhodné využít určitých počítačových programů, které zajistí přesný a rychlý výpočet.

5.1 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (Finite Element Method - FEM) slouží k řešení parciálních derivačních rovnic. FEM je zobecněná Ritz-Galerkinova variační metoda užívající básových funkcí s malým kompaktním nosičem, úzce spjatým se zvoleným rozdělením řešené oblasti na konečné prvky. [14]

Zpravidla je možné řešit touto metodou problémy, které klasickými postupy nelze úspěšně řešit. Metoda pokrývá celou šíři fyzikálních aplikací: statika, dynamika, akustika, teplo, elektromagnetické pole, elektrostatika, piezoelektrické jevy a proudění. FEM řeší tyto problémy soustavou lineárních rovnic, jejichž konstrukce a řešení lze efektivně provádět za použití výpočetní techniky. [14]

Mezi základní typy FEM analýzy patří: [14]

- Statický – rovnováha vnitřních a vnějších sil působících na těleso. Daná analýza je nezávislá na čase. $\sum F = 0$
- Dynamický – např. šíření vln, vibrace, rychlé děje (exploze, rázy). Tato analýza je závislá na čase. $\sum F = m \cdot a$

5.2 FEM systémy

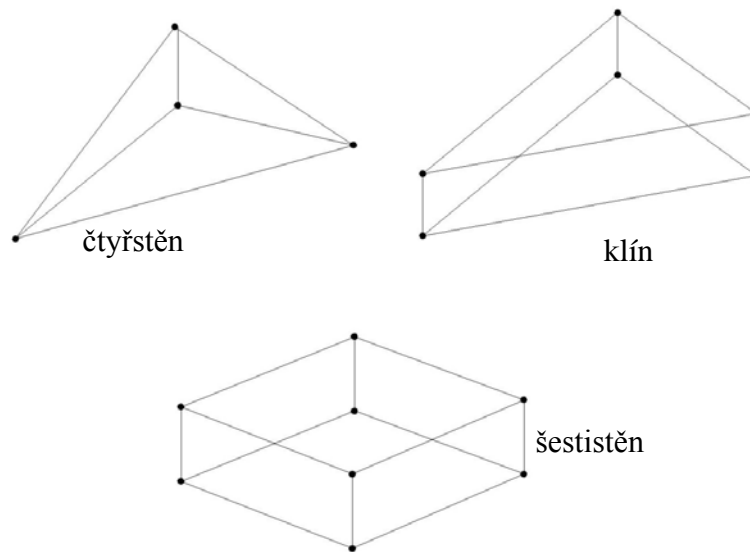
FEM systémy pro svůj výpočet používají metodu konečných prvků. FEM systémy můžeme rozdělit do tří skupin a to jako:

Preprocessor – vytváření modelu

Solver – probíhá výpočet

Postprocessor – vyhodnocení a zpracování výsledků

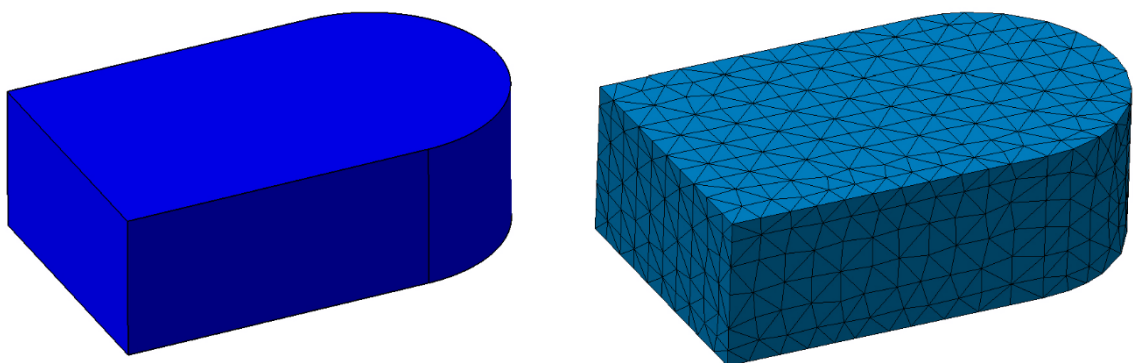
V daných systémech se podle tvaru analyzovaného tělesa používají elementy tvaru přímky, trojúhelníku, čtyřhranu pro 2D tělesa a pro 3D tělesa se používají čtyřstěn, klín nebo šeststěn. [14]



Obr. 35. Základní 3D elementy

Většina FEM systémů pracuje v následujícím pořadí. V preprocessoru se vytváří geometrický model, definují se jeho vlastnosti, vytváří se na něm síť, která obsahuje určitý počet elementů (počet závisí na přesnosti výpočtu) a stanovují se okrajové podmínky spolu s uchycením a zatížením. Takto definovaný a zatížený model je později podroben výpočtu v tzv. solveru. Vypočtené výsledky (deformace, posunutí, napětí) jsou zobrazeny v postprocessoru. [14]

Na následujícím obrázku je zobrazen rozdíl mezi FEM modelem a geometrickým modelem, kde FEM model tělesa je vytvořen z konečného počtu čtyřstěňů.



Obr. 36. Geometrický model x FEM model

6 ODPOROVÉ TENZOMETRY

Měření odporovým tenzometrem, jakožto pasivní elektrotechnickou součástí, je nepřímé měření mechanického napětí na povrchu objektu prostřednictvím jeho deformace v daném bodě. [15]

Snímači s odporovými tenzometry je možno měřit všechny mechanické veličiny, které lze prostřednictvím vhodného deformačního členu převést na deformaci materiálu. Jedná se zejména o měření síly, hmotnosti, napětí, tlaku a krouticího momentu aj. [15]

Obecně odporové tenzometry je možné rozdělit do dvou hlavních skupin:

- kovové
 - příložné
 - drátkové
 - lepené
 - vrstvé
 - foliové
- polovodičové
 - polykrystalické
 - monokrystalické.

6.1 Základní princip měření odporovými tenzometry

Odporové tenzometry pracují na principu změny deformace elektrického vodiče na elektrický odpor. Vyvolaná změna odporu je snímána a následně je podle ní vyhodnocena deformace měřeného objektu. [15]

Následující vztahy popisují, jak je deformace vyhodnocována z naměřeného odporu.

Pro vodič o průřezu S a délce l a s měrným odporem ρ je dán jeho odpor R : [15]

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (31)$$

kde: R - odpor vodiče; ρ - měrný odpor; l - délka; S - plocha průřezu drátku.

Pro relativní prodloužení vodiče platí:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (32)$$

kde: ε -relativní prodloužení; Δl - prodloužení vodiče; l_0 - původní délka vodiče.

Při zatížení vodiče tahem (tlakem) se zvětší jeho délka l a zmenší plocha průřezu S , tudíž naroste hodnota odporu R . [15]

Změna odporu je pomocí parciální deformace vyjádřena pomocí následujícího vztahu: [15]

$$dR = d\rho \cdot \frac{l_0}{S} + dl \cdot \frac{\rho}{S} - \frac{dS}{S^2} \cdot \rho \cdot l \quad (33)$$

Pro poměrnou změnu odporu dR/R platí: [15]

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dS}{s} \quad (34)$$

Pomocí Poissonova čísla μ je vyjádřeno: [15]

$$\frac{dS}{S} = -2 \cdot \mu \cdot \frac{dl}{l} \quad (35)$$

Po úpravě je vyjádřen vztah pro relativní změnu odporu:

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon \cdot \left(\frac{d\rho}{\rho} \cdot \frac{1}{\varepsilon} + 1 + 2 \cdot \mu \right) \quad (36)$$

Výraz v závorce lze nahradit součinitelem deformační citlivosti k (k -faktor), protože u pružného přetvoření je to konstanta závislá na změně délky. Výsledný vztah je dán: [15]

$$\frac{dR}{R} = \varepsilon \cdot k \quad (37)$$

K -faktor je bezrozměrný součinitel, kterým je vyjádřen jak vliv měřicí mřížky, tak i celá konfigurace tenzometru. Výrobce proto provádí na určitém počtu kusů měření K -faktoru a uvádí jej na každém balení včetně tolerance. Teoretická hodnota K -faktoru pro mřížky vyráběné z konstantanu (60% Cu, 40% Ni) je kolem dvou a blíží se jí hodnota K většiny kovů. Jen u některých se hodnota K výrazněji liší (např. platina má $K = +6$, nikl při malých deformacích má $K = -12$). U polovodičů vykazuje větší deformační citlivost piezorezistence, která způsobuje v určitých krystalografických směrech změnu odporu o téměř 100%. [15]

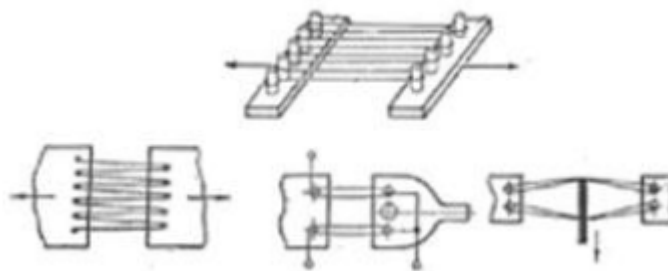
6.2 Kovové tenzometry

Základem kovových tenzometrů je vodivá mřížka vyrobená z kovových materiálů, jejichž příklady a základní vlastnosti jsou uvedeny v následující tabulce. [15]

Tab. 2: Vlastnosti materiálů používaných pro odporové tenzometry [15]

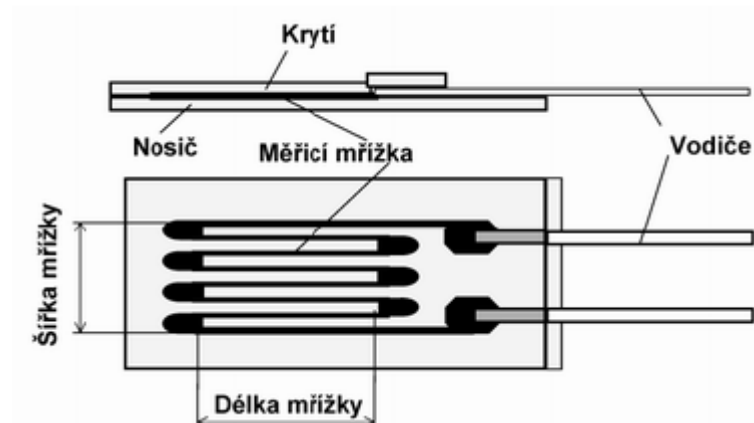
Materiál	Složení [%]	Hustota [g/cm ³]	Mez pevnosti [Mpa]	Měrný odpor [μΩm]	K- faktor[-]
Nikl	100 Ni	8,85	850	0,087	-12,1
Platina	100 Pt	21,4	350	0,106	6
Nichrom	80 Ni + 20 Cr	8,2	100	1,08	2,2
Konstantan	60 Cu + 40 Ni	8,9	600	0,49	2,05

Příložné kovové tenzometry (Obr. 32) jsou snímače, kde jsou mezi soustavu držáků uchyceny odporové drátky. K měřenému tělesu není přilepen aktivní odporový článek, takže nenastávají problémy, že není přenesena deformace na povrch celého snímače. Výhodou je jejich možné použití za vyšších teplot, malá hystereze a malý posun nulového bodu. Nicméně nevýhodou je, že dosažení tepelné rovnováhy je poměrně zdlouhavé a že mají vysoké nároky na mechanické provedení, takže jsou málo využívány. Navíc lepené tenzometry mají nižší pořizovací náklady zejména díky jejich masové výrobě. Příložné tenzometry však nacházejí uplatnění jako snímače pro měření tlaku, tahu, zrychlení apod. [15]



Obr. 37. Ukázka příložných tenzometrů [15]

U lepených tenzometrů (Obr. 38) je měřicí mřížka přilepena na podložku (vyrobenou z papíru, plastické hmoty nebo z kovu), která je připevněna na měřenou součást. V současnosti bývá navíc mřížka překryta izolační fólií, čímž je dosaženo vyšší odolnosti snímače vůči mechanickému poškození. [15]



Obr. 38. Ukázka lepeného tenzometru [15]

Mřížka drátkových lepených tenzometrů je vyrobena z tenkého odporového drátku kruhového průřezu s průměrem 5 až 25 μm , který je uspořádán do tvaru meandru (mnohonásobné vlásenky). Ke koncům drátku bývají připájeny silnější vývody, které slouží pro zapojení do měřicího systému. [15]

Fóliové lepené tenzometry (Obr. 39) mají mřížku s obdélníkovým průřezem, přičemž se tloušťka fólie pohybuje v rozmezí od 1 do 10 μm . Tvar mřížky je vyráběn buď leptáním, nebo fotochemicky, kdy je na kovovou vrstvu nanášena fotocitlivá maska, která je následně exponována, a neexponované části jsou odstraněny. Díky technologii výroby lze dosáhnout prakticky jakéhokoliv tvaru mřížky s přesným geometrickým uspořádáním. [15]

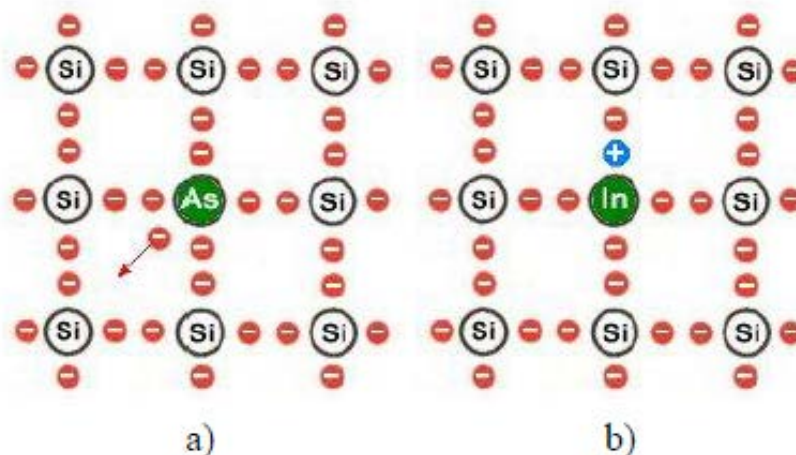


Obr. 39. Ukázka foliového lepeného tenzometru [15]

Díky konstrukci je u fóliových tenzometrů lepší odvod tepla než u drátkových, takže je možné použití větší proudové zátěže, čímž je dosaženo větších výstupních hodnot. Mají také lepší mechanickou stabilitu, tudíž i vyšší přesnost měření. [15]

6.3 Polovodičové tenzometry

Polovodiče jsou látky, které mají při pokojové teplotě měrný odpor vyšší než je odpor vodiče, ale menší než odpor izolantu. Mají schopnost výrazně měnit vodivost a to vlivem fyzikálních jevů nebo přidáním příměsí do základního materiálu. Podle typu příměsi může být nosičem náboje elektron nebo díra, podle čehož je rozlišována vodivost typu N (negativní) a P (pozitivní). Vodivost typu N (Obr. 40a) je způsobena příměsí pětimocného prvku do základního čtyřmocného materiálu, přičemž čtyři valenční elektrony příměsi se podílejí na vazbě se základním materiálem a pátý elektron se na vazbě podílet nemůže. Je vázán malou silou a již při nízkých teplotách se stane volným nosičem elektrického proudu. U typu P (obr. 40b) je příměsí trojmocný materiál, takže při vazbě s čtyřmocným materiálem vzniká kladně nabitá díra, která může být nahrazena elektronem z jiné vazby, takže se přesune na jiné místo a vyvolá tzv. děrovou vodivost. [15]



Obr. 40. Krystalová mřížka polovodiče [15]

Polovodičové tenzometry využívají piezoodporového jevu, tedy že vodivost PN přechodu se mění v závislosti se silovým působením. Takže je-li na PN přechod přiveden konstantní proud a následně nastane silové zatížení, dojde ke změně procházejícího proudu kvůli rozdílné vodivosti přechodu. Vztah popisující relativní změnu měrného elektrického odporu $\Delta\rho/\rho$ s napětím σ je: [15]

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \pi_0 \cdot \sigma \quad (38)$$

kde π_0 - piezoodporový součinitel; σ - napětí.

Základním materiálem polovodičových tenzometrů bývá křemík, germanium nebo indium. Monokrystal materiálu je řezán, broušen nebo leptán do tenkých vláken nebo pásků, které jsou následně lepeny na podložku, podobně jako je tomu u kovových tenzometrů. Polovodičové tenzometry jsou tvrdé a křehké a jejich odpor závisí na druhu a počtu příměsí v základním materiálu. [15]

II. Praktická část

7 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem této diplomové práce je vytvoření parametrického modelu fixačního elementu, tak aby po zadání parametrů došlo k vymodelování klipu v programu Catia V5R18. Klip bude vyráběn vstřikováním, proto je potřeba dodržet požadavky na konstrukci vstřikovaných výrobků. Napětí ve vymodelovaném klipu nesmí překročit mez kluzu. Pro vytvoření parametrického modelu je potřeba si určit závislé a nezávislé parametry klipu a následně vytvořit rovnice popisující vztahy mezi parametry. Pro vytvoření rovnic je potřeba provést sérii mechanických analýz pro zadané materiály.

Jako další cíl je určit zdali dojde k překročení hodnot maximální dovolené deformace FR4 desky dané dle normy IPC/JEDEC-9704. Pro měření je potřeba navrhnout měřící přípravek, který bude měřit průhyb desky v hodnotách 10, 20, 30, 40 a 50 mm.

8 NUMERICKÁ ANALÝZA KLIPU

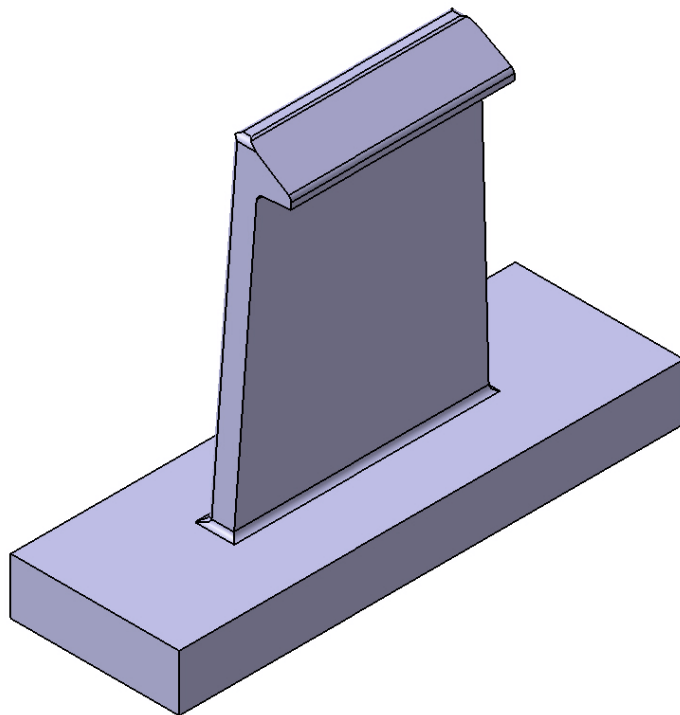
Před samotnou numerickou analýzou je potřeba co nejpřesněji interpretovat daný zkoumaný problém, aby se co nejvíce podobal skutečnosti. Proto pro získání správných výsledků je potřeba definovat několik základních údajů. Jsou to materiálové vlastnosti, tvorba sítě a definování okrajových podmínek a zatížení, které jsou postupně zadávány do programu CATIA V5R18.

8.1 Modelování klipu

Z důvodu větší tvarové složitosti pouzdra byl jako program pro vytvoření modelu použit program CATIA V5R18. Model byl vytvořen v modulu Part design, který slouží pro tvorbu jednotlivých dílů.

Klip byl vymodelován s ohledem na zásady konstrukce vstřikovaných výrobků.

Pro přesnější výsledky analýzy byla vymodelována i oblast kolem klipu, které má simulovat uchycení klipu ve výrobku.



Obr. 41. Model klipu

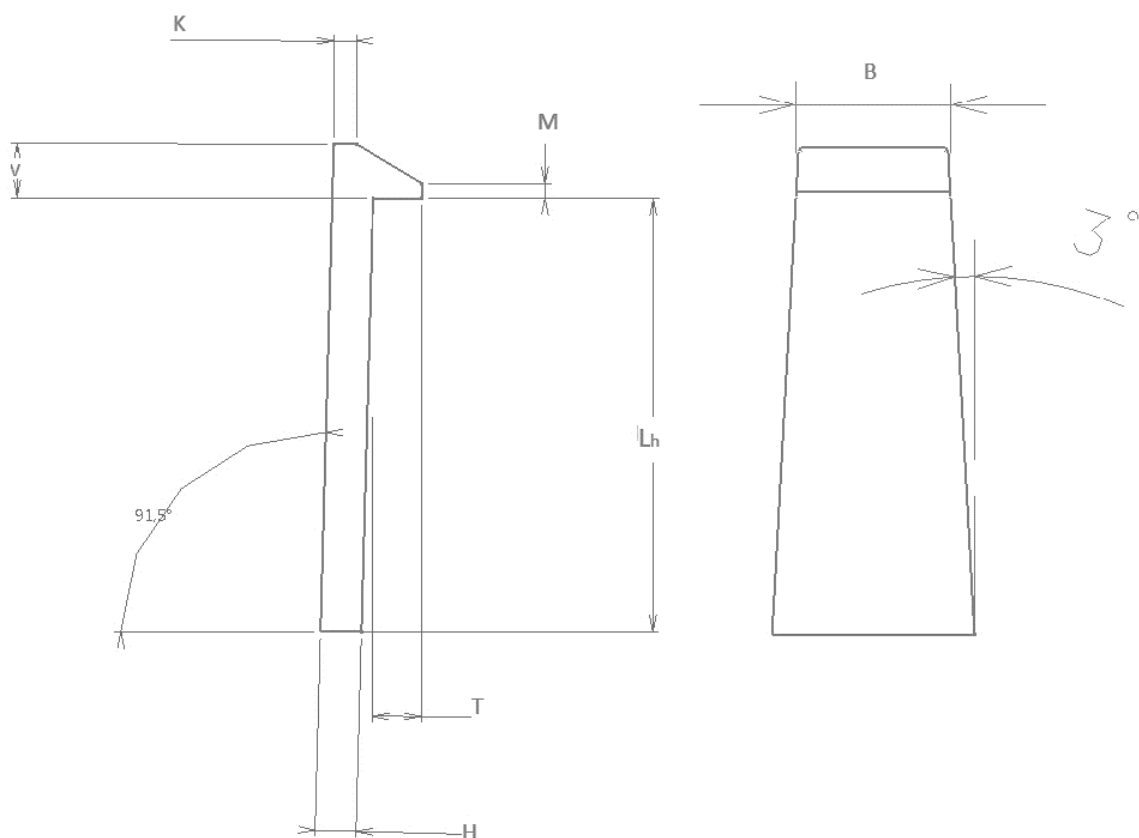
Klip byl modelován s ohledem na následné využití pro tvorbu parametrického modelu. Proto byly některé rozměry zvoleny jako závislé a nezávislé.

Mezi nezávislé hodnoty patří:

- H- tloušťka klipu
- Lh- délka klipu
- B- šířka klipu

Mezi závislé hodnoty patří:

- T- velikost zobáčku je určena z CAE výpočtu
- $K = H/1,8$
- $V = H * 1,3$
- $M = H/3$



Obr. 42. Rozměry klipu

8.2 Materiálové vlastnosti

Pro analýzu byly použity materiály, které se nejčastěji používají při výrobě světlometů. A to jako PMMA, PC, PC+ABS, ABS.

8.2.1 Kopolymer akrylonitril butadien styren (ABS)

Kopolymer ABS je kaučukem modifikovaný kopolymer SAN a má podobnou strukturu jako houževnatý polystyren. ABS se vyznačuje malou odolností vůči povětrnosti a světelnému stárnutí, proto se při výrobě používá větší množství světelných stabilizátorů, absorbérů UV – záření a vyšší množství černého pigmentu pro stálosti proti foto-oxidačním činidlům. [16]

Charakteristické znaky ABS jsou dobrá houževnatost, dobré mechanické vlastnosti, snadná zpracovatelnost, malý elektrostatický náboj, chemická odolnost, tvrdý a lesklý povrch. Je vždy neprůhledný, dobře zpracovatelný všemi technologiemi (vstřikování, válcování, vyfukování, tvarování za tepla, lisování). [16]

ABS nachází využití především pro náročné technické aplikace, jsou-li na budoucí výrobky kladeny jak požadavky na houževnatost, tak i na chemickou odolnost. Největší uplatnění mají na výrobu dílů motorových vozidel (přístrojové desky, mřížky masek na automobilech), spotřebiče pro domácnost (pračky, ledničky, vysavače aj.), zavazadla, telekomunikační a elektrostatické přístroje, nábytek (skořepiny křesel a sedaček), optické přístroje, kancelářské stroje, aj. [16]

Pro analýzu byly použity materiály Terluran HH-112 a Lustran ABS H802. Jejich materiálové data jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 3: Vlastnosti materiálu Terluran HH-112

	Jednotky	Norma	
ITT (220°C, 10kg, 600s)	cm ³ /10min	ISO 1133	6
Sušící teplota	°C		80
Teplota taveniny	°C		230 – 270
Teplota formy	°C		30-60
Smrštění	%		0,4 - 0,7
Modul pružnosti	MPa	ISO 257-1/-2	2700
Mez kluzu	MPa	ISO 257-1/-2	58
Mez pevnosti	MPa	ISO 257-1/-2	81
Hustota	g/cm ³	ISO 1183	1,05
Poissonovo číslo			0,36

Tab. 4: Vlastnosti materiálu Lustran ABS H802

	Jednotky	Norma	
ITT (220°C, 10kg, 600s)	cm ³ /10min	ISO 1133	8
Sušící teplota	°C		80
Teplota taveniny	°C		240
Teplota formy	°C		50-70
Smrštění	%		0,4 - 0,7
Modul pružnosti	MPa	ISO 257-1/-2	2700
Mez kluzu	MPa	ISO 257-1/-2	51
Mez pevnosti	MPa	ISO 257-1/-2	80
Hustota	g/cm ³	ISO 1183	1,05
Poissonovo číslo			0,36

8.2.2 Polymethylmetakrylát (PMMA)

Pro amorfni PMMA je nejtypičtější vlastností jeho čírost a naprostá bezbarvosť i v tlustých vrstvách. To umožňuje nejen jeho dokonalou průhlednosť, ale i snadné probarvení Odolností proti povětrnosti předčí PMMA všechny běžné termoplasty. [16]

PMMA je při teplotě 130 - 140 °C kaučukovitý a snadno tvarovatelný. Vykazuje i vynikající tvarovou paměť. Propustnost světla je u PMMA asi 92% v celém rozsahu spektra. PMMA má dobré mechanické a elektroizolační vlastnosti, odolává vodě, zředěným alkáliím a kyselinám. Neodolává koncentrovanějším kyselinám a hydroxidům. Rozpouští se v aromatických a chlorovaných uhlovodících, esterech, ketonech, etherech. Tepelná odolnost bez zatížení je kolem 80 °C. Je zdravotně nezávadný a rovněž je výhodou snadné spojování PMMA lepením. Jeho nedostatkem je nízká povrchová tvrdost. [16]

PMMA nachází uplatnění při zasklívání oken dopravních prostředků, při výrobě přístrojů, kancelářských potřeb, hodinových sklíček apod. Velké využití má PMMA v zubní protetice, tzv. Dentakryl. [16]

Pro analýzu byl použit materiál Altuglas v 825 T. Materiálová data jsou uvedena v následující tabulce.

Tab. 5: Vlastnosti materiálu Altuglas v 825 T

	Jednotky	Norma	
ITT (230°C, 3,8kg, 600s)	cm ³ /10min	ISO 1133	2,8
Sušící teplota	°C		85-90
Teplota taveniny	°C		230-250
Teplota formy	°C		75-85
Smrštění	%		0,2 - 0,6
Modul pružnosti	MPa	ISO 257-1/-2	3300
Mez kluzu	MPa	ISO 257-1/-2	70
Mez pevnosti	MPa	ISO 257-1/-2	103
Hustota	g/cm ³	ISO 1183	1,19
Poissonovo číslo			0,36

8.2.3 Polykarbonát (PC)

Polykarbonát je transparentní polymer s propustností světla 85% s vysokým indexem lomu. Je dobře rozpustný v chlorovaných uhlovodících, naopak těžce rozpustný v esterech, ketonech a aromatických uhlovodících. [16]

Výhodné vlastnosti PC jsou jeho vysoká rázová houževnatost i za velmi nízkých teplot, rozměrová stabilita až do 140°C, dobré elektroizolační vlastnosti, vysoká mechanická pevnost, nízká absorpce vody, odolnost proti UV – záření, velká stálost proti oxidaci až do 120°C a dobrá odolnost vůči hydrolyze. Odolává roztokům zředěných kyselin, uhličitanu sodného a mýdel, alifatickým uhlovodíkům a alkoholům. [16]

Špatná je jeho odolnost vůči dlouhodobému působení vroucí vody a páry, amoniaku a amoniakem. [16]

Uplatnění PC nachází především v technologii vstřikování, kterou se vyrábějí hlavně technické dílce určené pro použití do vyššího tepelného a mechanického namáhání. Vytlačováním se z PC zhotovují trubky, tyče, profily a tlusté fólie. [16]

Pro analýzu byly použity materiály Makrolon 1260, Makrolon AL2647, Makrolon AL2647 a Lexan LS1. Jejich materiálová data jsou uvedena v následujících tabulkách.

Tab. 6: Vlastnosti materiálu Makrolon 1260

	Jednotky	Norma	
ITT (300°C, 1,2kg, 600s)	cm ³ /10min	ISO 1133	34
Teplota taveniny	°C		280
Teplota formy	°C		80
Smrštění	%		0,5 - 0,7
Modul pružnosti	MPa	ISO 257-1/-2	2350
Mez kluzu	MPa	ISO 257-1/-2	63
Mez pevnosti	MPa	ISO 257-1/-2	55
Hustota	g/cm ³	ISO 1183	1,2
Poissonovo číslo			0,36

Tab. 7: Vlastnosti materiálu Makrolon AL 2447

	Jednotky	Norma	
ITT (300°C, 1,2kg, 600s)	cm ³ /10min	ISO 1133	19
Teplota taveniny	°C		290
Teplota formy	°C		80
Smrštění	%		0,5 - 0,7
Modul pružnosti	MPa	ISO 257-1/-2	2400
Mez kluzu	MPa	ISO 257-1/-2	65
Mez pevnosti	MPa	ISO 257-1/-2	70
Hustota	g/cm ³	ISO 1183	1,2
Poissonovo číslo			0,36

Tab. 8: Vlastnosti materiálu Makrolon AL 2647

	Jednotky	Norma	
ITT (220°C, 10kg, 600s)	cm ³ /10min	ISO 1133	12
Teplota taveniny	°C		290
Teplota formy	°C		80
Smrštění	%		0,6 - 0,8
Modul pružnosti	MPa	ISO 257-1/-2	2400
Mez kluzu	MPa	ISO 257-1/-2	65
Mez pevnosti	MPa	ISO 257-1/-2	70
Hustota	g/cm ³	ISO 1183	1,2
Poissonovo číslo			0,36

Tab. 9: Vlastnosti materiálu Lexan LSI

	Jednotky	Norma	
ITT (300°C, 1,2kg, 600s)	cm ³ /10min	ISO 1133	21
Sušící teplota	°C		120
Teplota taveniny	°C		280 - 300
Teplota formy	°C		80 - 100
Smrštění	%		0,5 - 0,7
Modul pružnosti	MPa	ISO 257-1/-2	2350
Mez kluzu	MPa	ISO 257-1/-2	63
Mez pevnosti	MPa	ISO 257-1/-2	70
Hustota	g/cm ³	ISO 1183	1,2
Poissonovo číslo			0,36

8.2.4 Směs PC a ABS

Chemická afinita PC a ABS je natolik vysoká, že jejich směsi se vyznačují jemnou a stabilní fázovou strukturou i bez použití kompatibilizátorů. Směsi PC/ABS se vyznačují vysokou odolností vůči korozi za napětí, vyšší chemickou odolností při zachování tuhosti a houževnatosti materiálu. Významnému rozšíření této směsi pomáhá příznivá cena. Stěžejní použití materiálu je pro výrobu tepelně, mechanicky a elektricky zatěžovaných součástí. Vykazuje příznivé požárně-technické charakteristiky. [16]

Pro analýzu byly použity materiály Cycology C1100HF a Bayblend T80 XG. Jejich materiálová data jsou uvedena v následujících tabulkách.

Tab. 10: Vlastnosti materiálu Cycloy C1100HF

	Jednotky	Norma	
ITT (260°C, 2,16kg, 600s)	cm ³ /10min	ISO 1133	6
Sušící teplota	°C		95 - 105
Teplota taveniny	°C		250 - 280
Teplota formy	°C		60 – 90
Smrštění	%		0,5 - 0,7
Modul pružnosti	MPa	ISO 257-1/-2	2400
Mez kluzu	MPa	ISO 257-1/-2	55
Mez pevnosti	MPa	ISO 257-1/-2	45
Hustota	g/cm ³	ISO 1183	1,12
Poissonovo číslo			0,36

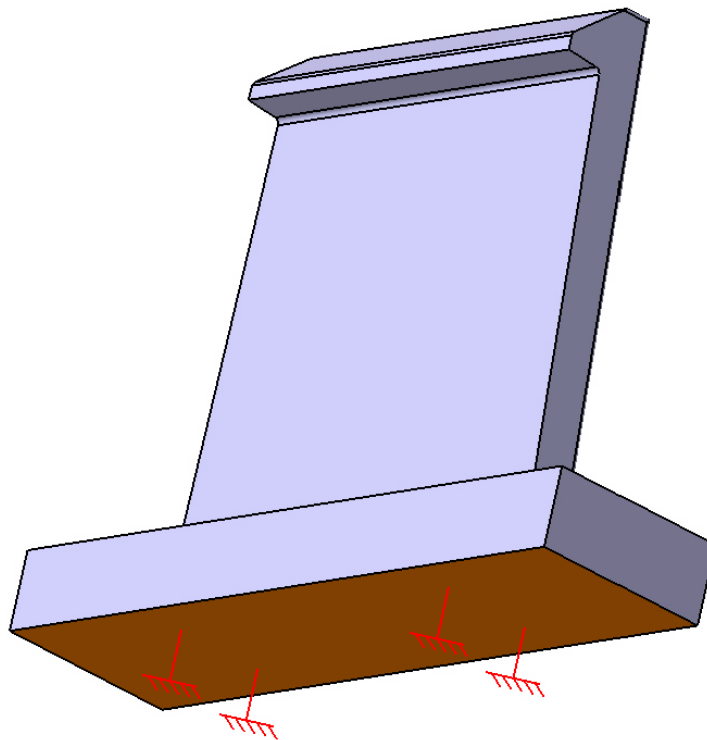
Tab. 11: Vlastnosti materiálu Bayblend T80 XG

	Jednotky	Norma	
ITT (260°C, 5kg, 600s)	cm ³ /10min	ISO 1133	27
Teplota taveniny	°C		260
Teplota formy	°C		80
Modul pružnosti	MPa	ISO 257-1/-2	2500
Mez kluzu	MPa	ISO 257-1/-2	62
Mez pevnosti	MPa	ISO 257-1/-2	50
Hustota	g/cm ³	ISO 1183	1,14
Poissonovo číslo			0,36

8.3 Okrajové podmínky a zatížení

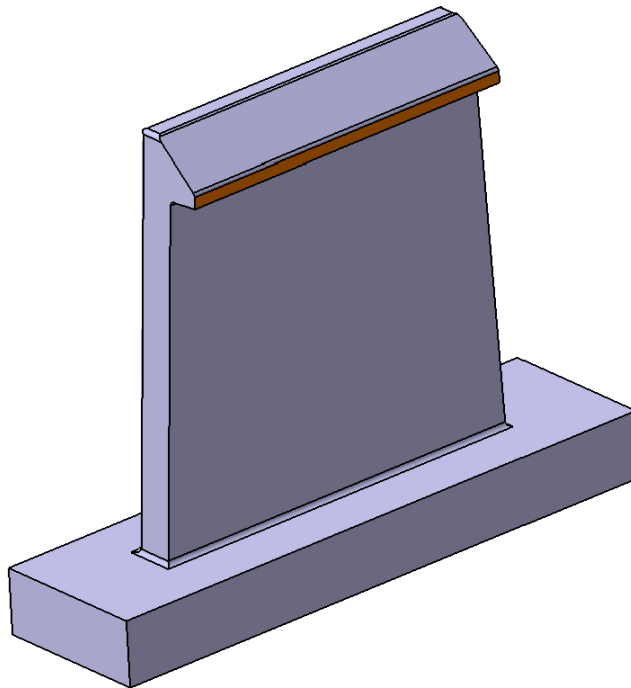
Okrajové podmínky a zatížení mají pokud možno co nejpresněji popsat situaci, při které je daný klip namáhán.

Klip byl uchycen vetknutím za spodní plochu, jak je zobrazeno na následujícím obrázku. Pro uchycení byla využita funkce clamp (vetknutí).



Obr. 43. Uchycení klipu

Zatížení klipu bylo použito, aby co nejvíce připomínalo zasouvání klipu. Proto bylo na oranžově označenou plochu aplikováno posunutí (enforced Displacement), které zajistí posunutí o velikosti zobáčku T. Aby byl poměr tloušťky klipu H a velikosti zobáčku T pokud možno podobný, tak se měnila velikost zobáčku T neboli posunutí.



Obr. 44. Zatížení klipu

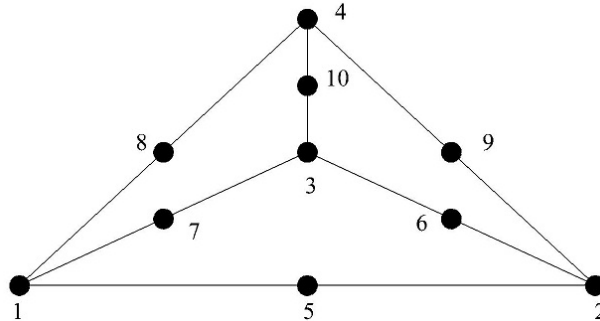
Tab. 12: Hodnoty tloušťky klipu a velikosti zobáčku

Tloušťka klipu H [mm]	Posunutí zobáčku [mm]
1	0,8; 1; 1,2
1,25	0,8; 1; 1,2
1,5	0,8; 1; 1,2
1,75	1; 1,2; 1,4
2	1; 1,2; 1,4
2,25	1,2; 1,4; 1,6
2,5	1,3; 1,5; 1,7
2,75	1,4; 1,6; 1,8
3	1,5; 1,7; 1,9

8.4 Tvorba sítě

Síť vytvořená na modelu je tvořena elementy, které rozdělují těleso na jednotlivé základní oblasti. Mezi jejich parametry patří: číslo; připojené uzly; interpolace; integrační body; materiálové vlastnosti. Dále síť tvoří uzly, které jsou charakterizovány číslem, stupni volnosti a souřadnicemi.

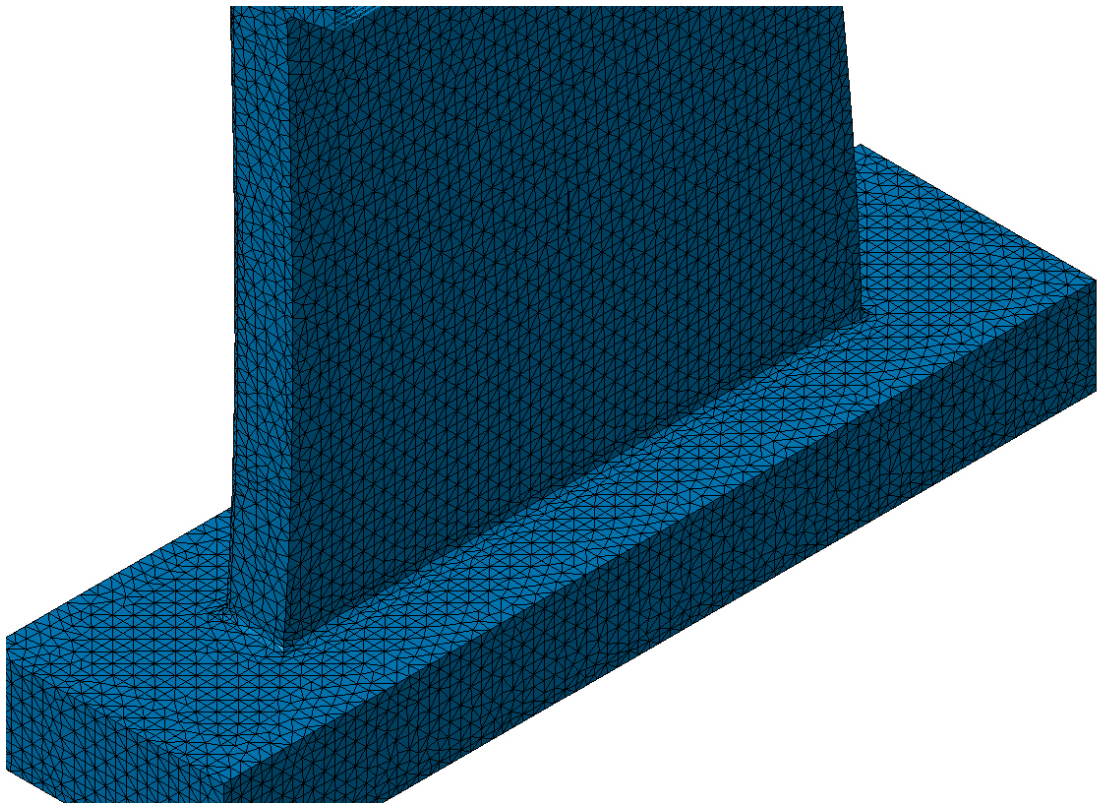
Pro daný klip byl použit typ síťovací metody parabolický tetraedron (čtyřstěn), která slouží pro tvorbu sítě na 3D tělese. Jako element byl zvolen TE-10, který je zobrazen na obrázku 18. Daný element je vytvořen ze čtyřstěnu a má celkem 10 uzlových bodů.



Obr. 45. TE-10 element

Program Catia automaticky určil velikost elementu. Vygenerovaná síť byla avšak velmi hrubá, proto byla potřeba vytvořit jemnější síť.

Po zadání menší velikosti elementu (0,3mm) dosahovala výsledná síť požadované kvality (Obr. 46). Výsledná relativní chyba v hodnotě deformační energie v modelu sítě se pohybovala v rozmezí 2,5 až 3 %.



Obr. 46. Detail sítě

9 VÝPOČET

Jelikož CAE výpočet má sloužit jako základ k vytvoření parametrického modelu, bylo zapotřebí série výpočtů, které měly určit mezní rozměry pro dané tloušťky klipu.

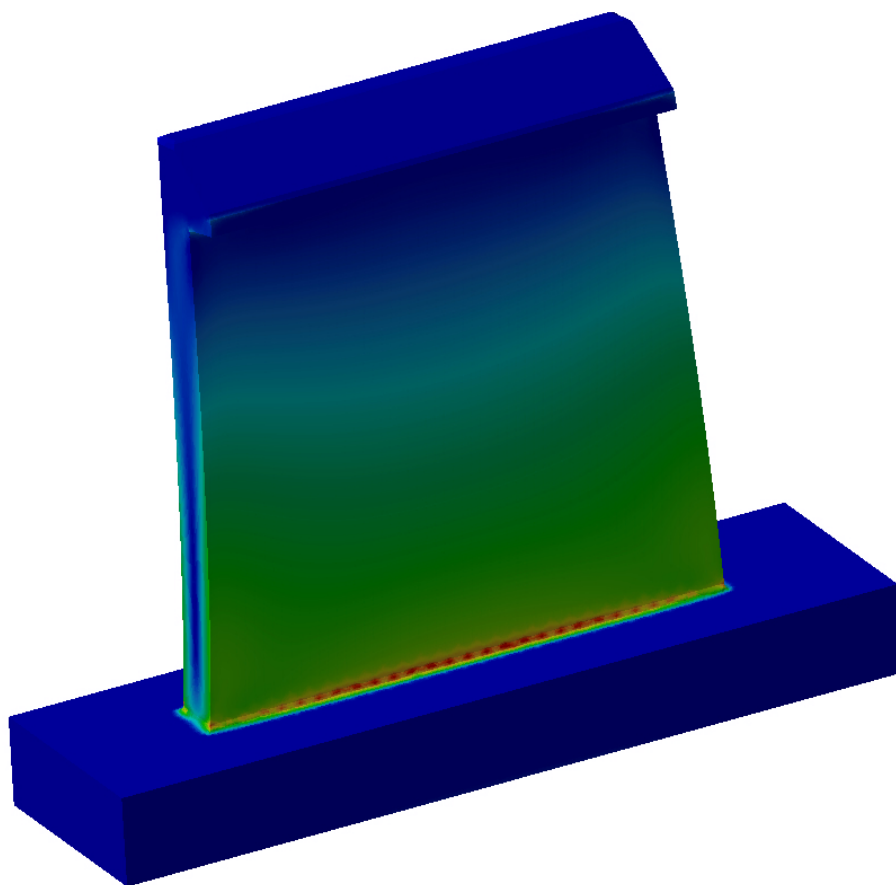
Pro výpočet byly zadány tloušťky klipu od 1mm do 3mm s krokem po 0,25 mm.

Samotná analýza byla prováděna pro zadanou maximální hodnotu šířku klipu $B=15\text{mm}$.

Samotné určení mezní délky L_h probíhalo pomocí výpočtu tří různých velikostí zobáčku pro danou tloušťku. Z vypočtených hodnot byl vytvořen graf a body byla proložena spojnice trendu, pomocí metody nejmenších čtverců. A tím byla získány rovnice, které popisují závislost velikosti zobáčku na délce klipu.

Výpočty byly postupně zopakovány pro všechny dříve zmíněné materiály.

Nejkritičtějším místem na klipu byla po aplikaci zatížení jeho pata, kde dosahovalo napětí nejvyšších hodnot.



Obr. 47. Von Missesovo napětí

Tab. 13: Hodnoty tloušťky klipu a velikosti zobáčku

Tloušťka klipu H [mm]	Velikost zobáčku T [mm]
1	0,8; 1; 1,2
1,25	0,8; 1; 1,2
1,5	0,8; 1; 1,2
1,75	1; 1,2; 1,4
2	1; 1,2; 1,4
2,25	1,2; 1,4; 1,6
2,5	1,3; 1,5; 1,7
2,75	1,4; 1,6; 1,8
3	1,5; 1,7; 1,9

9.1 Výpočet- Terluran HH-112

Výsledky analýz pro Terluran HH-112 jsou zobrazeny v následujících tabulkách.

Napětí na mezi kluzu je 58 MPa. Analýzou bylo zapotřebí určit maximální délku Lh. Její hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

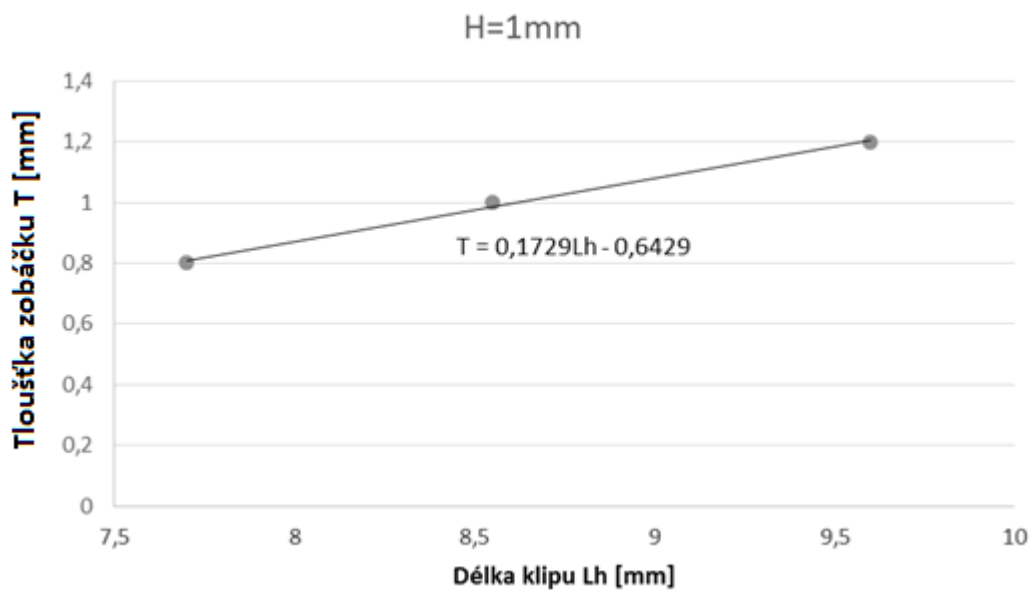
Tab. 14: Vypočtené hodnoty délky pro materiál Terluran HH-112

Tloušťka klipu H [mm]	Velikost zobáčku T [mm]	Délka Lh [mm]	Šířka B [mm]	Von Missesovo napětí [Mpa]
1	0,8	8,3	15	57,7
	1	9,6	15	57,4
	1,2	10,6	15	57,4
1,25	0,8	9,8	15	56,7
	1	10,8	15	56,8
	1,2	12,15	15	56,3
1,5	0,8	11	15	57,2
	1	12,7	15	57,6
	1,2	14	15	57,4
1,75	1	13,5	15	57,2
	1,2	15	15	57,6
	1,4	16,3	15	57,8
2	1	15,2	15	57,5
	1,2	16,5	15	57,5
	1,4	18,2	15	57,3
2,25	1,2	17,3	15	57,9
	1,4	18,7	15	57,2
	1,6	20	15	57,5
2,5	1,3	19,5	15	57,9
	1,5	21,3	15	57,8
	1,7	23,6	15	57,4
2,75	1,4	22,2	15	57,2
	1,6	23,5	15	57,6
	1,8	25,2	15	57,2
3	1,5	24	15	57,5
	1,7	25,7	15	57,5
	1,9	27,2	15	57,6

Jednotlivé rovnice byly získány z vypočtených hodnot pomocí spojnice trendu z bodového grafu. Rovnice, které byly následně použity pro vytvoření parametrického modelu, jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 15: Závislost velikosti zobáčku T na délce klipu L_h (Terluran HH-112)

Tloušťka klipu H [mm]	Rovnice
1	$T = 0,1729 * L_h - 0,6429$
1,25	$T = 0,169 * L_h - 0,8445$
1,5	$T = 0,1325 * L_h - 0,6657$
1,75	$T = 0,1453 * L_h - 0,9724$
2	$T = 0,1325 * L_h - 1,0047$
2,25	$T = 0,1481 * L_h - 1,3642$
2,5	$T = 0,0971 * L_h - 0,584$
2,75	$T = 0,1325 * L_h - 1,5325$
3	$T = 0,1248 * L_h - 1,5$



Obr. 48. Graf závislosti T na L_h pro tloušťku klipu $H=1\text{mm}$ (Terluran HH-112)

9.2 Výpočet- Altuglas v 825 T

Výsledky analýz pro Altuglas V 825 T jsou zobrazeny v následujících tabulkách.

Napětí na mezi kluzu je 70 MPa. Analýzou bylo zapotřebí určit maximální délku Lh. Její hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

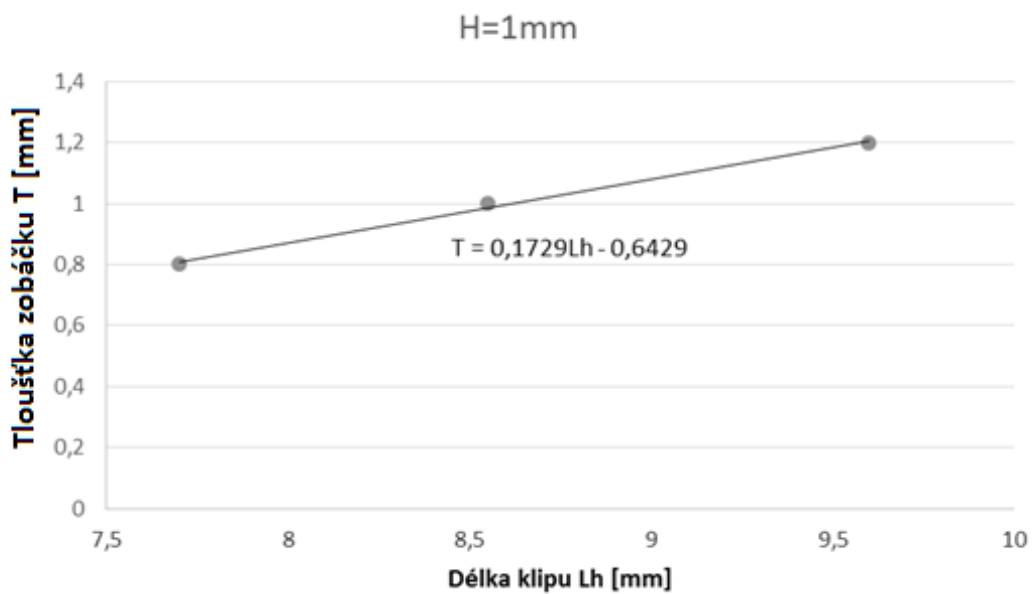
Tab. 16: Vypočtené hodnoty délky pro materiál Altuglas v 825 T

Tloušťka klipu H [mm]	Velikost zobáčku T [mm]	Délka Lh [mm]	Šířka B [mm]	Von Missesovo napětí [Mpa]
1	0,8	8,3	15	70
	1	9,6	15	69,9
	1,2	10,6	15	69,1
1,25	0,8	9,7	15	69,9
	1	11	15	69,2
	1,2	12,2	15	69,8
1,5	0,8	11,2	15	69,3
	1	12,7	15	69,6
	1,2	14,1	15	69,2
1,75	1	13,7	15	69,5
	1,2	14,5	15	69,8
	1,4	16,3	15	69,3
2	1	15,1	15	69,8
	1,2	16,5	15	69,8
	1,4	18,25	15	69,7
2,25	1,2	17,3	15	69,3
	1,4	18,6	15	69,7
	1,6	20,2	15	69,5
2,5	1,3	20	15	69,7
	1,5	21,4	15	69,5
	1,7	23,4	15	69,8
2,75	1,4	22,2	15	69,5
	1,6	23,8	15	69,2
	1,8	25,2	15	69,4
3	1,5	23,6	15	69,7
	1,7	25,5	15	69,5
	1,9	27,3	15	69

Jednotlivé rovnice byly získány z vypočtených hodnot pomocí spojnice trendu z bodového grafu. Rovnice, které byly poté použity pro vytvoření parametrického modelu, jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 17: Závislost velikosti zobáčku T na délce klipu L_h (Altuglas V 825 T)

Tloušťka klipu H [mm]	Rovnice
1	$T = 0,1729 * L_h - 0,6429$
1,25	$T = 0,1599 * L_h - 0,7537$
1,5	$T = 0,1379 * L_h - 0,7464$
1,75	$T = 0,1466 * L_h - 0,9748$
2	$T = 0,1265 * L_h - 0,9014$
2,25	$T = 0,1374 * L_h - 1,1701$
2,5	$T = 0,1164 * L_h - 1,0151$
2,75	$T = 0,1331 * L_h - 1,5598$
3	$T = 0,1081 * L_h - 1,0525$



Obr. 49. Graf závislosti T na L_h pro tloušťku klipu $H=1\text{mm}$ (Altuglas V 825 T)

9.3 Výpočet- Bayblend T80 XG

Výsledky analýz pro Bayblend T80 XG jsou zobrazeny v následujících tabulkách.

Napětí na mezi kluzu je 62 MPa. Analýzou bylo zapotřebí určit maximální délku Lh. Její hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

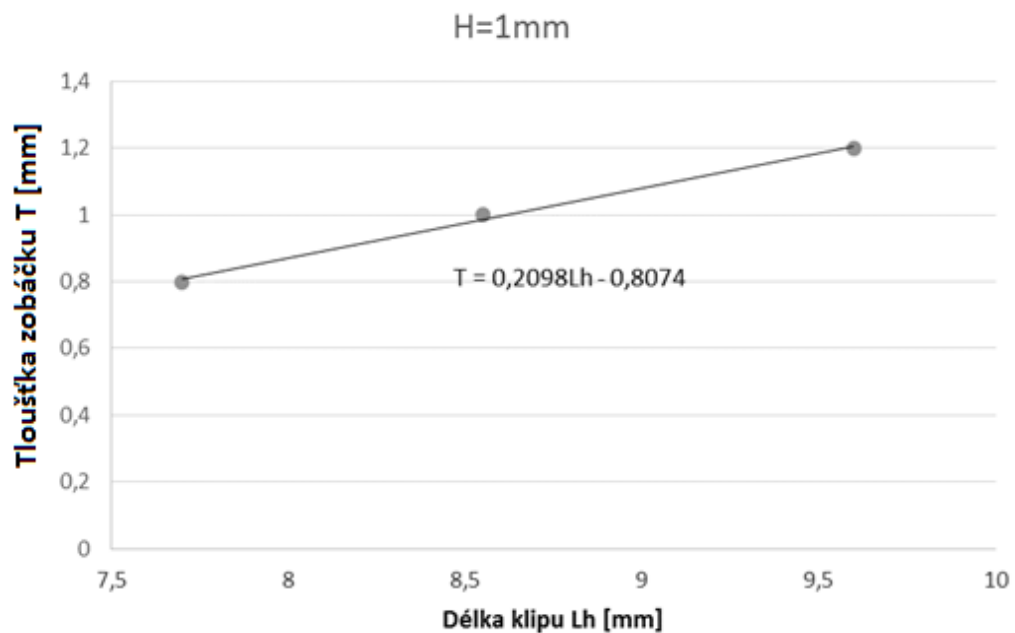
Tab. 18: Vypočtené hodnoty délky pro materiál Bayblend T80 XG

Tloušťka klipu H [mm]	Velikost zobáčku T [mm]	Délka Lh [mm]	Šířka B [mm]	Von Missesovo napětí [Mpa]
1	0,8	7,7	15	61,9
	1	8,55	15	61,8
	1,2	9,6	15	61,9
1,25	0,8	8,8	15	61,7
	1	10,05	15	61,6
	1,2	11	15	61,5
1,5	0,8	10,2	15	61,4
	1	11,5	15	61,5
	1,2	12,8	15	61,5
1,75	1	12,6	15	61,6
	1,2	13,9	15	61,8
	1,4	14,9	15	61,5
2	1	14,3	15	61,4
	1,2	15,9	15	61,9
	1,4	16,8	15	61,5
2,25	1,2	16,1	15	61,8
	1,4	17,3	15	61,7
	1,6	18,2	15	61,8
2,5	1,3	18,5	15	61,4
	1,5	20	15	61,8
	1,7	21	15	61,5
2,75	1,4	20,3	15	61,4
	1,6	22,4	15	61,8
	1,8	23,7	15	61,8
3	1,5	21,75	15	61,8
	1,7	23,5	15	61,7
	1,9	24,7	15	61,9

Jednotlivé rovnice byly získány z vypočtených hodnot pomocí spojnice trendu z bodového grafu. Rovnice, které byly následně použity pro vytvoření parametrického modelu, jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 19: Závislost velikosti zobáčku T na délce klipu L_h (Bayblend T80 XG)

Tloušťka klipu H [mm]	Rovnice
1	$T = 0,2098 * L_h - 0,8074$
1,25	$T = 0,1807 * L_h - 0,7979$
1,5	$T = 0,1538 * L_h - 0,7692$
1,75	$T = 0,1729 * L_h - 1,1865$
2	$T = 0,1559 * L_h - 1,2428$
2,25	$T = 0,189 * L_h - 1,854$
2,5	$T = 0,1579 * L_h - 1,6316$
2,75	$T = 0,1155 * L_h - 0,9567$
3	$T = 0,134 * L_h - 1,4254$



Obr. 50. Graf závislosti T na L_h pro tloušťku klipu $H=1\text{mm}$ (Bayblend T80 XG)

9.4 Výpočet- Cycloy C1100 HF

Výsledky analýz pro ycoloy C1100 HF jsou zobrazeny v následujících tabulkách.

Napětí na mezi kluzu je 55 MPa. Analýzou bylo zapotřebí určit maximální délku Lh. Její hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

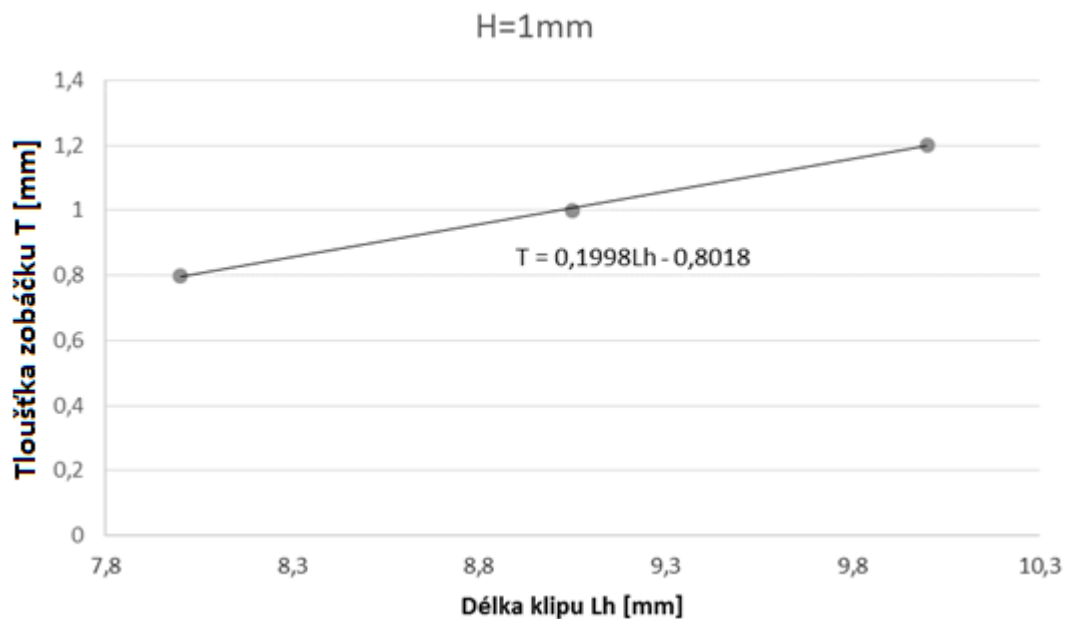
Tab. 20: Vypočtené hodnoty délky pro materiál Cycloy C1100 HF

Tloušťka klipu H [mm]	Velikost zobáčku T [mm]	Délka Lh [mm]	Šířka B [mm]	Von Missesovo napětí [Mpa]
1	0,8	8	15	54,2
	1	9,05	15	54,9
	1,2	10	15	54,7
1,25	0,8	9,6	15	54,7
	1	10,85	15	54,5
	1,2	12	15	54,6
1,5	0,8	10,5	15	54,8
	1	11,95	15	54,7
	1,2	13,3	15	54,9
1,75	1	13,1	15	54,6
	1,2	14,35	15	54,8
	1,4	15,45	15	54,9
2	1	14,75	15	54,5
	1,2	15,9	15	54,6
	1,4	17,5	15	54,5
2,25	1,2	16,6	15	54,6
	1,4	18	15	54,4
	1,6	19,5	15	54,9
2,5	1,3	19,1	15	54,4
	1,5	20,5	15	54,9
	1,7	22,1	15	54,9
2,75	1,4	21	15	54,9
	1,6	23,3	15	54,7
	1,8	24,75	15	54,8
3	1,5	23,4	15	54,8
	1,7	24,9	15	54,7
	1,9	26	15	54,5

Jednotlivé rovnice byly získány z vypočtených hodnot pomocí spojnice trendu z bodového grafu. Rovnice, které byly poté použity pro vytvoření parametrického modelu, jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 21: Závislost velikosti zobáčku T na délce klipu L_h (Cycloy C1100HF)

Tloušťka klipu H [mm]	Rovnice
1	$T = 0,1998 * L_h - 0,8018$
1,25	$T = 0,1666 * L_h - 0,8017$
1,5	$T = 0,1428 * L_h - 0,7017$
1,75	$T = 0,17 * L_h - 1,2307$
2	$T = 0,1442 * L_h - 1,1139$
2,25	$T = 0,1379 * L_h - 1,0864$
2,5	$T = 0,1331 * L_h - 1,2382$
2,75	$T = 0,1049 * L_h - 0,8138$
3	$T = 0,1526 * L_h - 2,0804$



Obr. 51. Graf závislosti T na L_h pro tloušťku klipu $H=1\text{mm}$ (Cycloy C1100HF)

9.5 Výpočet- Lustran ABS H802

Výsledky analýz pro Lustran ABS H802 jsou zobrazeny v následujících tabulkách.

Napětí na mezi kluzu je 51 MPa. Analýzou bylo zapotřebí určit maximální délku Lh. Její hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

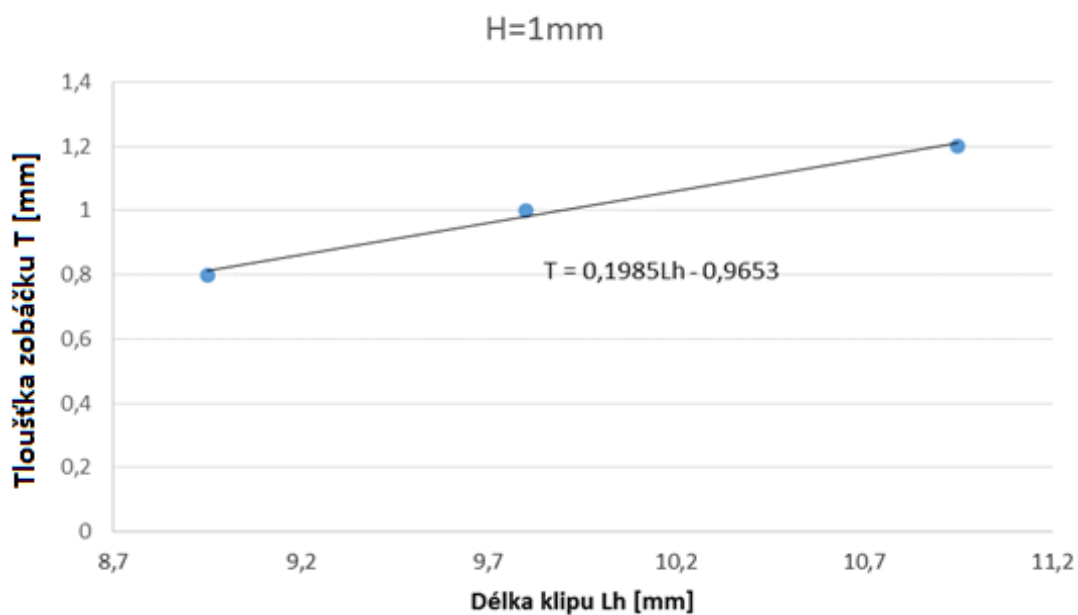
Tab. 22: Vypočtené hodnoty délky pro materiál Lustran ABS H802

Tloušťka klipu H [mm]	Velikost zobáčku T [mm]	Délka Lh [mm]	Šířka B [mm]	Von Missesovo napětí [Mpa]
1	0,8	8,95	15	50,8
	1	9,8	15	50,3
	1,2	10,95	15	50,7
1,25	0,8	10,45	15	50,3
	1	11,8	15	50,9
	1,2	12,8	15	50,8
1,5	0,8	11,8	15	51
	1	13	15	50,9
	1,2	14,6	15	50,7
1,75	1	14,1	15	51
	1,2	15,5	15	50,5
	1,4	16,9	15	50,2
2	1	15,9	15	50,2
	1,2	17,3	15	50,4
	1,4	19,3	15	51
2,25	1,2	18,2	15	50
	1,4	19,9	15	50,3
	1,6	21,8	15	50,8
2,5	1,3	21,3	15	50
	1,5	22,8	15	50,2
	1,7	24,5	15	50,5
2,75	1,4	23,4	15	50,2
	1,6	25	15	50
	1,8	26,5	15	50,2
3	1,5	23,5	15	51
	1,7	27,5	15	50,2
	1,9	29	15	50,3

Jednotlivé rovnice byly získány z vypočtených hodnot pomocí spojnice trendu z bodového grafu. Rovnice, které byly následně použity pro vytvoření parametrického modelu, jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 23: Závislost velikosti zobáčku T na délce klipu L_h (Lustran ABS H802)

Tloušťka klipu H [mm]	Rovnice
1	$T = 0,1985 * L_h - 0,9653$
1,25	$T = 0,169 * L_h - 0,9741$
1,5	$T = 0,1419 * L_h - 0,8635$
1,75	$T = 0,1429 * L_h - 1,0143$
2	$T = 0,1164 * L_h - 0,8377$
2,25	$T = 0,111 * L_h - 0,8162$
2,5	$T = 0,1248 * L_h - 1,3546$
2,75	$T = 0,129 * L_h - 1,6204$
3	$T = 0,1068 * L_h - 1,213$



Obr. 52. Graf závislosti T na L_h pro tloušťku klipu $H=1\text{mm}$ (Lustran ABS H802)

9.6 Výpočet- Makrolon 1260 a Lexan LS1

Výsledky analýz pro Makrolon 1260 a Lexan LS1 jsou zobrazeny v následujících tabulkách.

Napětí na mezi kluzu je 63 MPa. Analýzou bylo zapotřebí určit maximální délku Lh. Její hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

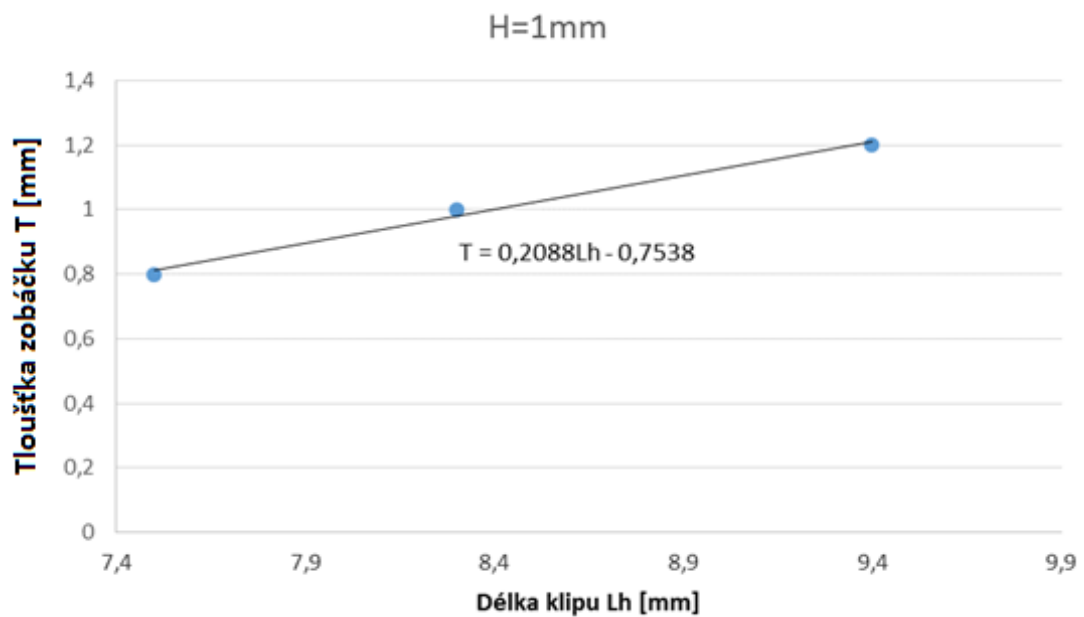
Tab. 24: Vypočtené hodnoty délky pro materiály Makrolon 1260 a Lexan LS1

Tloušťka klipu H [mm]	Velikost zobáčku T [mm]	Délka Lh [mm]	Šířka B [mm]	Von Missesovo napětí [Mpa]
1	0,8	7,5	15	62,9
	1	8,3	15	62,2
	1,2	9,4	15	62,8
1,25	0,8	8,5	15	62,4
	1	9,8	15	62,1
	1,2	10,8	15	62,8
1,5	0,8	10,1	15	62,8
	1	11,3	15	62,3
	1,2	12,6	15	62,3
1,75	1	11,9	15	62,8
	1,2	13,1	15	62,3
	1,4	14,4	15	62,9
2	1	13	15	62,2
	1,2	14,8	15	62
	1,4	16,2	15	62,3
2,25	1,2	15,6	15	62,5
	1,4	17	15	62,1
	1,6	17,8	15	62,2
2,5	1,3	17,4	15	62,5
	1,5	18,9	15	62,8
	1,7	20,45	15	62,7
2,75	1,4	19,7	15	62,5
	1,6	22	15	62,1
	1,8	24	15	62,3
3	1,5	22,1	15	62
	1,7	23,1	15	62,6
	1,9	24,4	15	62,4

Jednotlivé rovnice byly získány z vypočtených hodnot pomocí spojnice trendu z bodového grafu. Rovnice, které byly následně použity pro vytvoření parametrického modelu, jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 25: Závislost velikosti zobáčku T na délce klipu L_h (Makrolon 1260 a Lexan LS1)

Tloušťka klipu H [mm]	Rovnice
1	$T = 0,2088 * L_h - 0,7538$
1,25	$T = 0,1729 * L_h - 0,6774$
1,5	$T = 0,1599 * L_h - 0,8124$
1,75	$T = 0,1599 * L_h - 0,9002$
2	$T = 0,1244 * L_h - 0,6238$
2,25	$T = 0,1774 * L_h - 1,5806$
2,5	$T = 0,1311 * L_h - 0,9807$
2,75	$T = 0,0929 * L_h - 0,4339$
3	$T = 0,1729 * L_h - 2,312$



Obr. 53. Graf závislosti T na L_h pro tloušťku klipu $H=1\text{mm}$ (Makrolon 1260 a Lexan LS1)

9.7 Výpočet- Makrolon AL2447 a Makrolon AL2647

Výsledky analýz pro Makrolon AL2447 a Makrolon AL2647 jsou zobrazeny v následujících tabulkách.

Napětí na mezi kluzu je 65 MPa. Analýzou bylo zapotřebí určit maximální délku Lh. Její hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

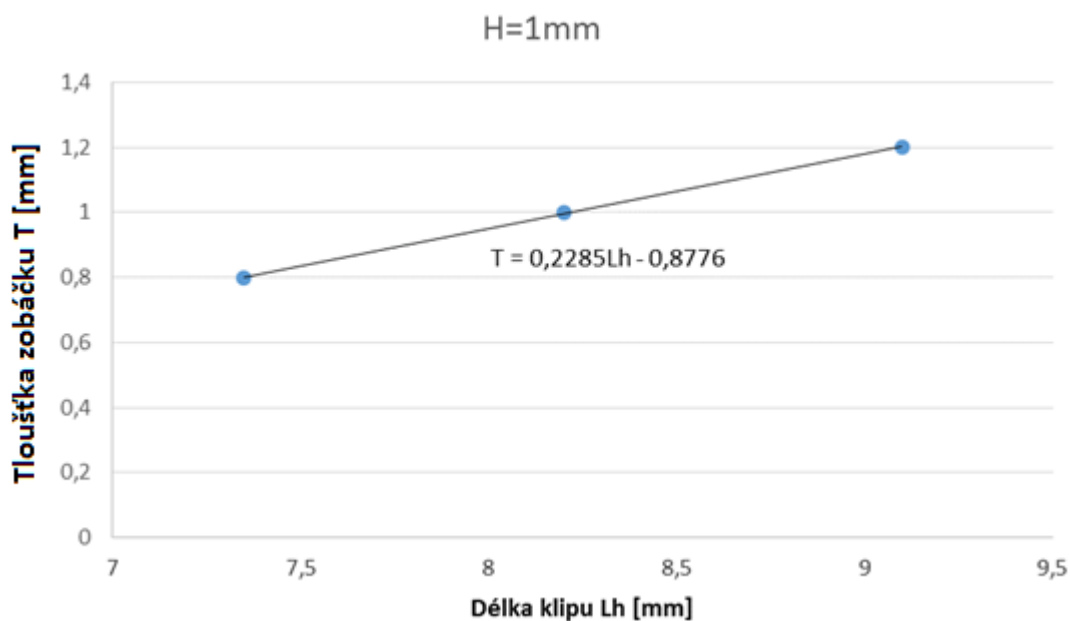
Tab. 26: Vypočtené hodnoty délky pro materiály Makrolon AL2447 a Makrolon AL2647

Tloušťka klipu H [mm]	Velikost zobáčku T [mm]	Délka Lh [mm]	Šířka B [mm]	Von Missesovo napětí [Mpa]
1	0,8	7,35	15	64,2
	1	8,2	15	64,7
	1,2	9,1	15	64,5
1,25	0,8	8,5	15	64,5
	1	9,7	15	64,1
	1,2	10,6	15	64,2
1,5	0,8	10	15	64,8
	1	11,3	15	64,4
	1,2	12,6	15	64,1
1,75	1	12,1	15	64,5
	1,2	13,1	15	64,8
	1,4	14,4	15	64
2	1	13,3	15	64,9
	1,2	14,7	15	64,8
	1,4	16,25	15	64,8
2,25	1,2	15,4	15	64,5
	1,4	16,9	15	64,8
	1,6	17,7	15	64,2
2,5	1,3	17,55	15	64,2
	1,5	19,25	15	64,5
	1,7	20,2	15	64,1
2,75	1,4	19,75	15	64,3
	1,6	21,6	15	64,5
	1,8	23,2	15	64,7
3	1,5	21,3	15	64,5
	1,7	22,4	15	64,9
	1,9	23,9	15	64,8

Jednotlivé rovnice byly získány z vypočtených hodnot pomocí spojnice trendu z bodového grafu. Rovnice, které byly následně použity pro vytvoření parametrického modelu, jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 27: Závislost velikosti zobáčku T na délce klipu L_h (Makrolon AL2447 a Makrolon AL2647)

Tloušťka klipu H [mm]	Rovnice
1	$T = 0,2285 * L_h - 0,8776$
1,25	$T = 0,1892 * L_h - 0,8162$
1,5	$T = 0,1538 * L_h - 0,7385$
1,75	$T = 0,1729 * L_h - 1,0827$
2	$T = 0,1355 * L_h - 0,7983$
2,25	$T = 0,1687 * L_h - 1,4117$
2,5	$T = 0,147 * L_h - 1,2933$
2,75	$T = 0,1157 * L_h - 0,8903$
3	$T = 0,1526 * L_h - 1,7395$

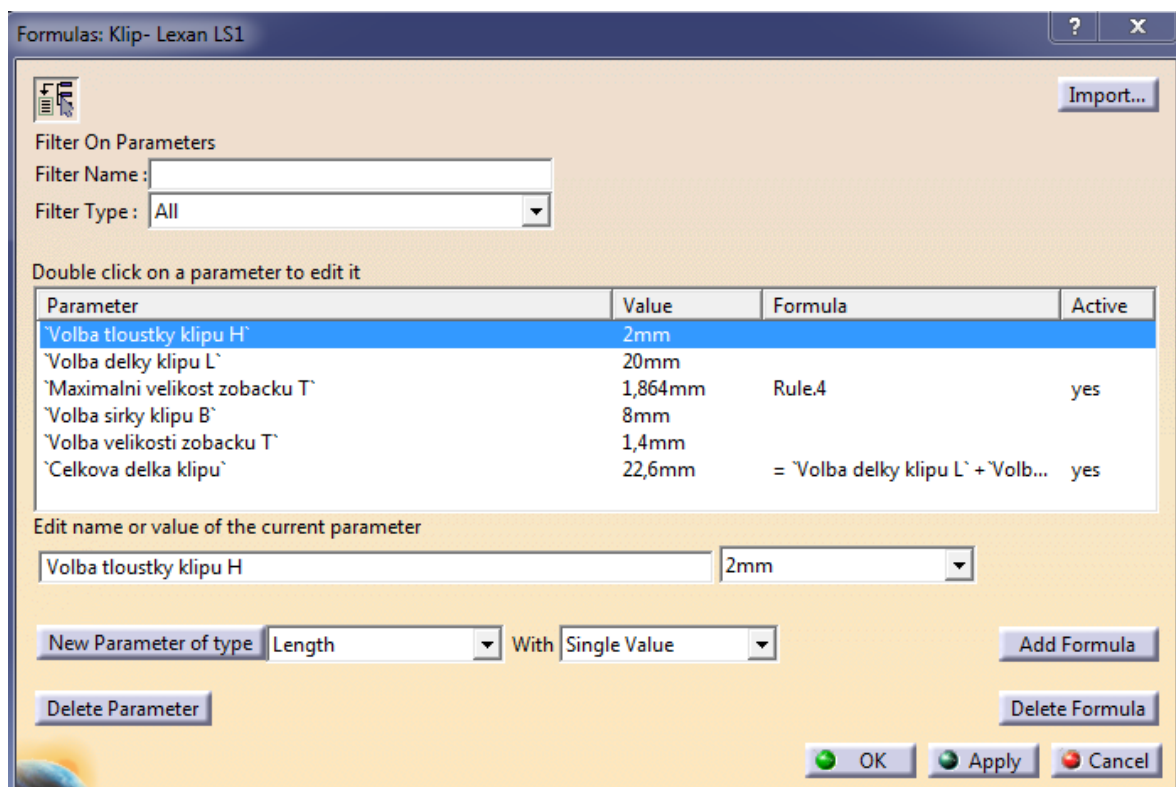


Obr. 54. Graf závislosti T na L_h pro tloušťku klipu $H=1\text{mm}$ (Makrolon AL2447 a Makrolon AL2647)

10 TVORBA PARAMETRICKÉHO MODELU

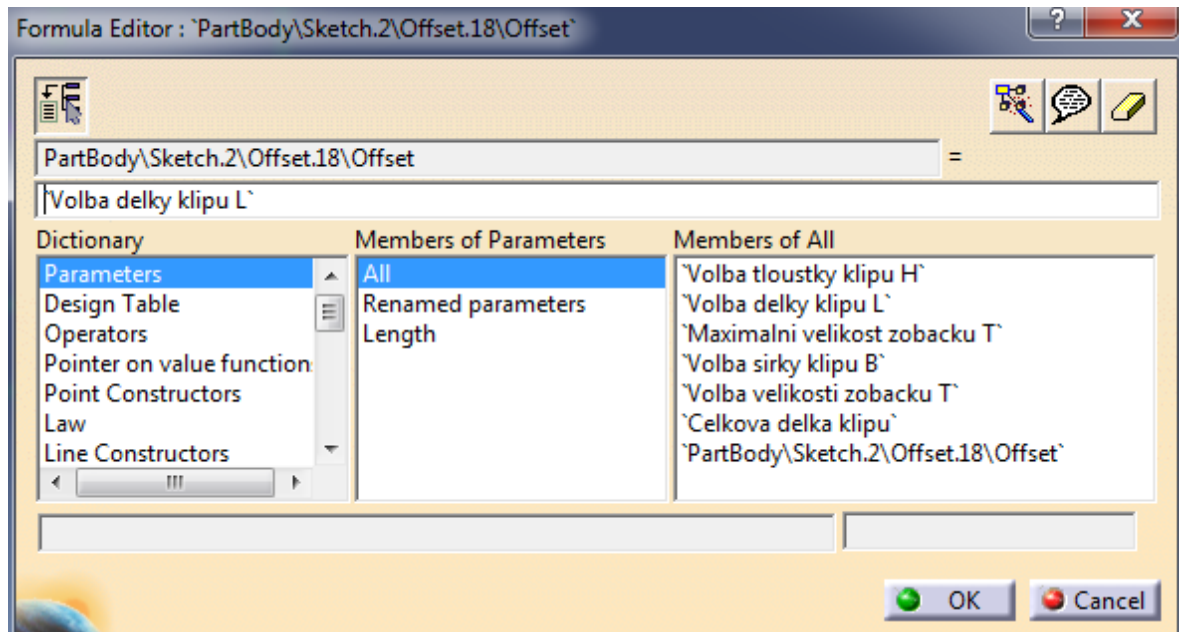
Pro tvorbu parametrického modelu byl použit modul Knowledge Advisor v programu Catia V5. Tento modul umožňuje poměrně komplexní tvorbu parametrických modelů.

Avšak nejdříve bylo potřeba vytvořit jednotlivé parametry. K tomu slouží funkce Formulas (rovnice). Po kliknutí na ikonu se zobrazí nabídka pro tvorbu nového parametru. Pro tvorbu parametrů bylo použito typu Length (délka), který slouží k přiřazení dané délky k požadovanému rozměru.



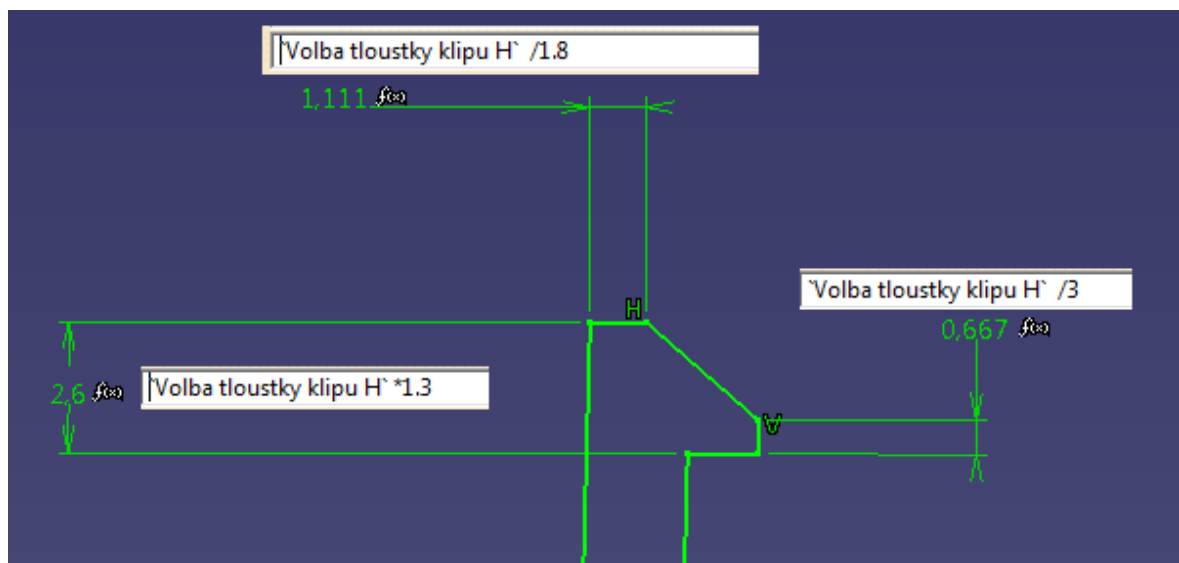
Obr. 55. Ukázka funkce Formulas

Postupně byly vytvořeny výše zobrazené parametry. A tyto parametry byly následně přiřazený jednotlivým rozměrům ve skici modelu. Samotné přiřazení probíhalo pomocí dvojkliku na danou kótu a následně kliknutí pravým tlačítkem a vybrání edit formula (změna rovnice), vybráním vytvořeného parametru a potvrzením OK. To, že je dané kóta propojena s parametrem, je zobrazeno přidáním znaku $f(x)$ za hodnotu kóty.



Obr. 56. Přiřazení parametru ke kótě

Dále bylo potřeba definovat rozměry vrchní části klipu, aby byly závislé na vytvořených parametrech. Dané závislosti jsou zobrazeny na následujícím obrázku,



Obr. 57. Závislé rozměry klipu

Po vytvoření přiřazení parametrů bylo zapotřebí přiřazení vypočtených vztahů do modelu. K tomu bylo využito funkce Rule (pravidlo). Kde za pomoci jednoduchého programování bylo vytvořeno pravidlo, které obsahuje všechny rovnice pro daný materiál.

```

Rule Editor : Rule.4 Active
/*Rule created by Mahony 9.1.2014*/
if `Volba tloustky klipu H` == 1mm
{
`Maximalni velikost zobacku T` = `Volba delky klipu L` * (0.2088) -(0.7538mm)}
else if `Volba tloustky klipu H` ==1.25mm
{
`Maximalni velikost zobacku T` = `Volba delky klipu L` * (0.1729) -(0.6774mm)}
else if `Volba tloustky klipu H` ==1.5mm
{
`Maximalni velikost zobacku T` = `Volba delky klipu L` * (0.1599) -(0.8124mm)}
else if `Volba tloustky klipu H` ==1.75mm
{
`Maximalni velikost zobacku T` = `Volba delky klipu L` * (0.1599) -(0.9002mm)}
else if `Volba tloustky klipu H` ==2mm
{
`Maximalni velikost zobacku T` = `Volba delky klipu L` * (0.1244) -(0.6238mm)}
else if `Volba tloustky klipu H`==2.25 mm
{
`Maximalni velikost zobacku T` = `Volba delky klipu L` * (0.1774) -(1.5806mm)}
else if `Volba tloustky klipu H` ==2.5mm
{
`Maximalni velikost zobacku T` = `Volba delky klipu L` * (0.1311) -(0.9807mm)}
else if `Volba tloustky klipu H`== 2.75mm
{
`Maximalni velikost zobacku T` = `Volba delky klipu L` * (0.0929) -(0.4339mm)}
else if `Volba tloustky klipu H` ==3mm
{
}
`Maximalni velikost zobacku T` = `Volba delky klipu L` * (0.17298) -(2.312mm)}

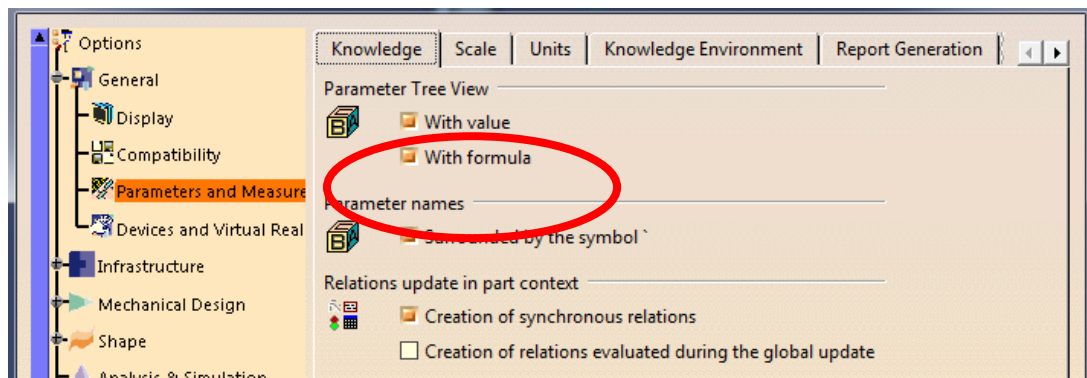
```

Obr. 58. Vytvořené pravidlo pro materiál Lexan LSI

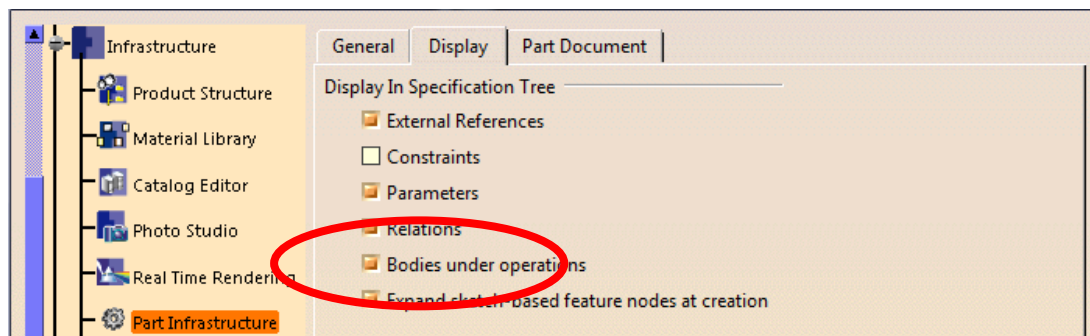
Jako další byly vytvořeny kontroly, které mají za úkol kontrolovat, aby zadané rozměry byly v požadovaném rozsahu. Kontroly jsou celkem čtyři. První kontrola kontroluje hodnotu zadané šířky zobáčku B, aby byla vyšší nebo rovna mm. Druhá kontrola kontroluje hodnotu zadané šířky zobáčku B, aby byla nižší nebo rovna 15 mm. Třetí kontrola kontroluje hodnotu zadané velikosti zobáčku T, aby byla nižší než hodnota maximální hodnoty velikost zobáčku. Poslední kontrola kontroluje hodnotu velikosti zobáčku T. Pokud je její velikost menší než polovina šířky zobáčku, napíše upozornění, aby byla zvětšena délka klipu L. Protože pak by měl výsledný klip zobáček příliš malý, a tím by neplnil správně jeho funkci.

10.1 Postup vytvoření klipu o požadovaných rozměrech

Po otevření vytvořeného souboru pro daný materiál je nejprve potřeba povolit zobrazení parametrů. To se provede kliknutím na panel Tools a dále Options a zde je potřeba mít v kartě Parameters and Measure vybrané With value a With formula. Dále je ještě mít v záložce Part Infrastructure vybrané Display Parameters a Relations.

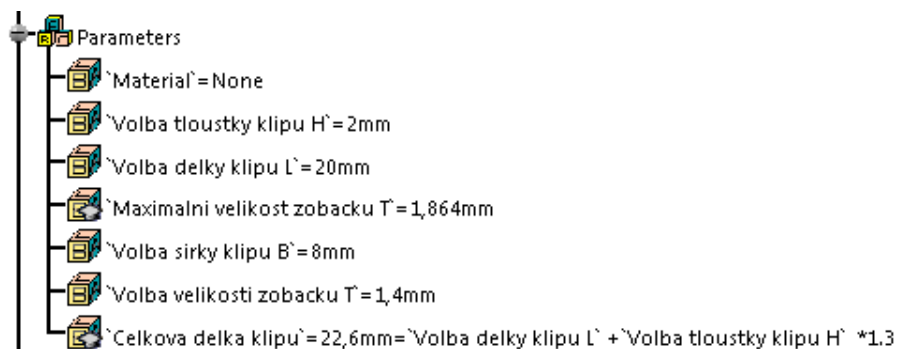


Obr. 59. Záložka Parameters and Measure



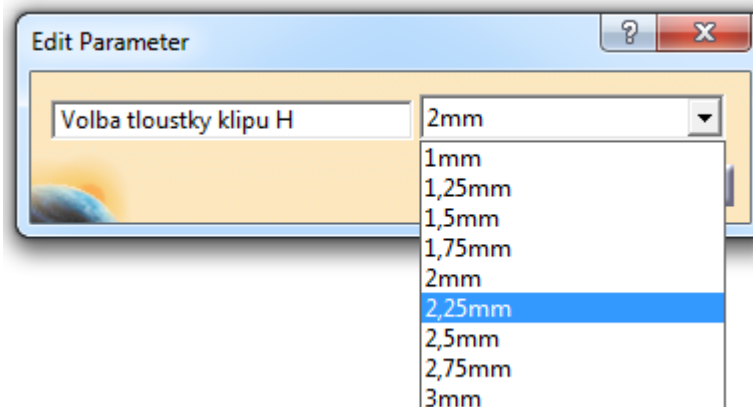
Obr. 60. Záložka Part Infrastructure

Po nastavení by se měly zobrazit vytvořené parametry a konstruktér může nyní začít s tvorbou požadovaného klipu. Na následujícím obrázku jsou zobrazeny parametry, které uživatel uvidí po správném nastavení.



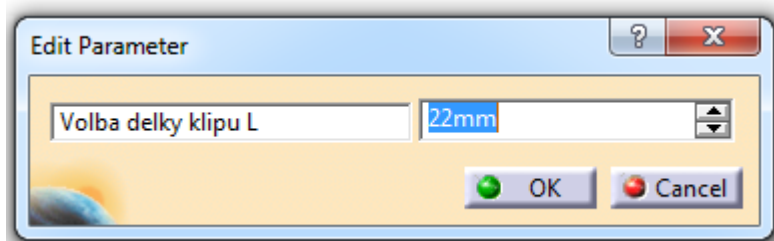
Obr. 61. Vytvořené parametry

Jako první si konstruktér vybere tloušťku klipu H. Daný parametr nabízí pouze hodnoty, pro které byla provedena analýza. A to v rozmezí od 1mm do 3mm.



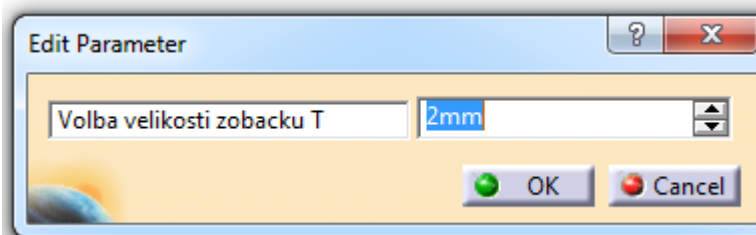
Obr. 62. Volba tloušťky klipu H

Jako další zadává délku klipu L.



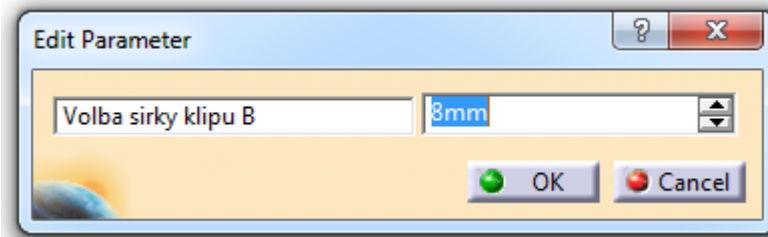
Obr. 63. Volba délky klipu L

Po zadání těchto dvou hodnot je vypočtena maximální velikost zobáčku T, která slouží uživateli pro volbu velikosti zobáčku T. V daném případě je maximální velikost zobáčku 2,32 mm.



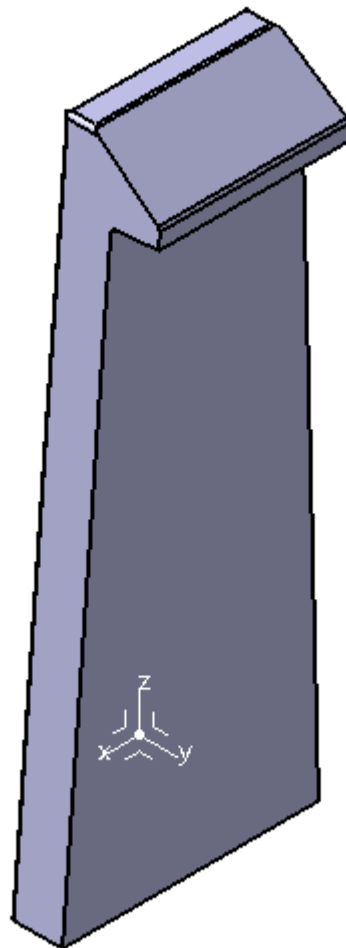
Obr. 64. Volba velikosti zobáčku T

Jako poslední je zapotřebí zadat šířku klipu B, která by měla být v rozmezí mezi 3 a 15mm.



Obr. 65. Volba šířky klipu B

Po zadání všech hodnot si může konstruktér vytvořený klip přidat do svého partu.



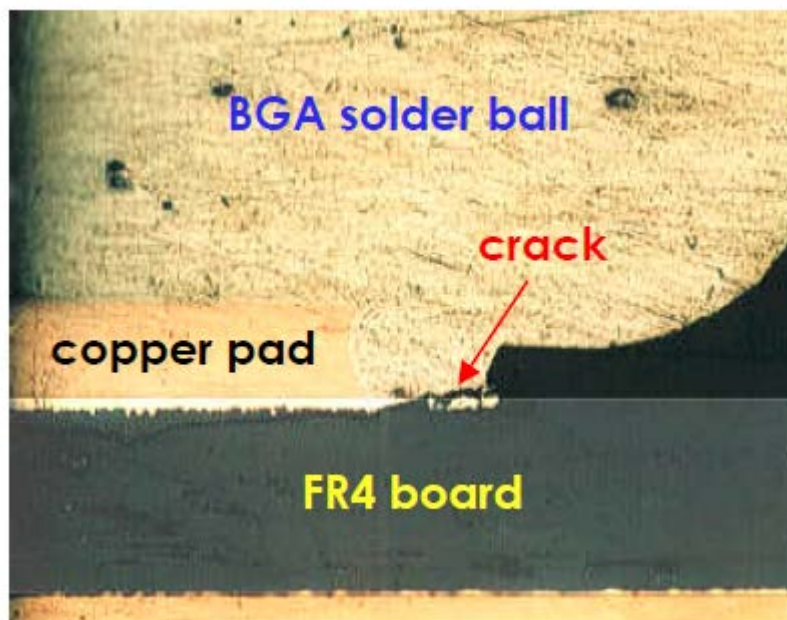
Obr. 66. Vytvořený klip

11 NORMA IPC/JEDEC-9704

Norma popisuje specifický postup, jak postupovat při tenzometrickém měření prováděné na deskách plošných spojů při jejich montáži. [17]

Měření pomocí tenzometrů přináší objektivní analýzu deformace a úrovně rychlosti deformace součástek (kondenzátor, rezistor aj.) na deskách plošných spojů, které vznikají v průběhu montáže desek. [17]

Určení mezního stavu deformace desek plošných spojů je důležité s ohledem na citlivost pájených součástek na vznik trhlin ve spoji. Tyto trhliny jsou vyvolány deformací desek, která je přenášena do spojů a může vést až k úplnému odlomení BGA pájecí kuličky od povrchu desky. [17]



Obr. 67. Zobrazení praskliny mezi deskou a BGA pájecí kuličkou [16]

Norma dále popisuje aplikaci a umístění tenzometrů na desku a přístrojové vybavení a určení mezního limitu deformace desky. Limity deformace mohou být určeny buď od výrobce desek, komponent nebo se mohou řídit dle kritérií dané normou. [17]

11.1 Určení deformačních limitů

Norma povoluje tři základní postupy pro určení deformačních limitů.

Jako první je postup dle komponentů na desce, ve kterém jsou deformační limity a specifické umístění tenzometrů dáno výrobcem komponentů. [17]

Druhý postup je dán dle zákazníkem určených limitů, vůči kterým musí všechny komponenty desek porovnávat. [17]

Třetí postup je podobný k dvěma předešlým lišícím se tím, že deformační limity se mění s rychlostí deformace. [17]

11.2 Limit deformace dle rychlosti deformace

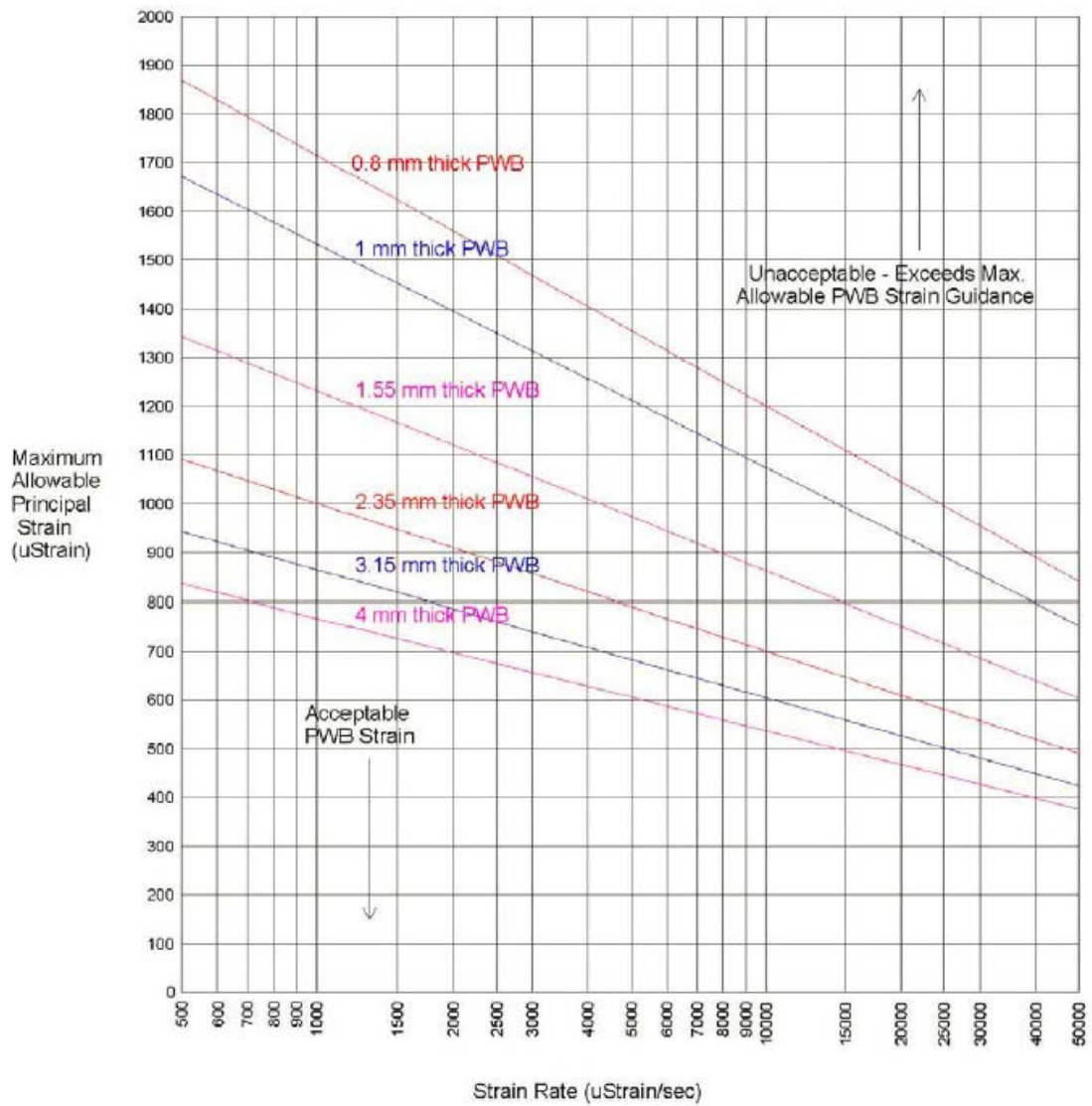
Při měření dovolené deformace desky plošných spojů bylo pozorováno, že deformace desky je funkcí rychlosti deformace desky při jejím ohýbání.

Pro určení limitu deformace je dán vzorec:

$$\text{Dovolená deformace} = \sqrt{\frac{2,35}{\text{šířka DPS}} \cdot (1900 - 300 \cdot \log(\text{rychlost deformace}))} \quad (39)$$

kde jednotky dovolená deformace [$\mu\text{m}/\text{m}$]; šířka desky [mm]; rychlost deformace [$\mu\text{m}/\text{s}$].

Na následujícím obrázku je zobrazení mezní deformace pro různé šířky desek plošných spojů. Dovolené deformace desek se nacházejí pod mezní křivkou. Pokud jsou nějaká naměřená hodnoty nad mezní křivkou, může docházet ke vzniku prasklin a porušení pájených spojů.



Obr. 68. Závislost dovolené deformace na rychlosti deformace [17]

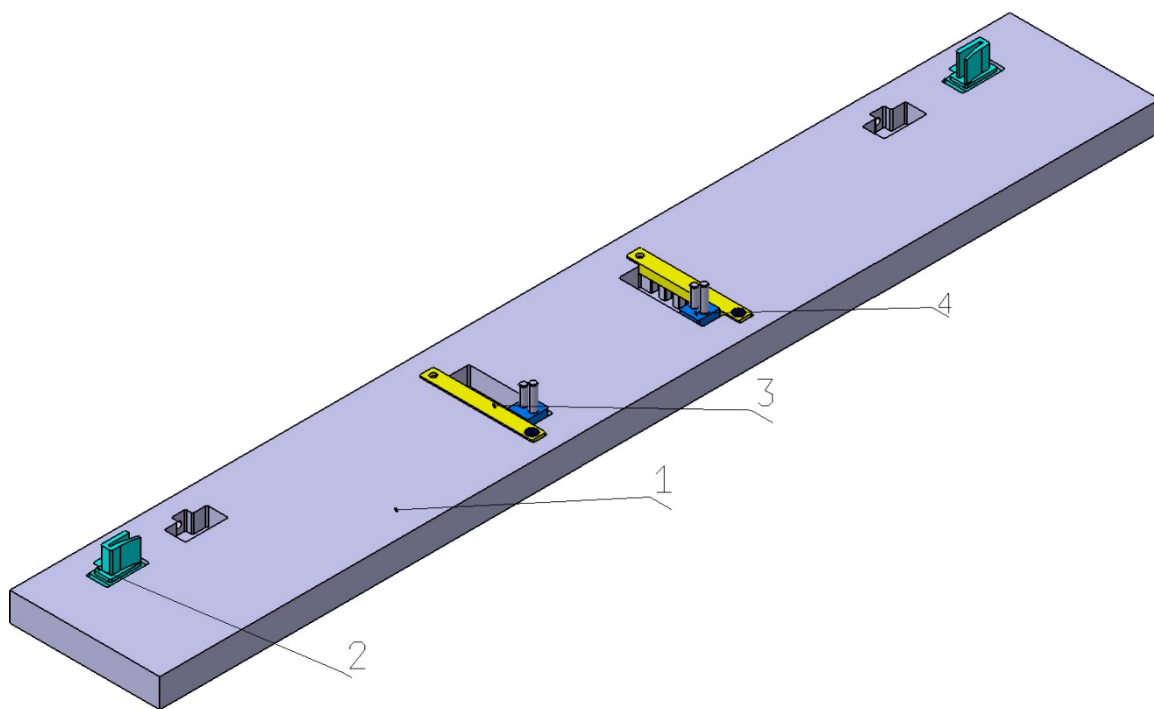
12 NÁVRH MĚŘÍCIHO PŘÍPRAVKU

Požadavek od firmy Varroc Lighting byl zjistit, zdali při průhybu FR4 desky dojde k překročení dovolené rychlosti deformace dané normou IPC/JEDEC-9704.

Byly zvoleny průhyby desky 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm a 50 mm. Pro dané průhyby byl navrhnout měřicí přípravek.

12.1 Rozbor a části konstrukčního řešení

Na následujícím obrázku je zobrazena sestava měřícího výrobku. Výrobek je tvořen základnou (1), dvěma symetrickými krajními zobáčky (2), dvěma přitlačnými deskami (3) a dvěma středovými zobáčky (4). Výkresy jsou přidány jako příloha práce.

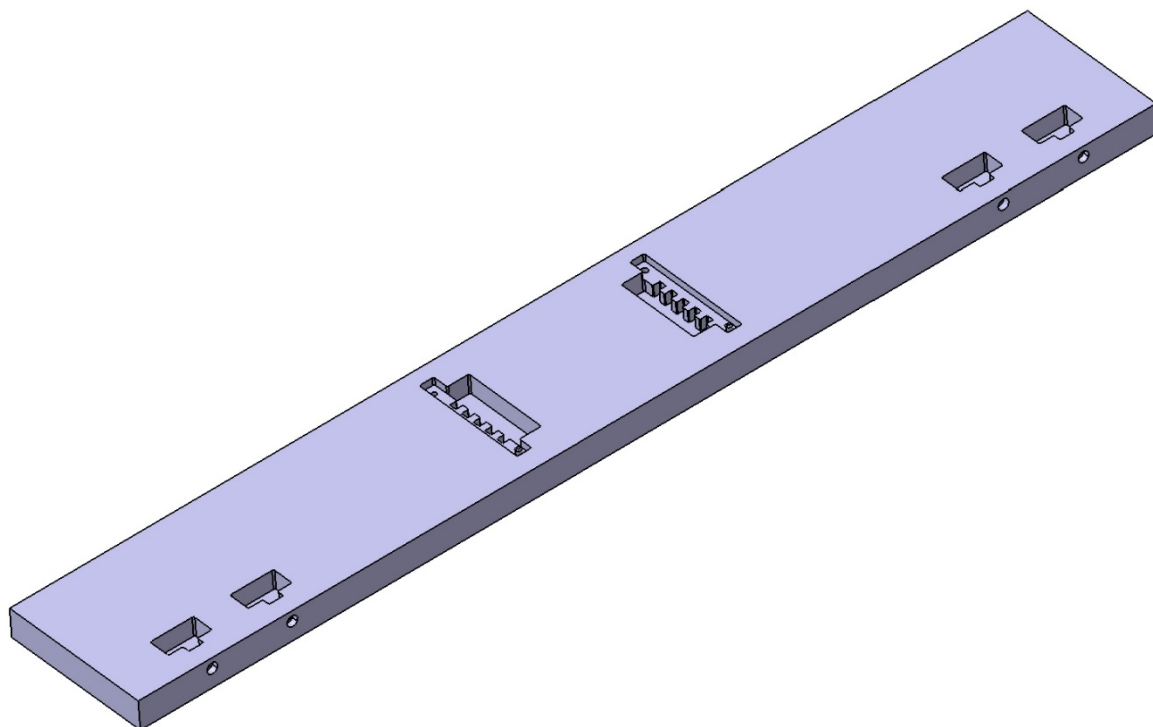


Obr. 69. Měřicí přípravek

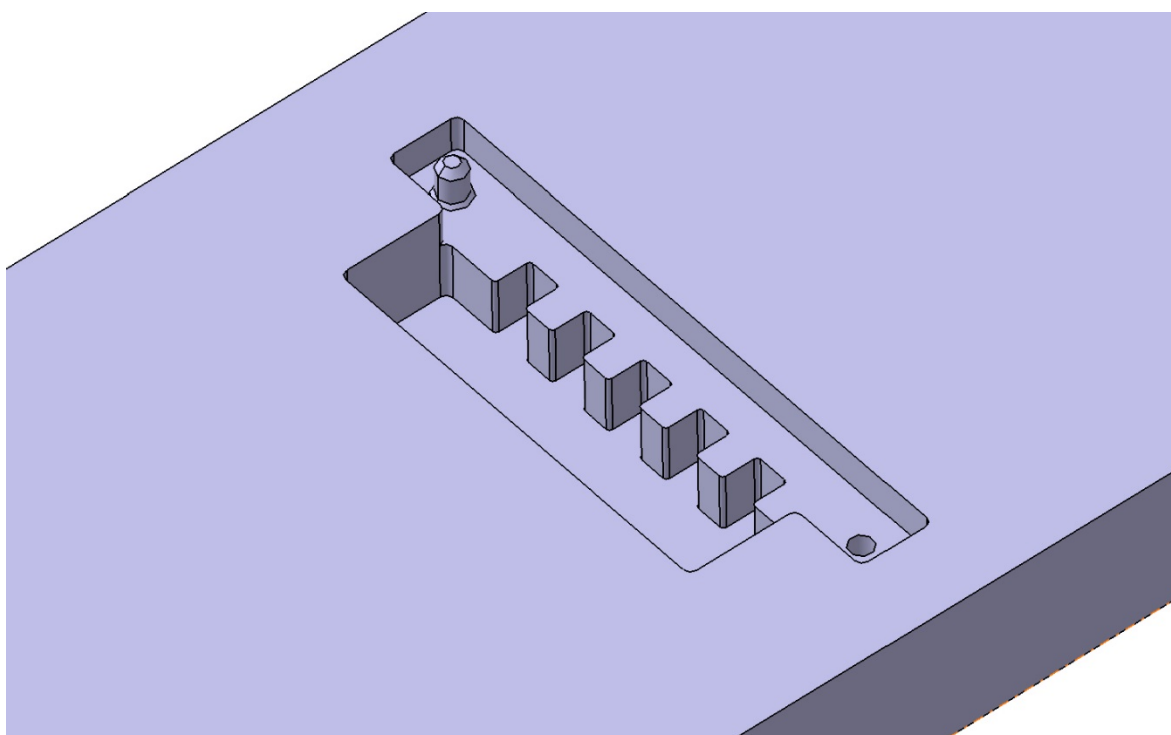
12.1.1 Podstava

Na obrázku 39 je zobrazena podstava měřícího výrobku, do které se upínají všechny další součástky. Podstava byla navržena symetricky. Na krajích jsou dvě drážky pro umístění zobáčků. Dvě pozice jsou záměrně zvoleny pro různé délky FR4 desek (60 cm a 50 cm).

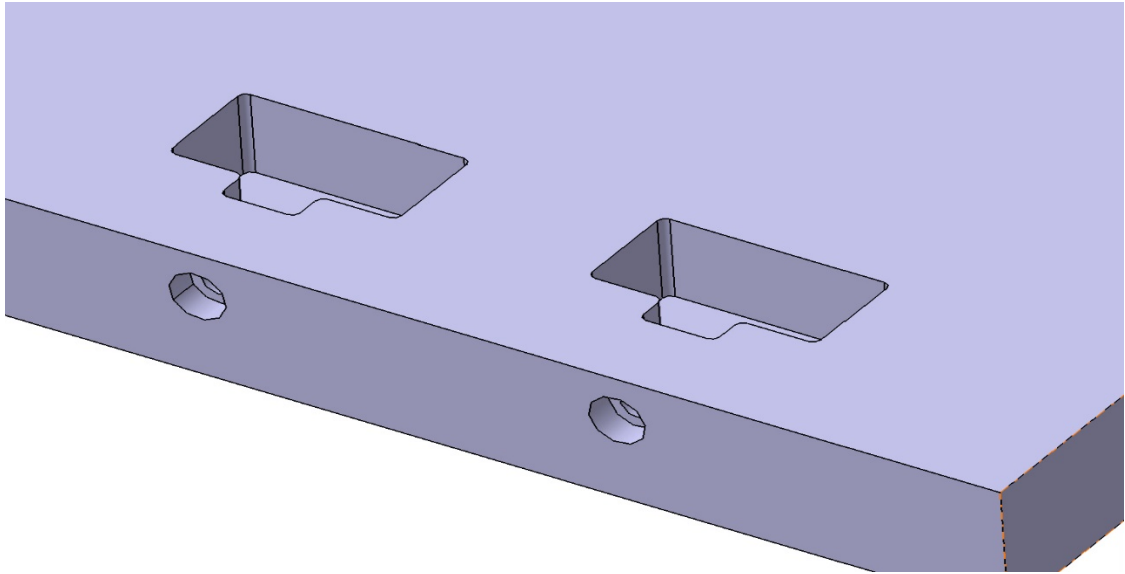
Dále uprostřed byla vymodelována drážka, která určuje rozdílné průhyby desky. Drážky byly zvoleny 2 z důvodu umístění tenzometru uprostřed FR4 desky.



Obr. 70. Podstava měřícího přípravku



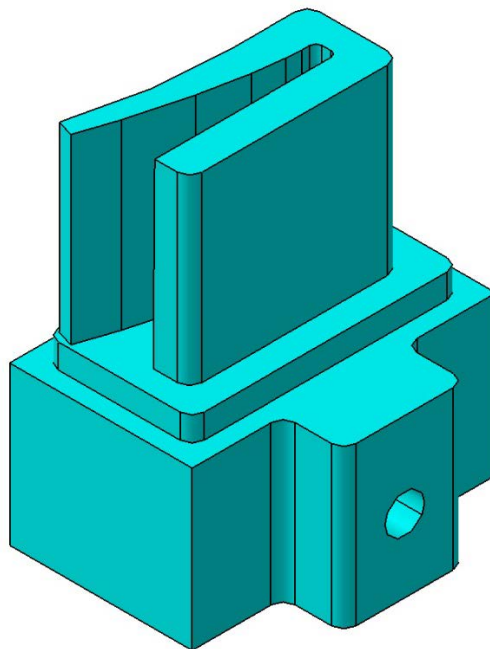
Obr. 71. Detail- drážka vymezení posuvu středového zobáčku



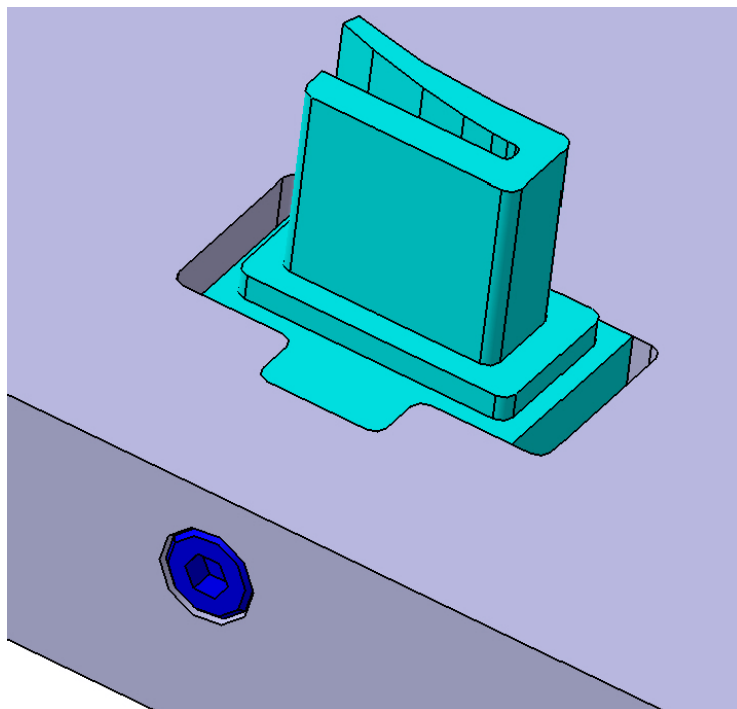
Obr. 72. Detail- drážka pro uchycení krajního zobáčku

12.1.2 Krajní zobáček

Krajní zobáček byl navržen tak, aby sloužil jako opora FR4 desky a zároveň nebránil jejímu průhybu. Zobáček je uchycen pomocí šroubu M4 k podstavě. Druhý zobáček je navržen symetricky podle osy symetrie.



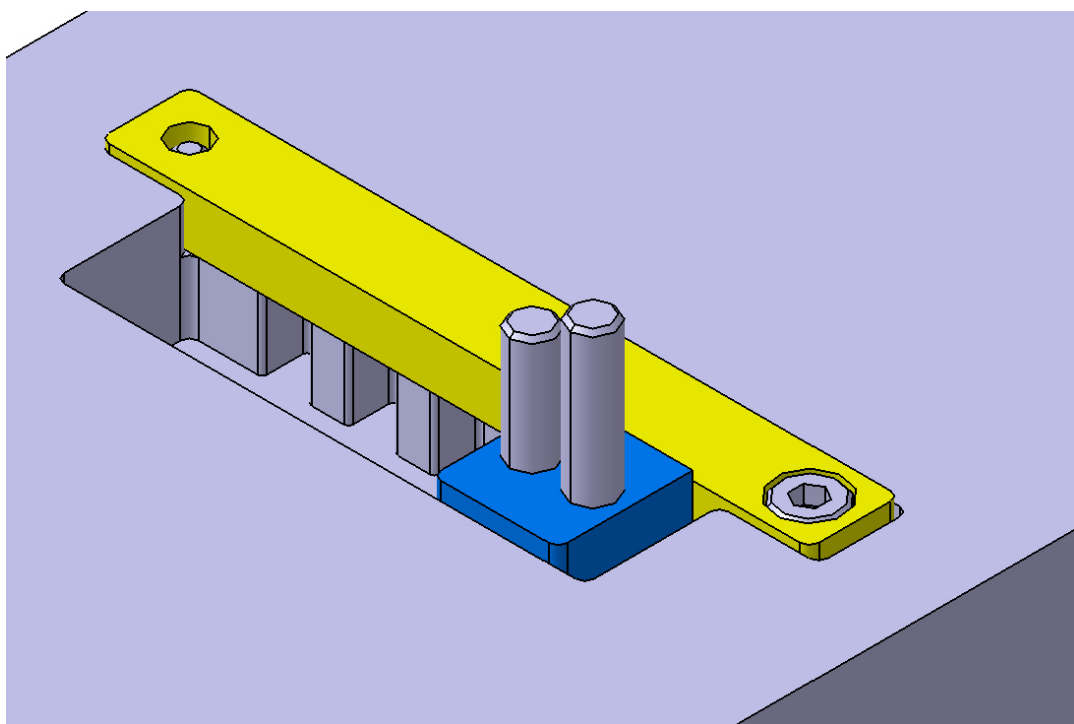
Obr. 73. Krajní zobáček



Obr. 74. Detail- uchycení krajního zobáčku

12.1.3 Příkladná deska

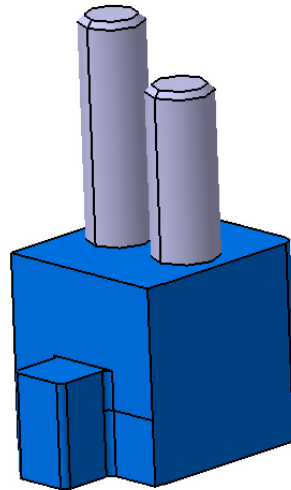
Příkladná deska slouží k upevnění středového zobáčku. Deska je zajištěna šroubem M4.



Obr. 75. Detail- přítláčná deska

12.1.4 Střední zobáček

Středící zobáček se skládá z kostky a dvou válečků. Tyto válečky slouží jako opora FR4 desky.



Obr. 76. Střední zobáček

13 MĚŘENÍ PRŮHYBU FR4 DESKY

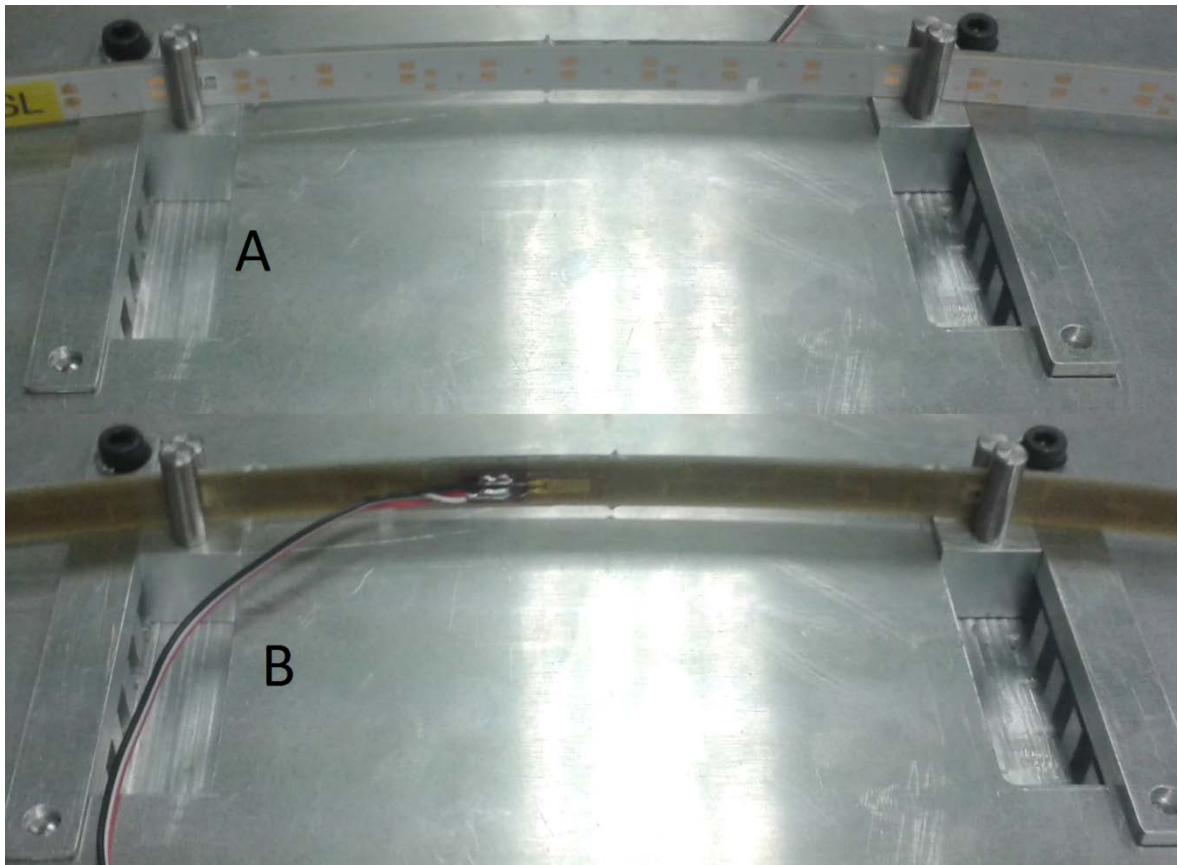
Jak bylo dříve napsáno, cílem bylo zjistit, zdali při průhybu FR4 desky dojde k překročení dovolené rychlosti deformace dané normou IPC/JEDEC-9704.

Byly zvoleny průhyby desky 10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm a 50 mm. FR4 desky byly o šířce 1,3 mm a 1,6 mm.

Pro měření byl použit měřící přípravek, který byl popsán v předchozí kapitole.

Měření probíhalo ve dvou konfiguracích. První konfigurace byla s tenzometrem na vnější straně (obr. 77 A) a druhá byla s tenzometrem na vnitřní straně FR4 desky (obr. 77 B).

V každé konfiguraci bylo provedeno 5 měření pro každou hodnotu průhybu.



Obr. 77. Konfigurace měření

A- tenzometr na vnější straně, B- tenzometr na vnitřní straně.

13.1 Přístrojové a programové vybavení

Pro samotné provedení měření dle normy IP/JEDEC-9704 jsou potřeba speciální přístroje.

Pro získávání informací z tenzometru byla použita univerzální měřicí ústředna QuantumX MX840 pro vícekanálová statická i dynamická měření od firmy Hottinger Baldwin Messtechnik. Jedná se o ústřednu, která podporuje velkou řadu snímačů, jako např. tenzometrické, indukčnostní, LVDT, napětí, proudy, termočlánky, frekvence a jiné. Ústředna disponuje 8 samostatnými kanály, které mohou snímat s frekvencí až 19200 hodnot za sekundu.

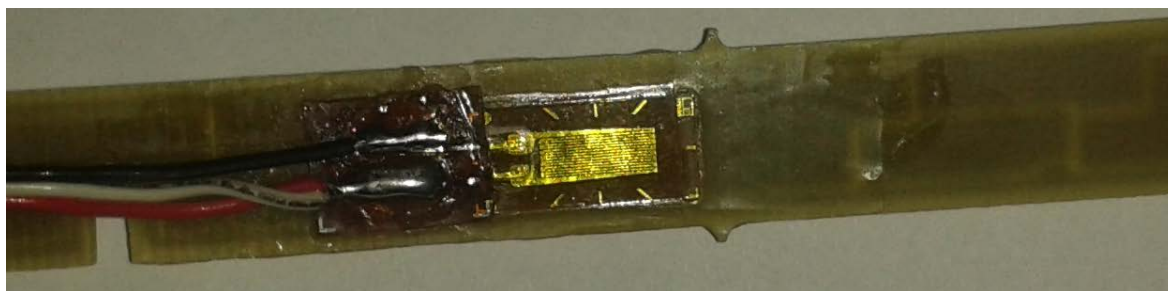
Pro samotné měření byl využit pouze jeden kanál, protože měření bylo pouze pro jednoosý průhyb.



Obr. 78. Univerzální měřicí ústředna QuantumX MX840

Pro zpracování naměřených dat byl použit program Catman®Easy. V programu byly vytvořeny šablony pro měření dle normy IPC/JEDEC-9704. Pro určení maximálního dovolené deformace bylo použito určení dle rychlosti deformace, která je popsána v kapitole 11.2.

Tenzometr pro měření byl použit tenzometr SG 3 wire 120 Ohms.



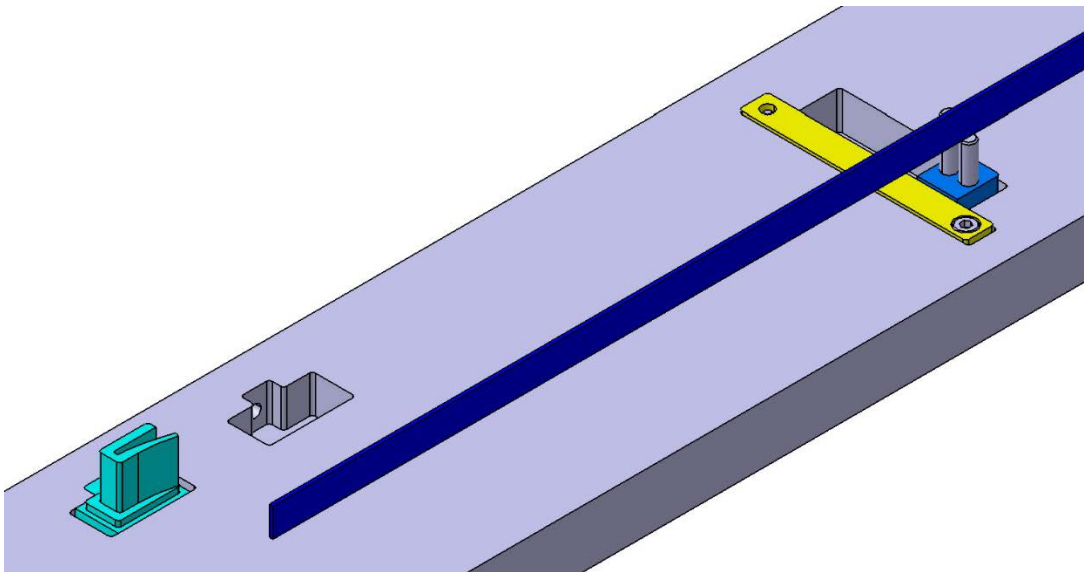
Obr. 79. Tenzometr SG3 wire 120 Ohms

13.2 Postup při měření

Aby bylo dosaženo co nejvyšší opakovatelnosti, bylo potřeba provádět měření pokud možno stejným způsobem. Byl vytvořen postup měření, stejný jako při montáži na lince.

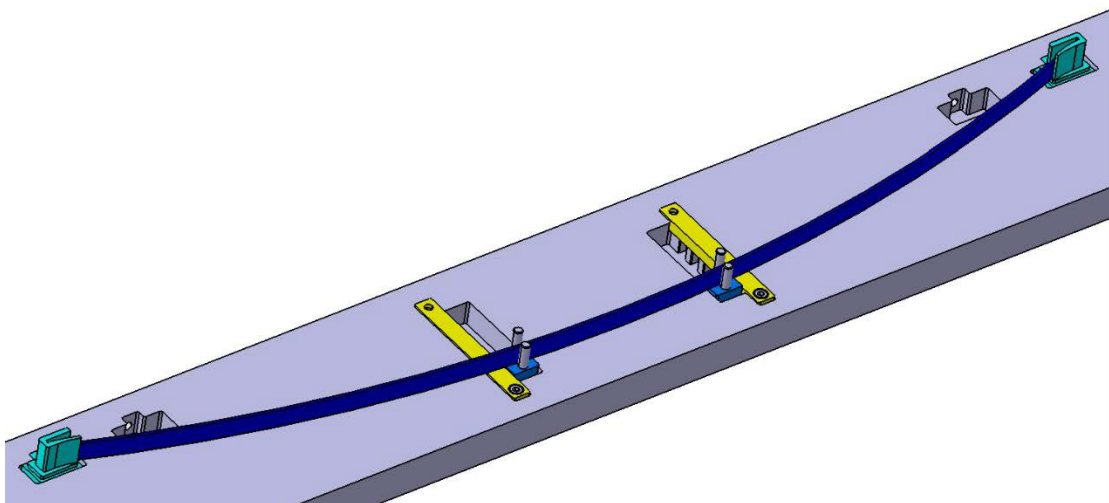
Postup lze rozdělit do dvou kroků.

Při prvním kroku se FR4 deska umístí na střed měřícího zařízení a opře se o menší váleček středového zobáčku. Po umístění do této pozice je spuštěno měření.



Obr. 80. První krok měření

Při druhém kroku dojde k ohnutí desky až ke krajním zobáčkům a zasunutí po základnu. Po zasunutí končí měření.



Obr. 81. Druhý krok měření

14 VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ

Jak bylo popsáno dříve, měření probíhalo ve dvou konfiguracích. První konfigurace byla s tenzometrem na vnější straně (varianta A) a druhá byla s tenzometrem na vnitřní straně FR4 desky (varianta B).

V každé konfiguraci bylo provedeno 5 měření pro každou hodnotu průhybu.

Vyhodnocení je rozděleno podle průhybu a tloušťky desek. Obě varianty jsou uvedeny v tabulce, ve které je napsáno, zdali došlo k porušení normy IPC/JEDEC-9704. Dále je zobrazena závislost dovolené deformace na rychlosti deformace, podle které se rozhoduje o porušení normy.

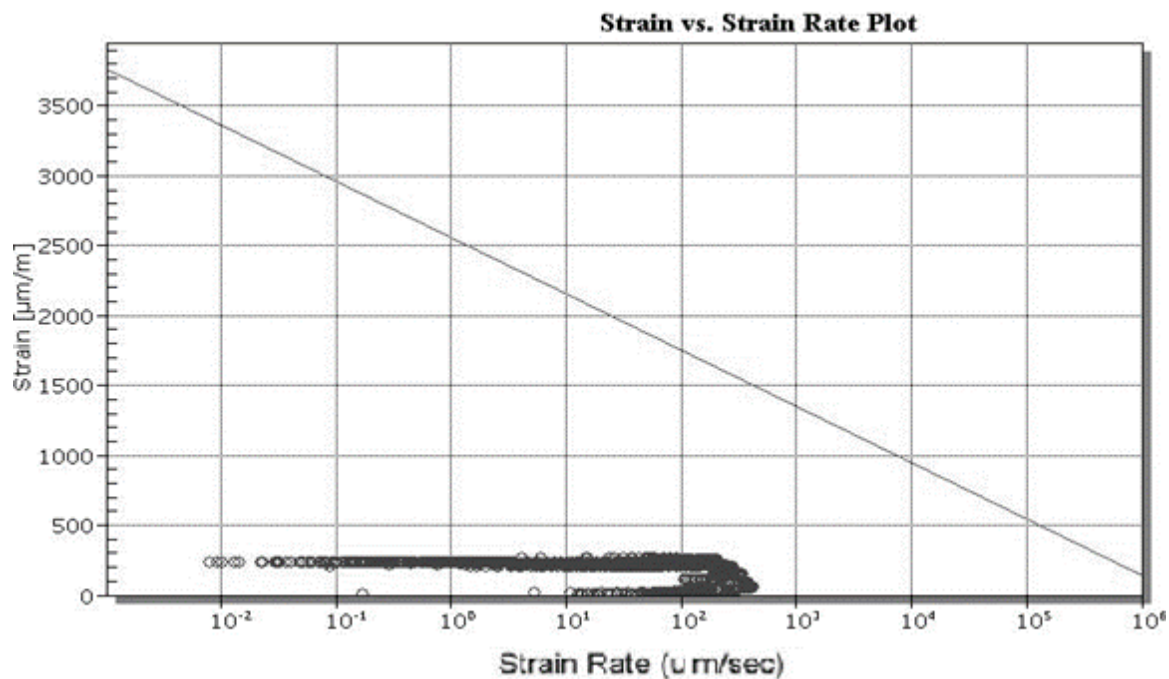
14.1 Průhyb 10 mm

14.1.1 Tloušťka $h = 1,3$ mm

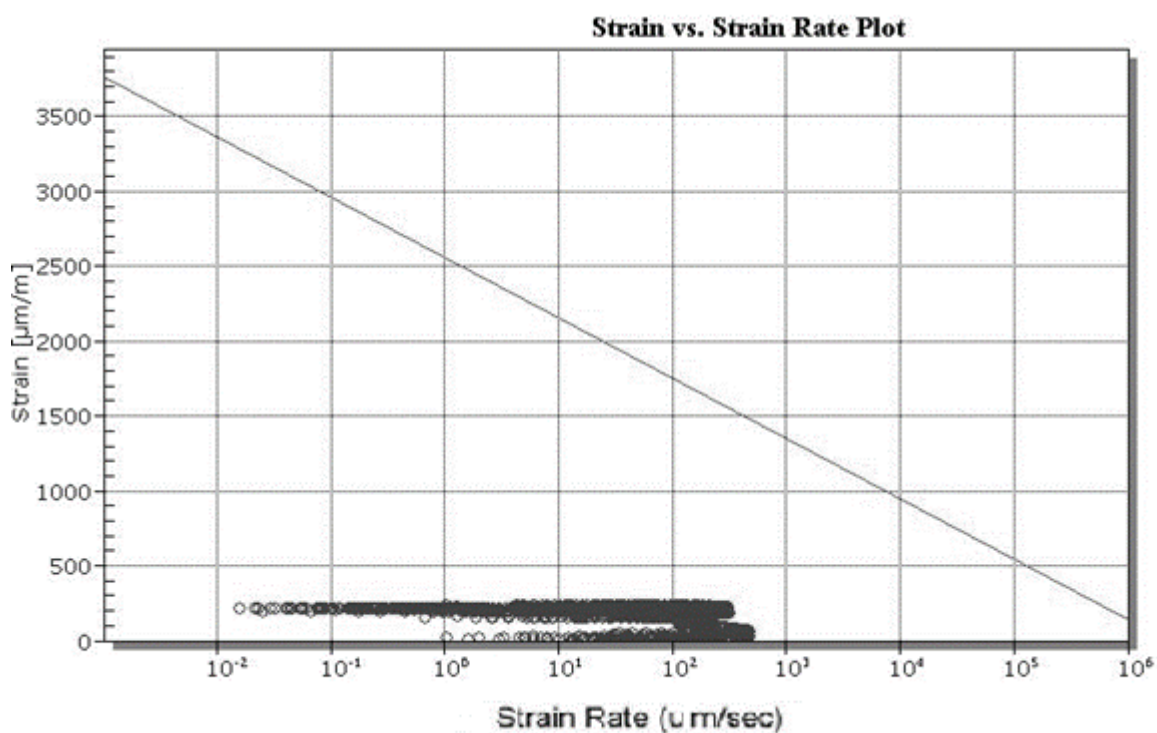
U průhybu desky o 10 mm nedošlo k porušení normy u obou variant. Naměřené hodnoty jsou poměrně vzdáleny od křivky maximální dovolené deformace a rozdíl mezi variantou A a B je nepatrný.

Tab. 28: Vyhodnocení měření pro tloušťku 1,3mm a průhyb 10mm

	varianta/číslo měření	1	2	3	4	5
porušení normy	A	ne	ne	ne	ne	ne
	B	ne	ne	ne	ne	ne



Obr. 82. Průběh maximální dovolené deformace; var. A, $h = 1,3\text{mm}$, průhyb 10mm



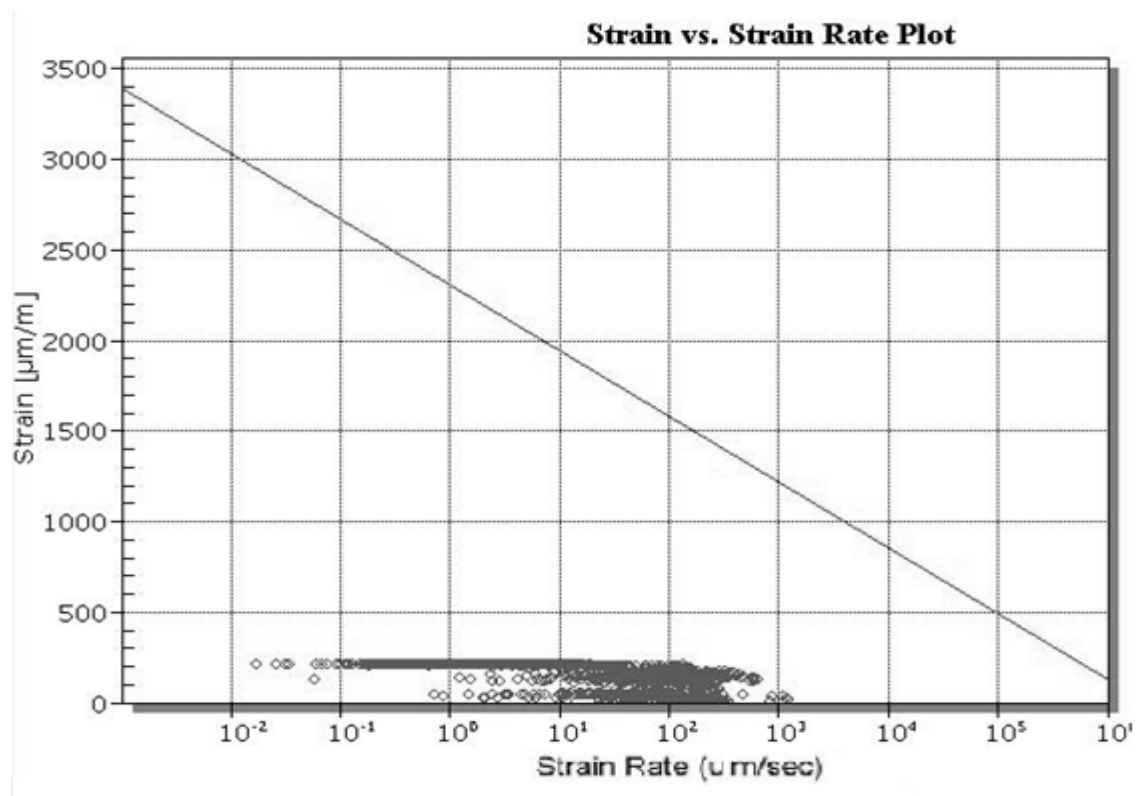
Obr. 83. Průběh maximální dovolené deformace; var. B, $h = 1,3\text{mm}$, průhyb 10mm

14.1.2 Tloušťka $h=1,6$ mm

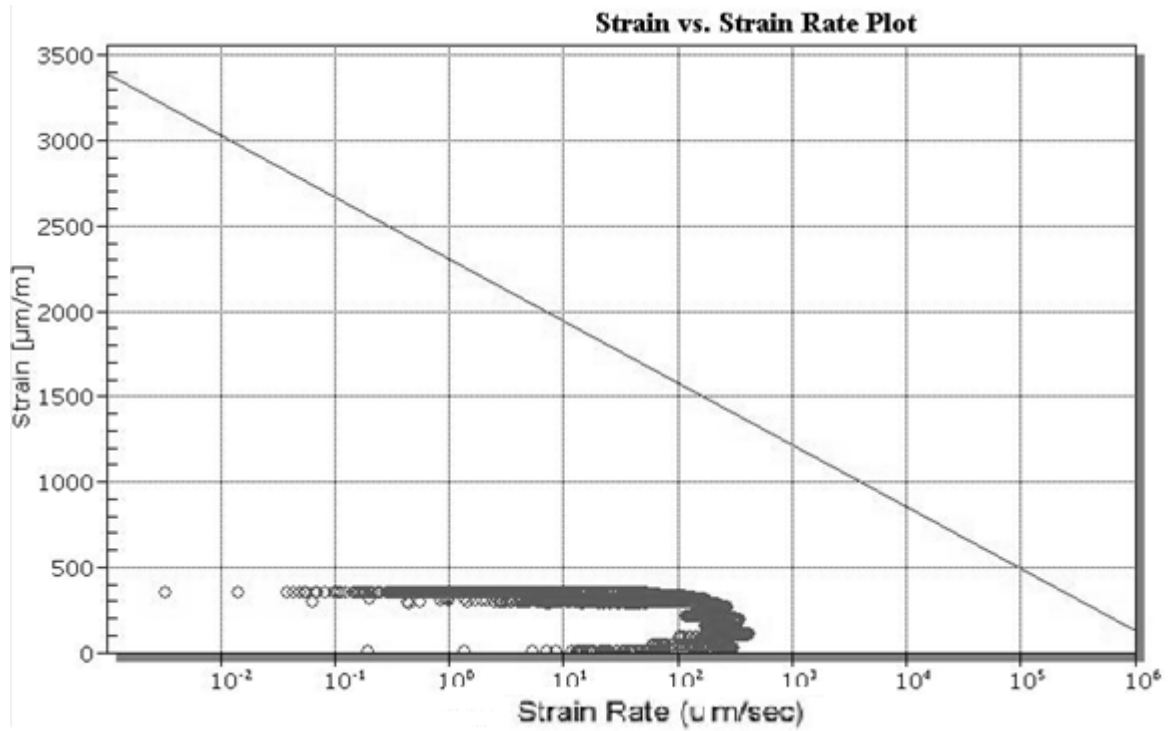
U průhybu desky o 10 mm nedošlo k porušení normy u obou variant. Naměřené hodnoty jsou poměrně vzdáleny od křivky maximální dovolené deformace a rozdíl mezi variantou A a B je velmi malý.

Tab. 29: Vyhodnocení měření pro tloušťku 1,6mm a průhyb 10mm

	varianta/číslo měření	1	2	3	4	5
porušení normy	A	ne	ne	ne	ne	ne
	B	ne	ne	ne	ne	ne



Obr. 84. Průběh maximální dovolené deformace; var. A, $h=1,6$ mm, průhyb 10mm



Obr. 85. Průběh maximální dovolené deformace; var. B, $h = 1,3\text{mm}$, průhyb 10mm

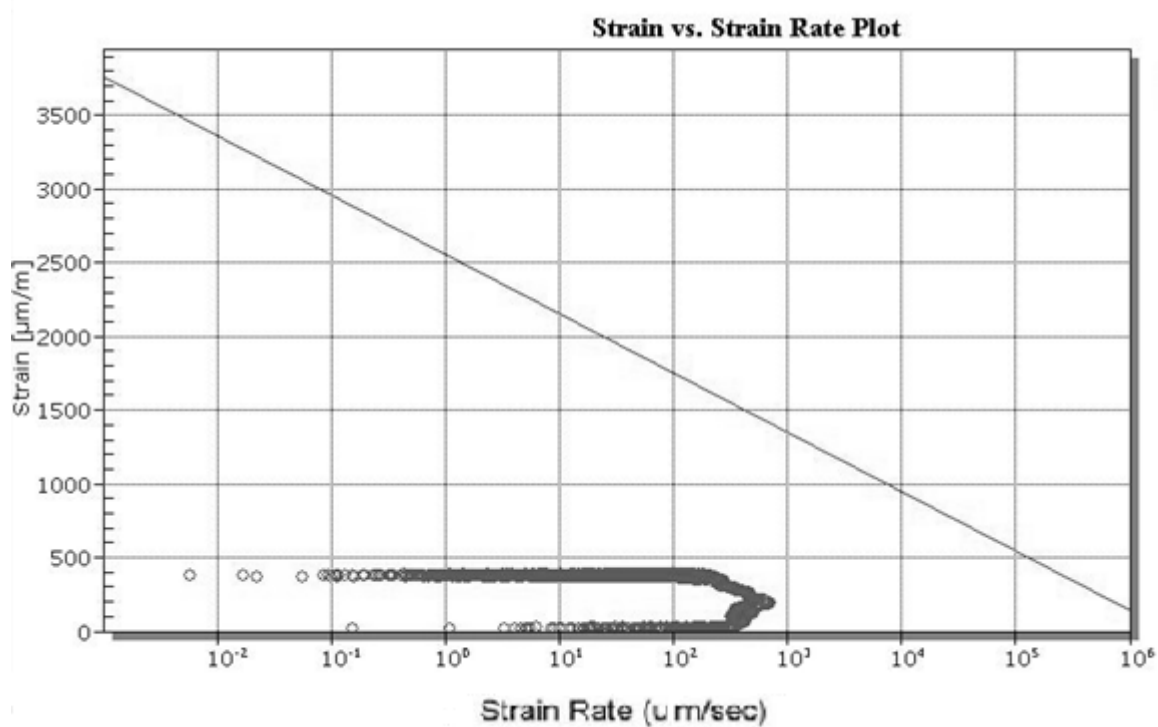
14.2 Průhyb 20 mm

14.2.1 Šířka $h = 1,3\text{ mm}$

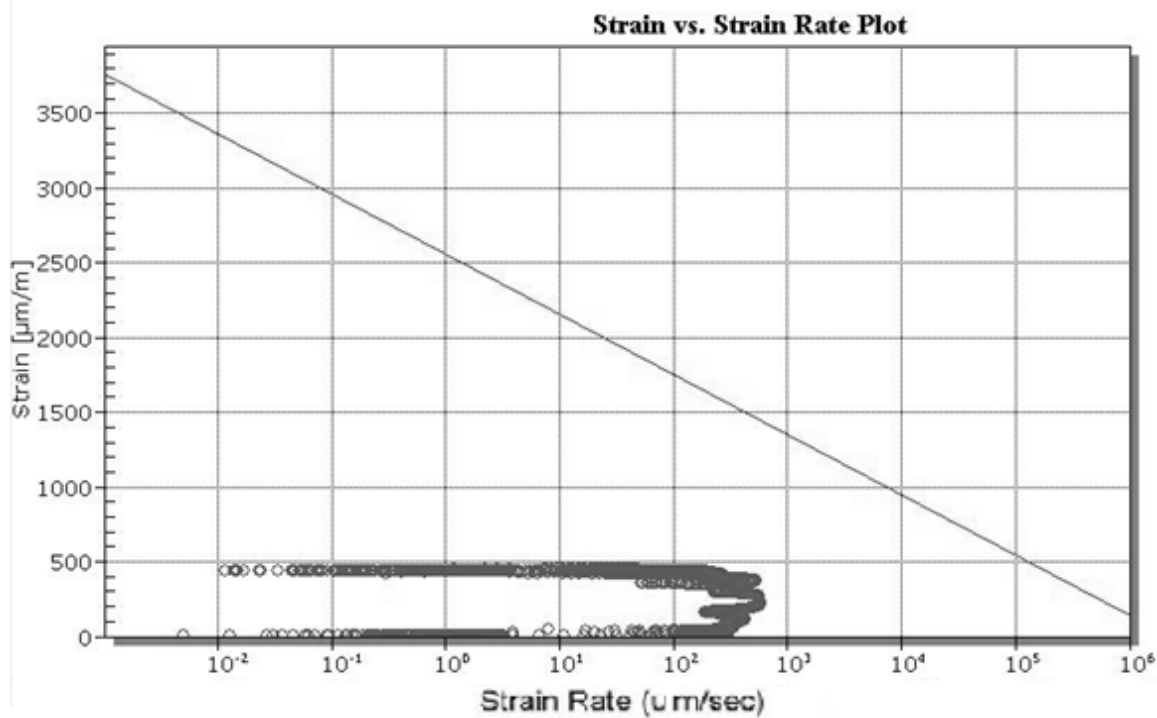
U průhybu desky o 20 mm nedošlo k porušení normy u obou variant. Naměřené hodnoty jsou poměrně vzdáleny od křivky maximální dovolené deformace a rozdíl mezi variantou A a B je malý. Rozdíl je dán umístěním tenzometru.

Tab. 30: Vyhodnocení měření pro tloušťku 1,3mm a průhyb 20mm

	varianta/číslo měření	1	2	3	4	5
porušení normy	A	ne	ne	ne	ne	ne
	B	ne	ne	ne	ne	ne



Obr. 86. Průběh maximální dovolené deformace; var. A, $h = 1,3\text{mm}$, průhyb 20mm



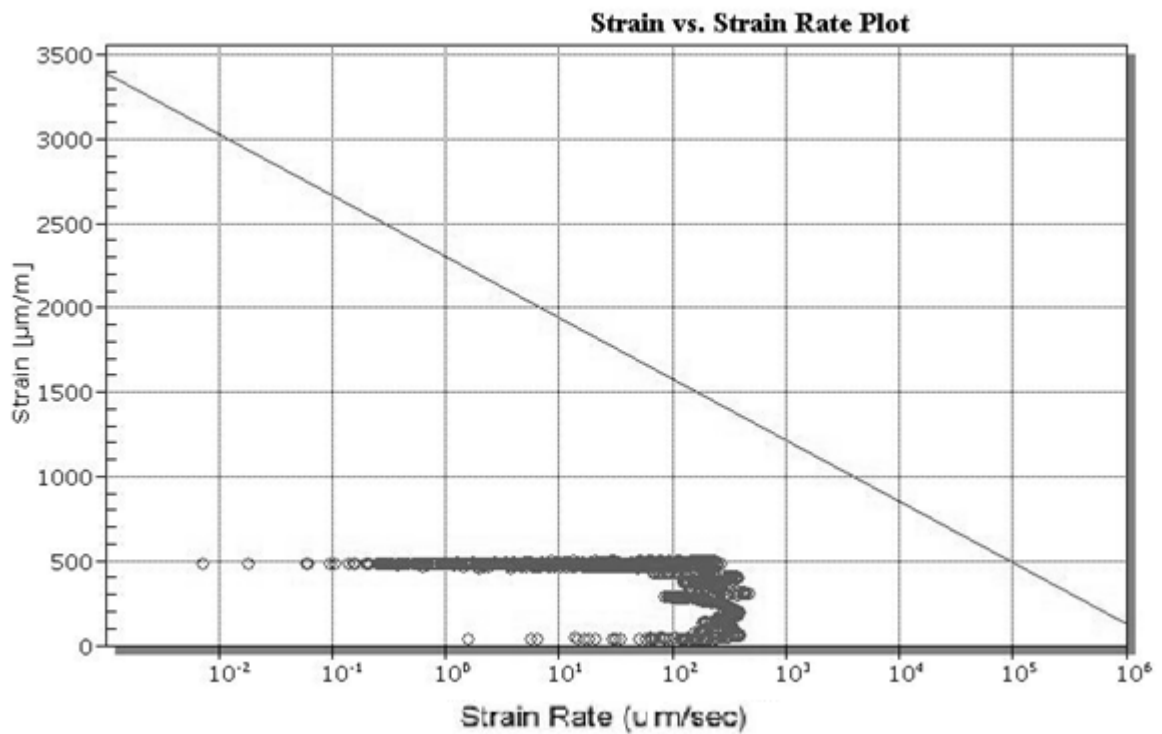
Obr. 87. Průběh maximální dovolené deformace; var. B, $h = 1,3\text{mm}$, průhyb 20mm

14.2.2 Šířka $h = 1,6$ mm

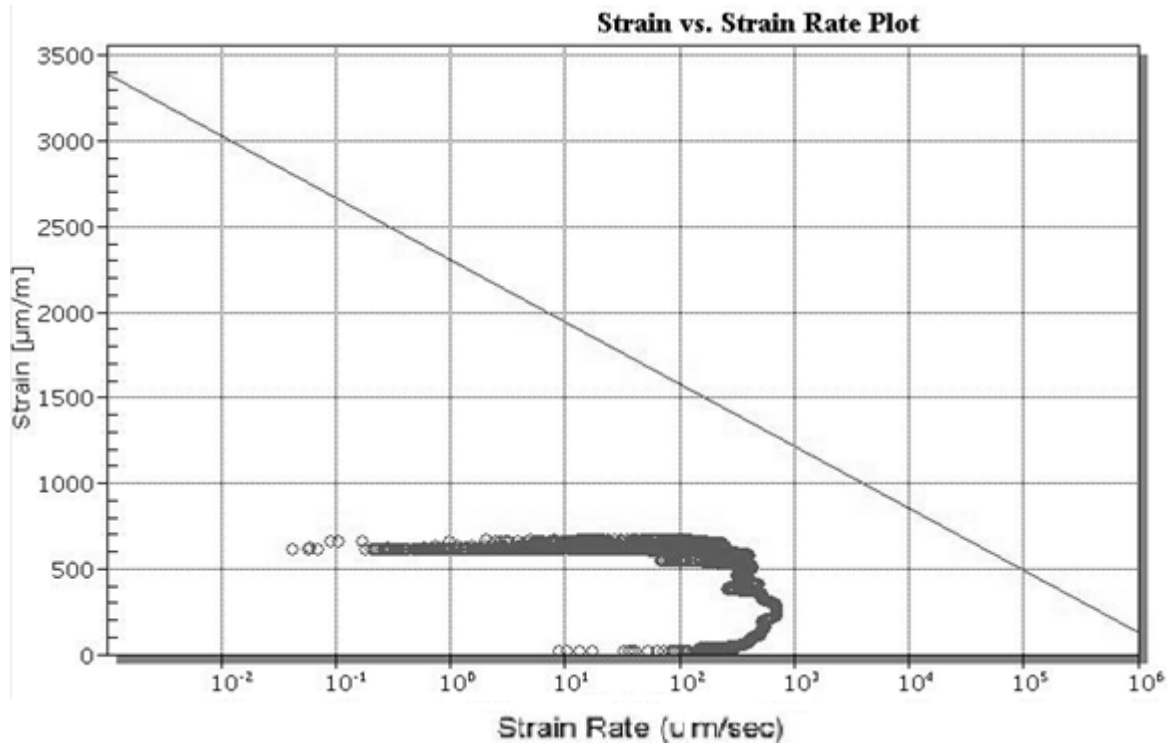
U průhybu desky o 20 mm nedošlo k porušení normy u obou variant. Naměřené hodnoty jsou poměrně vzdáleny od křivky maximální dovolené deformace a rozdíl mezi variantou A a B je poměrně zatelný. Rozdíl je dán umístěním tenzometru.

Tab. 31: Vyhodnocení měření pro tloušťku 1,6mm a průhyb 20mm

	varianta/číslo měření	1	2	3	4	5
porušení normy	A	ne	ne	ne	ne	ne
	B	ne	ne	ne	ne	ne



Obr. 88. Průběh maximální dovolené deformace; var. A, $h = 1,6$ mm, průhyb 20mm



Obr. 89. Průběh maximální dovolené deformace; var. B, $h = 1,6\text{mm}$, průhyb 20mm

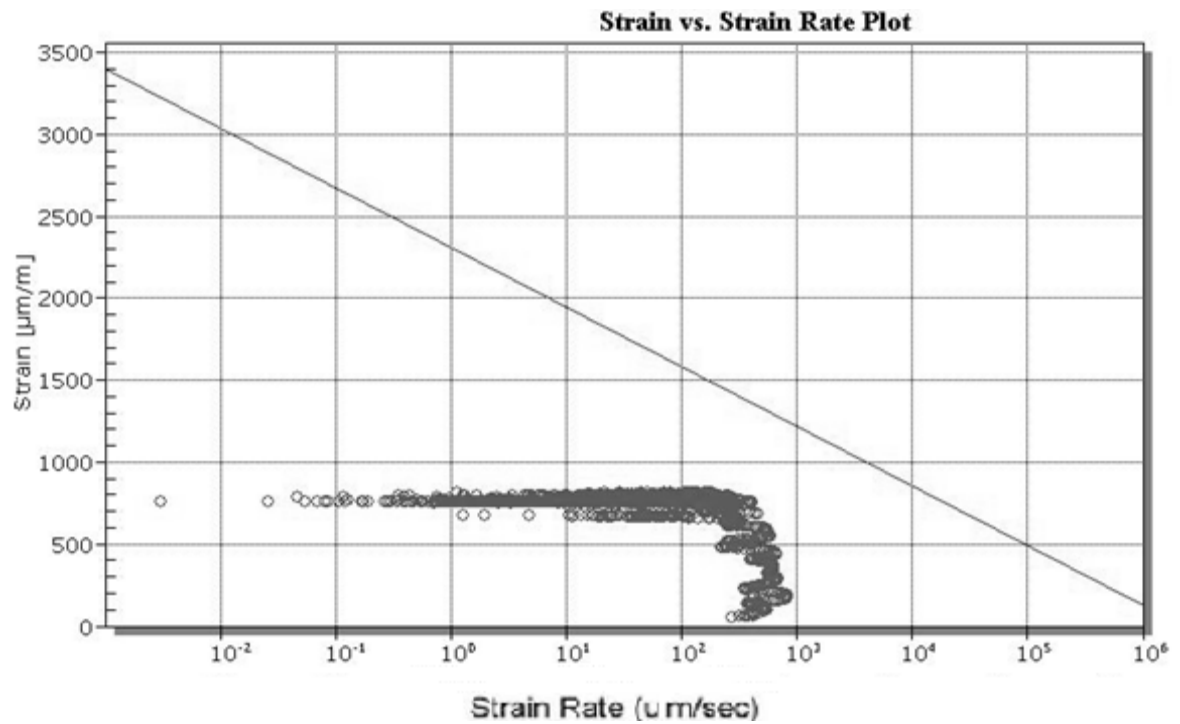
14.3 Průhyb 30 mm

14.3.1 Šířka $h = 1,3\text{ mm}$

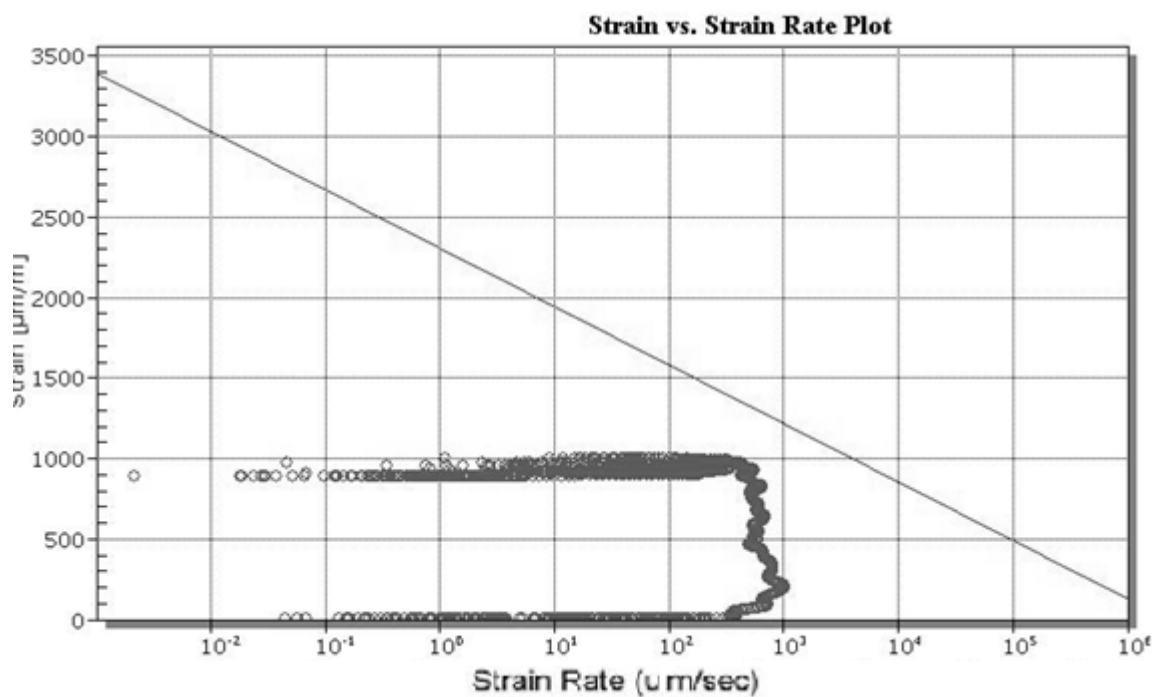
U průhybu desky o 30 mm nedošlo k porušení normy u obou variant. Naměřené hodnoty jsou poměrně vzdáleny od křivky maximální dovolené deformace a rozdíl mezi variantou A a B je poměrně znatelný. Rozdíl je dán umístěním tenzometru a provedením zkoušky.

Tab. 32: Vyhodnocení měření pro tloušťku 1,3mm a průhyb 30mm

	varianta/číslo měření	1	2	3	4	5
porušení normy	A	ne	ne	ne	ne	ne
	B	ne	ne	ne	ne	ne



Obr. 90. Průběh maximální dovolené deformace; var. A, $h = 1,3\text{mm}$, průhyb 30mm



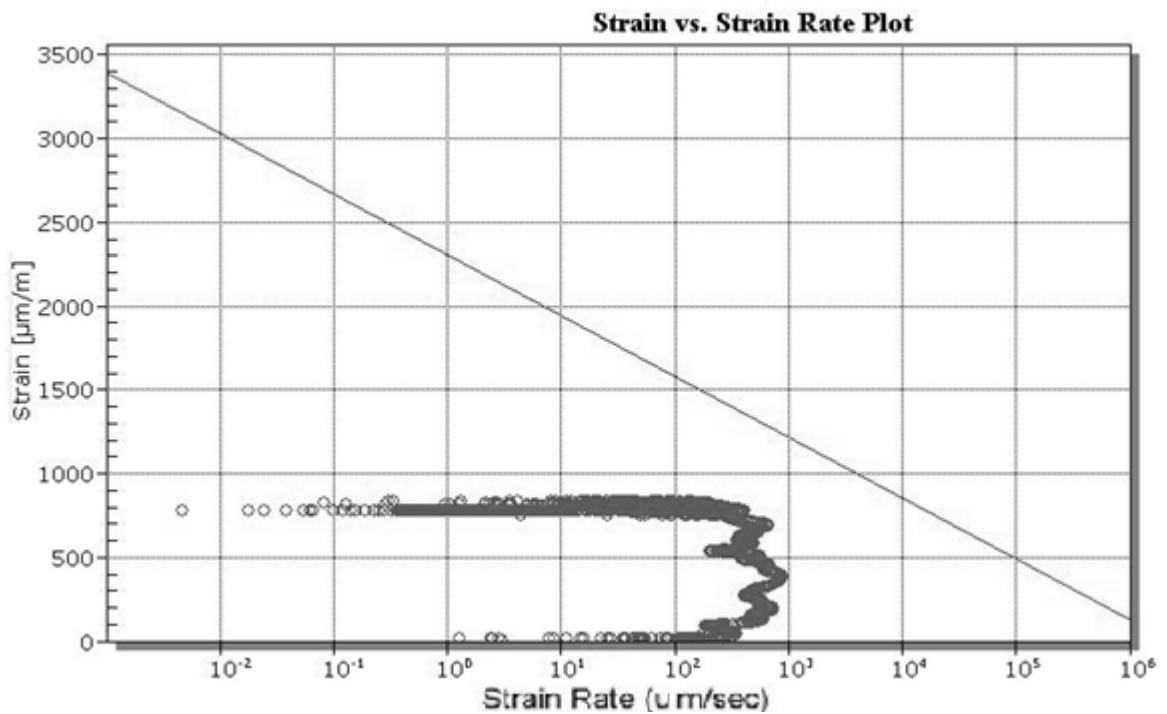
Obr. 91. Průběh maximální dovolené deformace; var. B, $h = 1,3\text{mm}$, průhyb 30mm

14.3.2 Šířka $h=1,6$ mm

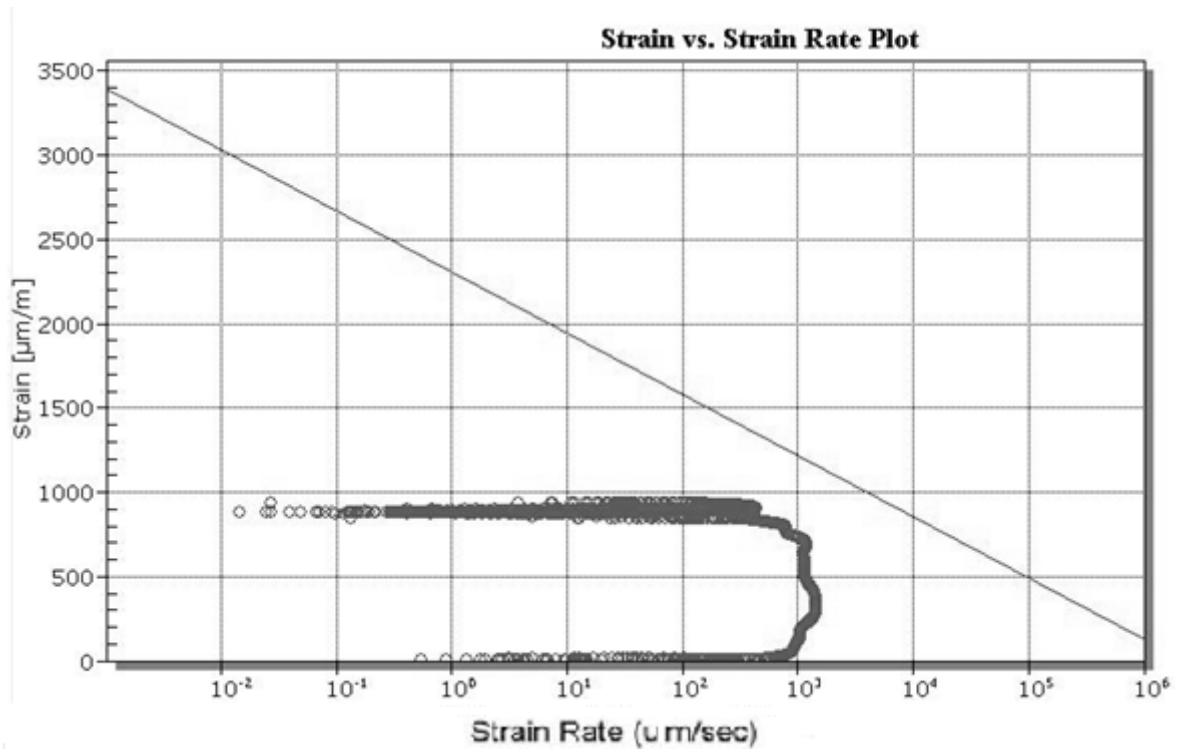
U průhybu desky o 30 mm nedošlo k porušení normy u obou variant. Naměřené hodnoty jsou poměrně vzdáleny od křivky maximální dovolené deformace a rozdíl mezi variantou A a B je znatelný. Rozdíl je dán umístěním tenzometru a provedením zkoušky.

Tab. 33: Vyhodnocení měření pro tloušťku 1,6mm a průhyb 30mm

	varianta/číslo měření	1	2	3	4	5
porušení normy	A	ne	ne	ne	ne	ne
	B	ne	ne	ne	ne	ne



Obr. 92. Průběh maximální dovolené deformace; var. A, $h=1,6$ mm, průhyb 30mm



Obr. 93. Průběh maximální dovolené deformace; var. B, $h = 1,6\text{mm}$, průhyb 30mm

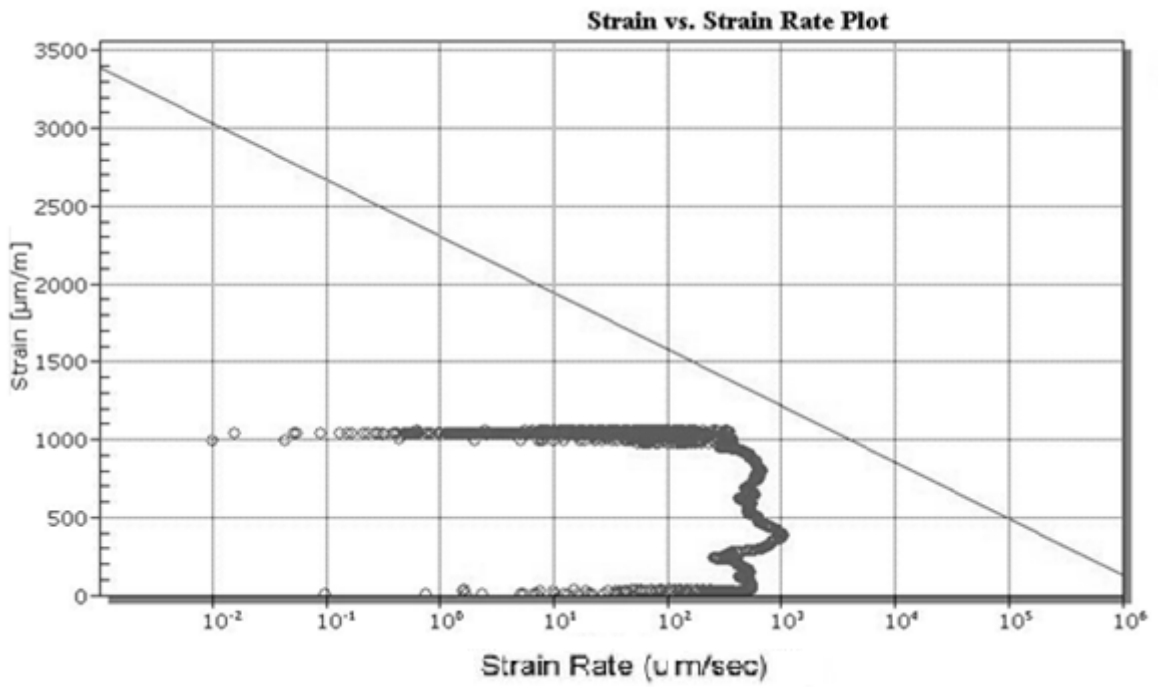
14.4 Průhyb 40 mm

14.4.1 Šířka $h = 1,3\text{ mm}$

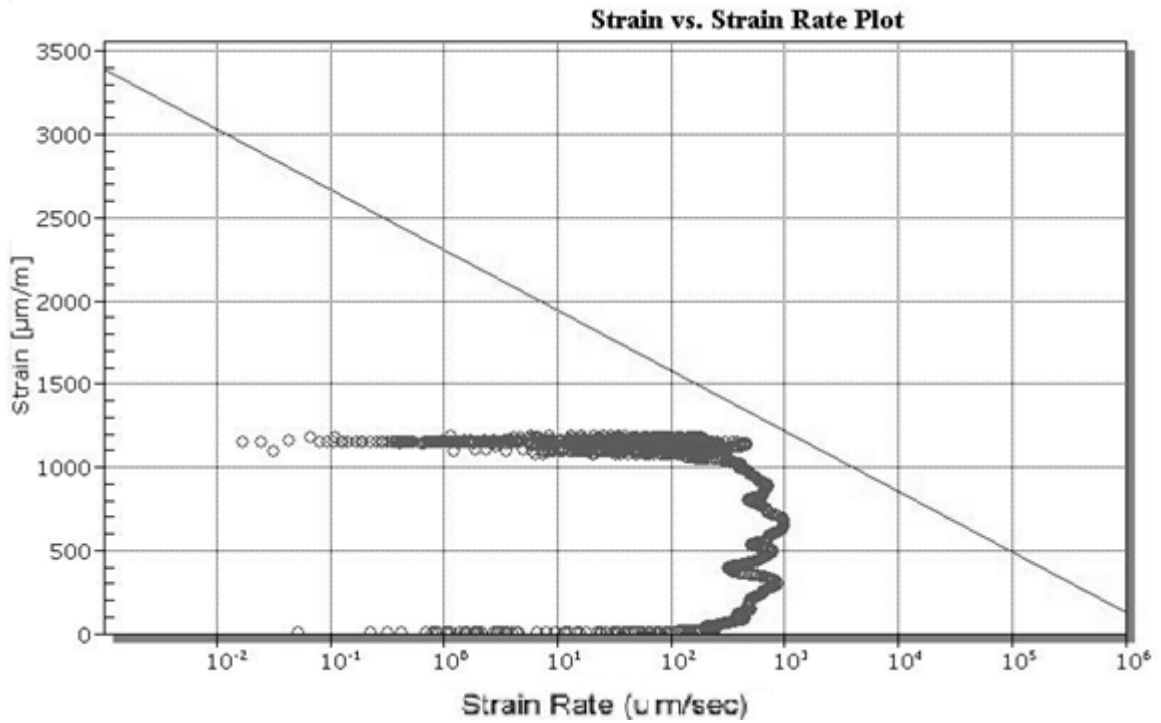
U průhybu desky o 40 mm nedošlo k porušení normy u obou variant. Naměřené hodnoty se blíží křivce maximální dovolené deformace a rozdíl mezi variantou A a B je znatelný. Rozdíl je dán umístěním tenzometru a provedením zkoušky.

Tab. 34: Vyhodnocení měření pro tloušťku $1,3\text{mm}$ a průhyb 40mm

	varianta/číslo měření	1	2	3	4	5
porušení normy	A	ne	ne	ne	ne	ne
	B	ne	ne	ne	ne	ne



Obr. 94. Průběh maximální dovolené deformace; var. A, $h = 1,3\text{mm}$, průhyb 40mm



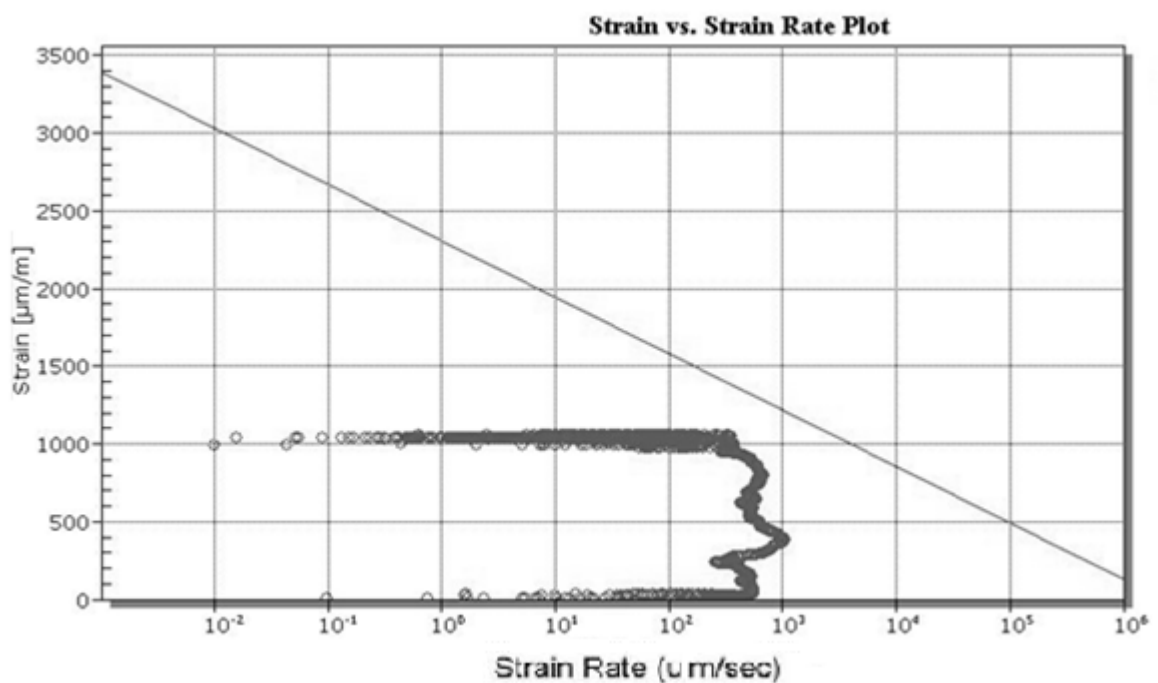
Obr. 95. Průběh maximální dovolené deformace; var. B, $h = 1,3\text{mm}$, průhyb 40mm

14.4.2 Šířka $h=1,6$ mm

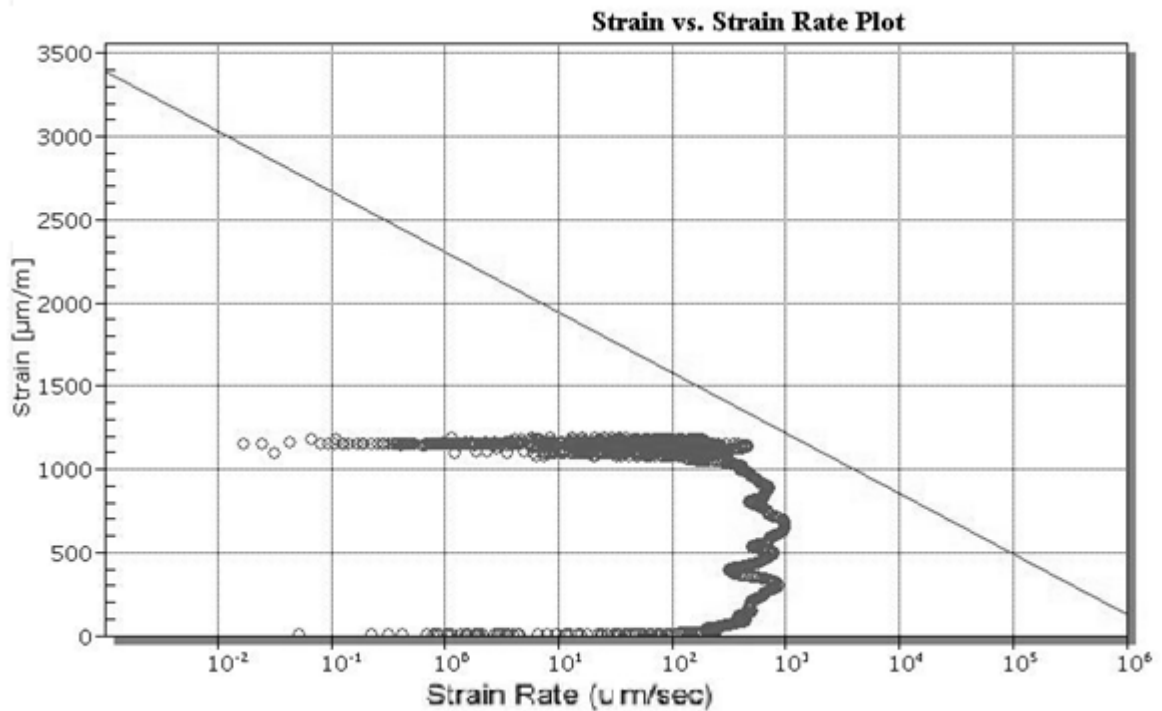
U průhybu desky o 40 mm nedošlo k porušení normy u obou variant. Naměřené hodnoty se blíží křivce maximální dovolené deformace a rozdíl mezi variantou A a B je znatelný. Rozdíl je dán umístěním tenzometru a provedením zkoušky.

Tab. 35: Vyhodnocení měření pro tloušťku 1,6mm a průhyb 40mm

	varianta/číslo měření	1	2	3	4	5
porušení normy	A	ne	ne	ne	ne	ne
	B	ne	ne	ne	ne	ne



Obr. 96. Průběh maximální dovolené deformace; var. A, $h=1,6$ mm, průhyb 40mm



Obr. 97. Průběh maximální dovolené deformace; var. B, $h = 1,6\text{mm}$, průhyb 40mm

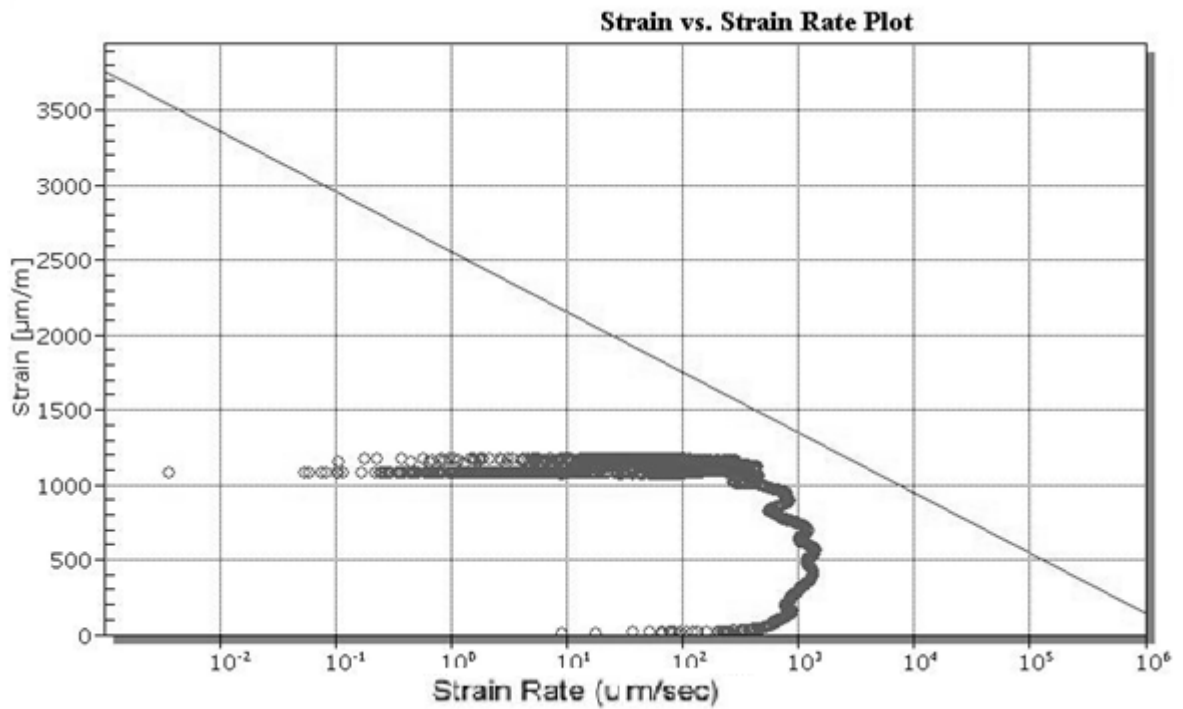
14.5 Průhyb 50 mm

14.5.1 Šířka $h = 1,3\text{ mm}$

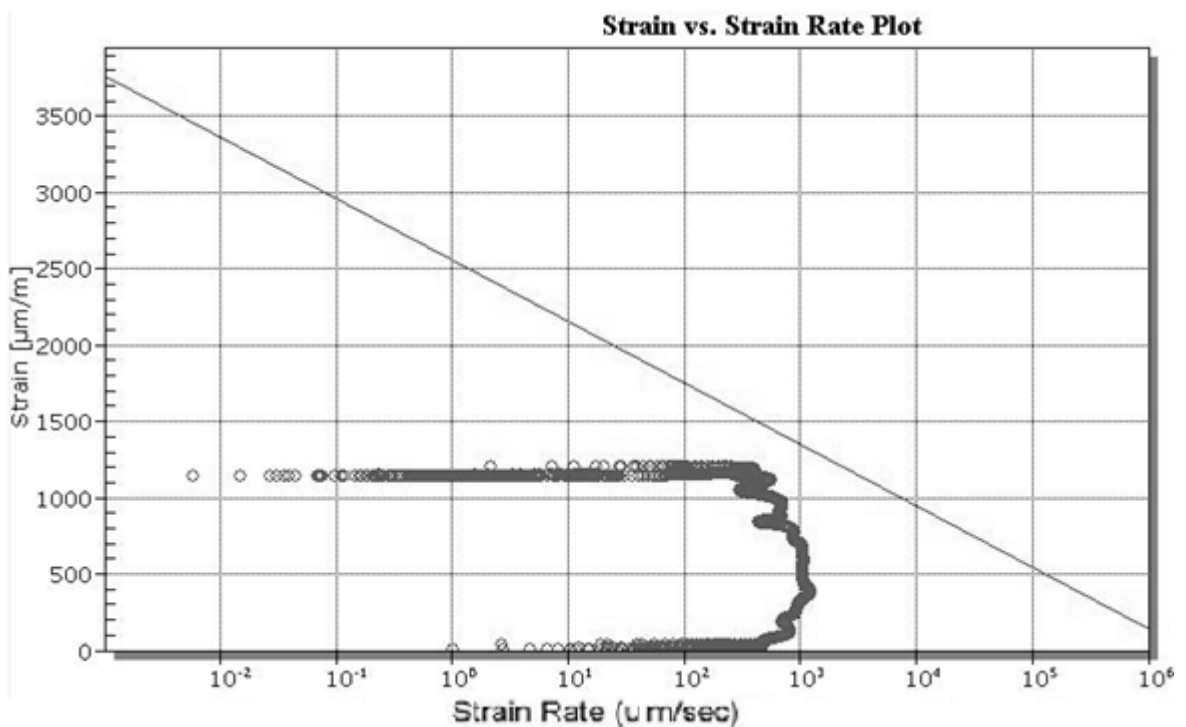
U průhybu desky o 50 mm nedošlo k porušení normy u obou variant. Naměřené hodnoty se blíží křivce maximální dovolené deformace a rozdíl mezi variantou A a B je znatelný. Rozdíl je dán hlavně umístěním tenzometru a provedením zkoušky.

Tab. 36: Vyhodnocení měření pro tloušťku $1,3\text{mm}$ a průhyb 50mm

	varianta/číslo měření	1	2	3	4	5
porušení normy	A	ne	ne	ne	ne	ne
	B	ne	ne	ne	ne	ne



Obr. 98. Průběh maximální dovolené deformace; var. A, $h = 1,3\text{mm}$, průhyb 50mm



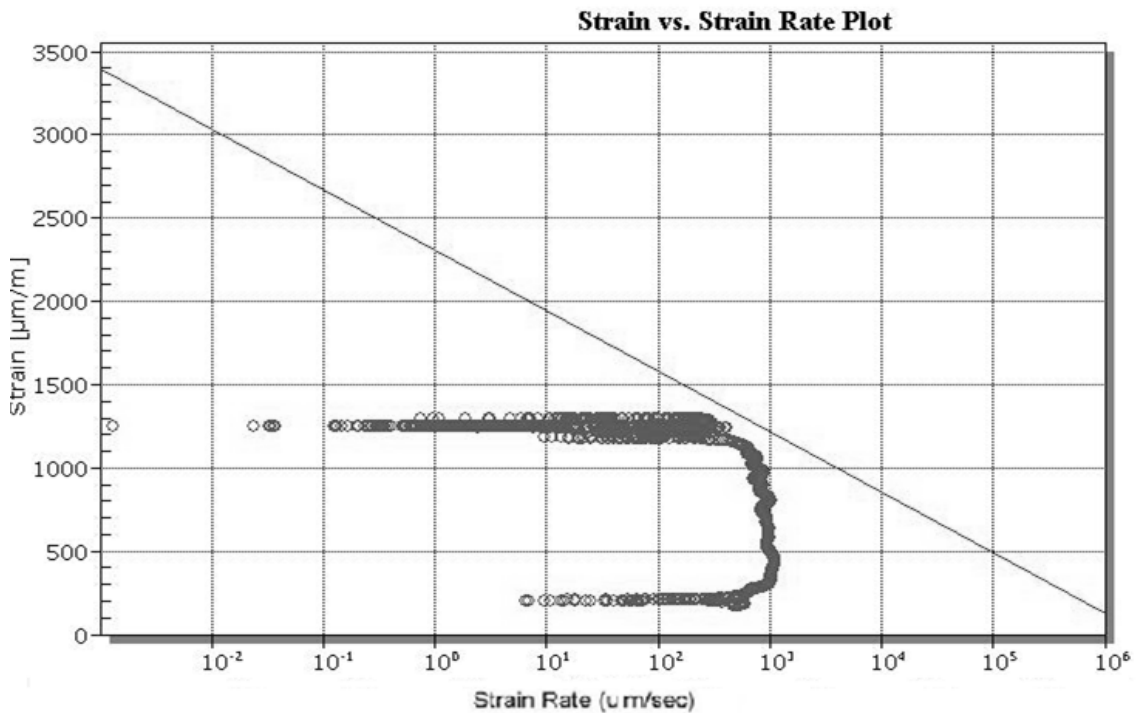
Obr. 99. Průběh maximální dovolené deformace; var. B, $h = 1,3\text{mm}$, průhyb 50mm

14.5.2 Šířka $h=1,6$ mm

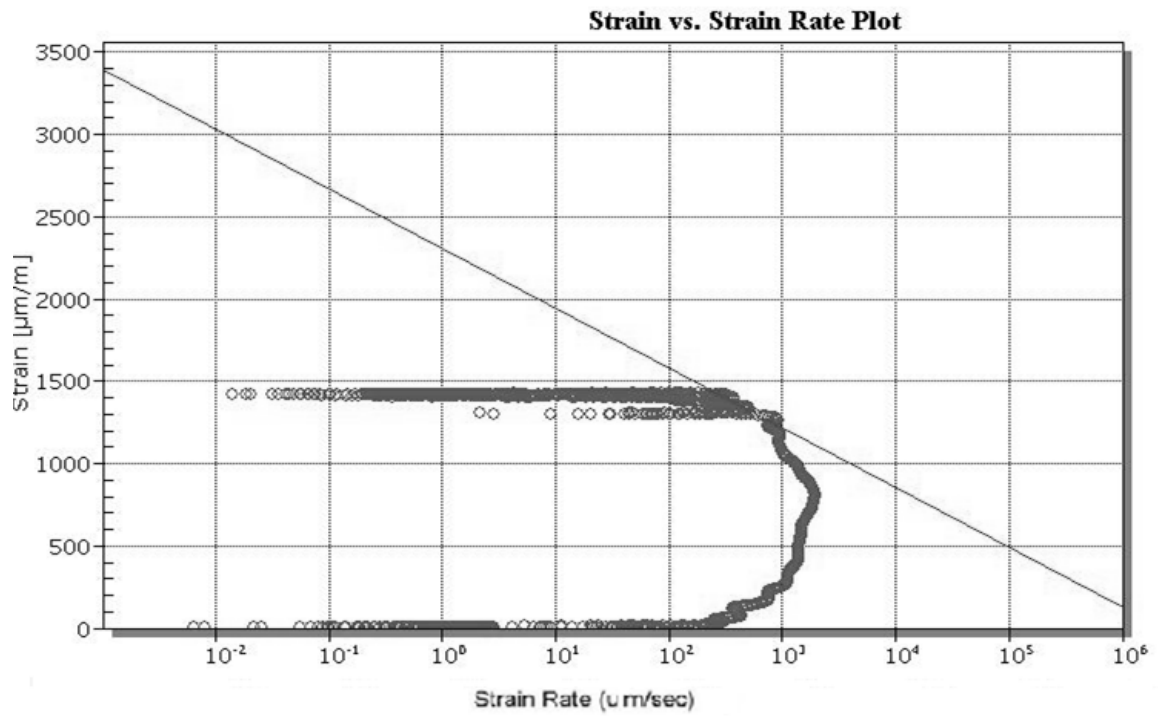
U průhybu desky o 50 mm došlo k porušení normy u varianty B. Naměřené hodnoty u varianty B překročily křivku maximální dovolené deformace. Tudíž by mohlo dojít k prasklinám v pájeném spoji. U varianty A nedošlo k porušení normy, nicméně naměřené hodnoty se velmi blíží křivce maximální dovolené deformace. Daný rozdíl je dán hlavně umístěním tenzometru.

Tab. 37: Vyhodnocení měření pro tloušťku 1,6mm a průhyb 50mm

	varianta/číslo měření	1	2	3	4	5
porušení normy	A	ne	ne	ne	ne	ne
	B	ano	ano	ano	ano	ano



Obr. 100. Průběh maximální dovolené deformace; var. A, $h=1,6$ mm, průhyb 50mm



Obr. 101. Průběh maximální dovolené deformace; var. B, $h = 1,6\text{mm}$, průhyb 50mm

ZÁVĚR

Cílem této diplomové práce bylo vytvořit parametrický model klipu pro zadané materiály a dále určit, zdali dojde k porušení normy IPC/JEDEC-9704 při ohybu FR4 desky.

Pro vytvoření parametrického modelu klipu byl využit program Catia V5r18 a jeho moduly. Před vytvořením samotného klipu bylo zapotřebí provést numerickou analýzu klipu. V modulu Generative Structure Analysis, ve kterém byla vytvořena FEM síť, byly dále zadány okrajové podmínky a zatížení.

Po výpočtu bylo zapotřebí vytvořit samotný parametrický model klipu. Pro každý zadaný materiál byl vytvořen jeden model klipu. K tomu bylo zapotřebí vytvořit parametry, které byly následně přiřazeny jednotlivým kótám ve skici klipu. Následně je popsáno jak postupovat při tvorbě klipu z vytvořených souborů.

V druhé části bylo cílem určit, zdali dojde k porušení normy PC/JEDEC-9704 při ohybu FR4 desky. Nejdříve bylo zapotřebí vytvořit model měřicího přípravku, jehož jednotlivé části jsou v práci detailně popsány. Výroba přípravku probíhala v nástrojárně firmy Varroc Lighting.

Následně proběhlo samotné měření, které probíhalo pro dvě FR4 desky o různých šířkách. První deska měla šířku 1,3 mm a druhá 1,6 mm. Zkouška probíhala pro průhyby desky 10, 20, 30, 40 a 50 mm. Aby byly postihnuty všechny případy montáže FR4 desky, bylo měření prováděno ve dvou orientacích desky. Pro každý průhyb bylo provedeno pět měření a následně vyhodnocení podle normy.

Všechny měření až na variantu uložení B u šířky desky 1,6 mm o průhybu 50 mm danou normu nepřekročily. Avšak díky tomuto překročení by docházelo k vzniku prasklin na spojích mezi FR4 deskou a elektronikou, a ta by následně správně nevykonávala svou funkci.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DSM. *Secondary operations guide* [online]. 2006 [cit. 2013-08-14]. Dostupné z: http://www.dsm.com/en_US/downloads/dep/Secondary_Operations.pdf
- [2] BAYER. *Joining techniques* [online]. 2001 [cit. 2013-08-12]. Dostupné z: http://ri-caube.ep.profweb.qc.ca/Les_polymeres_en_design_industriel/Assemblages_files/Thermoplastic%20Joining%20Techniques.pdf
- [3] DUPOND. *Design information: Assembly Techniques* [online]. 2002 [cit. 2013-08-12]. Dostupné z: http://plastics.dupont.com/plastics/pdflit/europe/design/L12565_9.pdf
- [4] ŠUBA, Oldřich. *Dimenzování a navrhování výrobků z polymerů*. Vyd. 3. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 112 s. ISBN 978-80-7318-948-8.
- [5] BASF. *Snap-Fit Design Manual* [online]. 2007 [cit. 2013-08-25]. Dostupné z: <http://www2.basf.us/PLASTICSWEB/displayanyfile?id=0901a5e1801499d5>
- [6] BEDNAŘÍK, Martin. *Lepení polymerů*. Zlín, 2011. Diplomová práce. UTB ve Zlíně.
- [7] MIKULÍK, Miroslav. *Využití normálií při konstrukci vstřikovacích forem*. Zlín, 2012. Bakalářská práce. UTB ve Zlíně.
- [8] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů*. Vyd. 1. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, 2005, 77 s. ISBN 80-01-03351-1.
- [9] ABEL, Martin. *Plošné spoje se SMD návrh a konstrukce*. Pardubice: Nakladatelství Platan, 2000, 218 s. ISBN 80-902-7332-7.
- [10] MALUČKÝ, Michal. *Konstrukce dělicího stroje DPS*. Zlín, 2010. Bakalářská práce. UTB ve Zlíně.
- [11] Oboustranné a jednostranné desky plošných spojů. In: *Gatema* [online]. 2013 [cit. 2013-11-14]. Dostupné z: <http://pcb.gatema.cz/1vrstve-a-2vrstve-dps/>
- [12] Základní materiály pro výrobu desek plošných spojů. *SMT centrum* [online]. 2013 [cit. 2013-11-15]. Dostupné z: <http://www.smtcentrum.cz/vyroba-desek-plosnych-spoju/zakladni-materialy-pro-vyrobu-desek-plosnych-spoju/>
- [13] Šuba, Oldřich. *Mechanické chování těles*. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2009. ISBN 978-80-7318-792-7.

- [14] JAVOŘÍK, J. *Aplikace výpočetních metod*. Zlín, 2009. Učební text.
- [15] TROJAN, Vítězslav. *Tenzometrická měření*. Brno, 2012. Bakalářská práce. VUT v Brně.
- [16] MLEZIVA, Josef. *Polymery - výroba, struktura, vlastnosti a použití*. 2. přepr. vyd. Praha: Sobotáles, 2000, 537 s. ISBN 80-859-2072-7.
- [17] IPC/JEDEC-9704. *Printed Wiring Board Strain Gage, Test Guideline*. Bannockburn: IPC, Illinois, 2005.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

FEM	Finite Element Method (Metoda konečných prvků)
°C	Stupeň Celsia
σ	Napětí [MPa]
ε	Poměrná deformace [-]
MPa	Mega pascal (jednotka tlaku)
μ	Poissonovo číslo [-]
W	Hustota deformační energie [Pa]
L_i	Deformovaná délka [m]
L_0	Původní délka [m]
∂	Parciální derivace
p	Tlak [Pa]
s	Skutečné napětí [Pa]
n	Počet polymerních řetězců v jednotkovém objemu
k	Boltzmannova konstanta [$J \cdot K^{-1}$]
T	Absolutní teplota [K]
E	Modul pružnosti [Pa]
m	Hmotnost [kg]
a	Zrychlení [m/s^2]
CAD	Computer aided design (Počítačová podpora konstrukce)
.CATPart	Nativní formát dílce v programu CATIA V5R18
Tet-10	Čtyřstěn tvořený deseti uzlovými body
σ_V	Napětí Von Mises [Mpa]
H	Tloušťka klipu [mm]
T	Velikost zobáčku [mm]

B	Šířka klipu [mm]
Lh	Délka klipu [mm]
R	Elektrický odpor [Ω .m]
ρ	Měrný odpor [Ω .m]
S	Průřez vodiče [mm ²]
l	Délka vodiče [m]
τ_{ij}	Tenzor napjatosti [-]
e	Poměrná změna objemu [-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Rozměrové požadavky na nalisovaný spoje [1]	14
Obr. 2. Doporučované druhy šroubů [2].....	16
Obr. 3. Ukázka návrhu šroubového spoje [1]	17
Obr. 4. Příklad spoje pomocí samořezných šroubů [1].....	17
Obr. 5. Samořezné šrouby 1. typu [1].....	18
Obr. 6. Samořezné šrouby 2. typu [1].....	18
Obr. 7. Ukázka typů pružných spojení [5].....	19
Obr. 8. Typy háčkových spojů [5]	20
Obr. 9. Umístění zobáčků na výrobku [5]	20
Obr. 10. Detail zobáčku	20
Obr. 11. Pružný spoj kulového tvaru [3]	21
Obr. 12. Pružný spoj cylindrického tvaru [3]	21
Obr. 13. Princip svařování termoplastů [1].....	22
Obr. 14. Ukázka spoje pomocí vibračního svařování [1]	23
Obr. 15. Svařování pomocí horkého plynu [1]	24
Obr. 16. Druhy svarů [1].....	25
Obr. 17. Svařování na tupo pomocí laseru [1].....	26
Obr. 18. Svařování transmittivní pomocí laseru [1]	26
Obr. 19. Ukázka spoje pomocí razníku [1].....	27
Obr. 20. Struktura lepeného spoje [6].....	28
Obr. 21. Schéma vstřikovacího stroje.....	30
Obr. 22. Vstřikovací cyklus [7]	33
Obr. 23. Ukázka návrhu výrobku s různou tloušťkou stěny [7]	34
Obr. 24. Zaformování výrobku [7]	34
Obr. 25. Zaformování výrobku [7]	35
Obr. 26. Ukázka desky plošných spojů [9].....	36
Obr. 27. Ukázka ohebné desky plošných spojů [9]	37
Obr. 28. Schéma jednostranné desky plošných spojů [11]	37
Obr. 29. Schéma dvoustranné desky plošných spojů [11].....	38
Obr. 30. Schéma šesti vrstvé desky plošných spojů se slepým vrtáním [11]	38
Obr. 31. Složky prostorové napjatosti [13].....	40
Obr. 32. Zobrazení deformace elementu [13].....	41

Obr. 33. Hydrostatická napjatost [13].....	42
Obr. 34. Obecná napjatost rozdělená na dílčí napětí [13].....	43
Obr. 35. Základní 3D elementy	46
Obr. 36. Geometrický model x FEM model	46
Obr. 37. Ukázka příložných tenzometrů [15]	49
Obr. 38. Ukázka lepeného tenzometru [15].....	50
Obr. 39. Ukázka foliového lepeného tenzometru [15].....	50
Obr. 40. Krystalová mřížka polovodiče [15]	51
Obr. 41. Model klipu.....	55
Obr. 42. Rozměry klipu	56
Obr. 43. Uchycení klipu.....	64
Obr. 44. Zatížení klipu.....	65
Obr. 45. TE-10 element	66
Obr. 46. Detail sítě.....	66
Obr. 47. Von Missesovo napětí	67
Obr. 48. Graf závislosti T na Lh pro tloušťku klipu H=1mm (Terluran HH-112)	70
Obr. 49. Graf závislosti T na Lh pro tloušťku klipu H=1mm (Altuglas V 825 T)	72
Obr. 50. Graf závislosti T na Lh pro tloušťku klipu H=1mm (Bayblend T80 XG) ...	74
Obr. 51. Graf závislosti T na Lh pro tloušťku klipu H=1mm (Cycoloy C1100HF)...	76
Obr. 52. Graf závislosti T na Lh pro tloušťku klipu H=1mm (Lustran ABS H802) ..	78
Obr. 53. Graf závislosti T na Lh pro tloušťku klipu H=1mm (Makrolon 1260 a Lexan LS1).....	80
Obr. 54. Graf závislosti T na Lh pro tloušťku klipu H=1mm (Makrolon AL2447 a Makrolon AL2647).....	82
Obr. 55. Ukázka funkce Formulas	83
Obr. 56. Přiřazení parametru ke kótě.....	84
Obr. 57. Závislé rozměry klipu.....	84
Obr. 58. Vytvořené pravidlo pro materiál Lexan LS1	85
Obr. 59. Záložka Parameters adnd Measure	86
Obr. 60. Záložka Part Infrastructure	86
Obr. 61. Vytvořené parametry	86
Obr. 62. Volba tloušťky klipu H.....	87
Obr. 63. Volba délky klipu L.....	87

Obr. 64. Volba velikosti zobáčku T.....	87
Obr. 65. Volba šířky klipu B.....	88
Obr. 66. Vytvořený klip.....	88
Obr. 67. Zobrazení praskliny mezi deskou a BGA pájecí kuličkou [16].....	89
Obr. 68. Závislost dovolené deformace na rychlosti deformace [17].....	91
Obr. 69. Měřicí přípravek	92
Obr. 70. Podstava měřícího přípravku	93
Obr. 71. Detail- drážka vymezení posuvu středového zobáčku	93
Obr. 72. Detail- drážka pro uchycení krajního zobáčku	94
Obr. 73. Krajní zobáček.....	94
Obr. 74. Detail- uchycení krajního zobáčku	95
Obr. 75. Detail- přitlačná deska	95
Obr. 76. Střední zobáček.....	96
Obr. 77. Konfigurace měření	97
Obr. 78. Univerzální měřicí ústředna QuantumX MX840	98
Obr. 79. Tenzometr SG3 wire 120 Ohms	98
Obr. 80. První krok měření	99
Obr. 81. Druhý krok měření.....	99
Obr. 82. Průběh maximální dovolené deformace; var. A, h= 1,3mm, průhyb 10mm.....	101
Obr. 83. Průběh maximální dovolené deformace; var. B, h= 1,3mm, průhyb 10mm.....	101
Obr. 84. Průběh maximální dovolené deformace; var. A, h= 1,6mm, průhyb 10mm.....	102
Obr. 85. Průběh maximální dovolené deformace; var. B, h= 1,3mm, průhyb 10mm.....	103
Obr. 86. Průběh maximální dovolené deformace; var. A, h= 1,3mm, průhyb 20mm.....	104
Obr. 87. Průběh maximální dovolené deformace; var. B, h= 1,3mm, průhyb 20mm.....	104
Obr. 88. Průběh maximální dovolené deformace; var. A, h= 1,6mm, průhyb 20mm.....	105

Obr. 89. Průběh maximální dovolené deformace; var. B, $h = 1,6\text{mm}$, průhyb 20mm.....	106
Obr. 90. Průběh maximální dovolené deformace; var. A, $h = 1,3\text{mm}$, průhyb 30mm.....	107
Obr. 91. Průběh maximální dovolené deformace; var. B, $h = 1,3\text{mm}$, průhyb 30mm.....	107
Obr. 92. Průběh maximální dovolené deformace; var. A, $h = 1,6\text{mm}$, průhyb 30mm.....	108
Obr. 93. Průběh maximální dovolené deformace; var. B, $h = 1,6\text{mm}$, průhyb 30mm.....	109
Obr. 94. Průběh maximální dovolené deformace; var. A, $h = 1,3\text{mm}$, průhyb 40mm.....	110
Obr. 95. Průběh maximální dovolené deformace; var. B, $h = 1,3\text{mm}$, průhyb 40mm.....	110
Obr. 96. Průběh maximální dovolené deformace; var. A, $h = 1,6\text{mm}$, průhyb 40mm.....	111
Obr. 97. Průběh maximální dovolené deformace; var. B, $h = 1,6\text{mm}$, průhyb 40mm.....	112
Obr. 98. Průběh maximální dovolené deformace; var. A, $h = 1,3\text{mm}$, průhyb 50mm.....	113
Obr. 99. Průběh maximální dovolené deformace; var. B, $h = 1,3\text{mm}$, průhyb 50mm.....	113
Obr. 100. Průběh maximální dovolené deformace; var. A, $h = 1,6\text{mm}$, průhyb 50mm.....	114
Obr. 101. Průběh maximální dovolené deformace; var. B, $h = 1,6\text{mm}$, průhyb 50mm.....	115

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Doporučené hodnoty úkosů</i>	35
<i>Tab. 2: Vlastnosti materiálů používaných pro odporové tenzometry [15]</i>	49
<i>Tab. 3: Vlastnosti materiálu Terluran HH-112</i>	58
<i>Tab. 4: Vlastnosti materiálu Lustran ABS H802</i>	58
<i>Tab. 5: Vlastnosti materiálu Altuglas v 825 T</i>	59
<i>Tab. 6: Vlastnosti materiálu Makrolon 1260</i>	60
<i>Tab. 4: Vlastnosti materiálu Makrolon AL 2447</i>	61
<i>Tab. 8: Vlastnosti materiálu Makrolon AL 2647</i>	61
<i>Tab. 9: Vlastnosti materiálu Lexan LS1</i>	62
<i>Tab. 10: Vlastnosti materiálu Cycoloy C1100HF</i>	63
<i>Tab. 11: Vlastnosti materiálu Bayblend T80 XG</i>	63
<i>Tab. 12: Hodnoty tloušťky klipu a velikosti zobáčku</i>	65
<i>Tab. 13: Hodnoty tloušťky klipu a velikosti zobáčku</i>	68
<i>Tab. 14: Vypočtené hodnoty délky pro materiál Terluran HH-112</i>	69
<i>Tab. 15: Závislost velikosti zobáčku T na délce klipu Lh (Terluran HH-112)</i>	70
<i>Tab. 16: Vypočtené hodnoty délky pro materiál Altuglas v 825 T</i>	71
<i>Tab. 17: Závislost velikosti zobáčku T na délce klipu Lh (Altuglas V 825 T)</i>	72
<i>Tab. 18: Vypočtené hodnoty délky pro materiál Bayblend T80 XG</i>	73
<i>Tab. 19: Závislost velikosti zobáčku T na délce klipu Lh (Bayblend T80 XG)</i>	74
<i>Tab. 20: Vypočtené hodnoty délky pro materiál Cycoloy C1100 HF</i>	75
<i>Tab. 21: Závislost velikosti zobáčku T na délce klipu Lh (Cycoloy C1100HF)</i>	76
<i>Tab. 22: Vypočtené hodnoty délky pro materiál Lustran ABS H802</i>	77
<i>Tab. 23: Závislost velikosti zobáčku T na délce klipu Lh (Lustran ABS H802)</i>	78
<i>Tab. 24: Vypočtené hodnoty délky pro materiály Makrolon 1260 a Lexan LS1</i>	79
<i>Tab. 25: Závislost velikosti zobáčku T na délce klipu Lh (Makrolon 1260 a Lexan LS1)</i>	80
<i>Tab. 26: Vypočtené hodnoty délky pro materiály Makrolon AL2447 a Makrolon AL2647</i>	81
<i>Tab. 27: Závislost velikosti zobáčku T na délce klipu Lh (Makrolon AL2447 a Makrolon AL2647)</i>	82
<i>Tab. 28: Vyhodnocení měření pro tloušťku 1,3mm a průhyb 10mm</i>	100
<i>Tab. 29: Vyhodnocení měření pro tloušťku 1,6mm a průhyb 10mm</i>	102

<i>Tab. 30: Vyhodnocení měření pro tloušťku 1,3mm a průhyb 20mm</i>	<i>103</i>
<i>Tab. 31: Vyhodnocení měření pro tloušťku 1,6mm a průhyb 20mm</i>	<i>105</i>
<i>Tab. 32: Vyhodnocení měření pro tloušťku 1,3mm a průhyb 30mm</i>	<i>106</i>
<i>Tab. 33: Vyhodnocení měření pro tloušťku 1,6mm a průhyb 30mm</i>	<i>108</i>
<i>Tab. 34: Vyhodnocení měření pro tloušťku 1,3mm a průhyb 40mm</i>	<i>109</i>
<i>Tab. 35: Vyhodnocení měření pro tloušťku 1,6mm a průhyb 40mm</i>	<i>111</i>
<i>Tab. 36: Vyhodnocení měření pro tloušťku 1,3mm a průhyb 50mm</i>	<i>112</i>
<i>Tab. 37: Vyhodnocení měření pro tloušťku 1,6mm a průhyb 50mm</i>	<i>114</i>

SEZNAM PŘÍLOH