

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: P2031 Strojní inženýrství

Studijní obor: 2302V019 Stavba strojů a zařízení

**DISERTAČNÍ PRÁCE**

Teorie a metodika zvyšování přesnosti lisů

Autor: **Ing. Jakub Jirásko**

Školitel: **doc. Ing. Martin Hynek, Ph.D.**

Akademický rok 2017/2018

## **PROHLÁŠENÍ O AUTORSTVÍ**

Předkládám tímto k hodnocení a obhajobě disertační práci zpracovanou na Katedře konstruování strojů Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem předloženou disertační práci:

*Teorie a metodika zvyšování přesnosti lisů*

vypracoval samostatně, pod vedením a odborným dohledem školitele s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v soupisu bibliografických citací, který je součástí této práce.

V Plzni dne:.....

.....

Podpis autora

## **PODĚKOVÁNÍ**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat všem, kteří mě v mém úsilí podporovali a podporují, zejména svému školiteli Doc. Ing. Martinu Hynkovi, Ph.D., všem ostatním kolegům a své rodině.

## ANOTACE

<b>AUTOR</b>	Příjmení (včetně titulů) Ing. Jirásko	Jméno Jakub
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	Stavba strojů a zařízení	
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) doc. Ing. Hynek, Ph.D.	Jméno Martin
<b>PRACOVIŠTĚ VEDOUcíHO</b>	Katedra konstruování strojů, Fakulta strojní, Západočeská univerzita v Plzni	
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>Disertační práce</b>	
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Teorie a metodika zvyšování přesnosti lisů	

Fakulta: Fakulta strojní  
Katedra: Katedra konstruování strojů  
Rok odevzdání: 2018

### Počet stránek (A4 a ekvivalentů A4)

<b>Celkem</b>	98	<b>Textová část</b>	66	<b>Grafická část</b>	32
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

<b>STRUČNÝ POPIS ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Tato práce je zaměřena na teorii a metodiku pro dosažení vyšší přesnosti v oblasti lisů pro automobilový průmysl. Na třech typech lisů jsou analyzovány možné fyzikální a procesní metody používané při návrhu lisu, které ovlivňují výslednou dosaženou přesnost. Výpočtovou část práce doplňují provedené experimenty a návrh pokročilé metodiky měření.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	Lis, přesnost, MKP, měření

## SUMMARY

<b>AUTHOR</b>	Surname (including of Degrees) Ing. Jirásko	Name Jakub
<b>FIELD OF STUDY</b>	Design of Machines and Equipment	
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (including of Degrees) doc. Ing. Hynek, Ph.D.	Name Martin
<b>INSTITUTION</b>	Department of Machine Design, Faculty of Mechanical Engineering, University of West Bohemia	
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>Dissertation</b>	
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Theory and methodology of increasing press precision	

Faculty: Faculty of Mechanical Engineering

Department: Department of Machine Design

Submitted in: 2018

### Number of pages (A4 a eq. A4)

<b>Totally</b>	98		<b>Text part</b>	66		<b>Graphical part</b>	32
----------------	----	--	------------------	----	--	-----------------------	----

<b>BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	This work is focused on the theory and methodology for achieving higher precision in presses for the automotive industry. Three types of presses are used to analyse the physical and procedural methods used in the press design phase which have an effect on the resulting accuracy. The computational part of the thesis is supplemented with experiments and the design of an advanced measurement methodology.
<b>KEY WORDS</b>	Press, precision, FEM, measurement

## Obsah

Seznam obrázků .....	8
Seznam tabulek .....	10
Seznam zkratk, symbolů a značek veličin .....	11
Úvod.....	13
1 Cíle disertační práce .....	15
2 Úvod do oblasti tvářecích strojů .....	16
2.1 Základní pojmy z oblasti hydraulických lisů .....	16
2.1.1 Základní teorie hydrauliky .....	17
2.1.2 Základní dělení hydraulických lisů [1], [3] .....	18
2.1.3 Technologické možnosti hydraulických lisů [1], [3] .....	18
2.2 Přehled výrobců zabývajících se výrobou lisů různých druhů.....	18
2.3 Požadavky na parametry tvářecích strojů .....	19
2.3.1 Přesnost tvářecích strojů.....	19
2.4 Statická tuhost .....	21
2.4.1 Dělení tuhosti dle kritérií [1]:.....	21
2.4.2 Celková tuhost stroje – pružinová náhrada.....	22
2.4.3 Styková tuhost .....	23
2.4.4 Možné způsoby ovlivnění tuhosti stroje .....	24
2.5 Teplotní stálost (odolnost) – Sdílení tepla.....	25
2.5.1 Základní pojmy .....	25
2.5.2 Stacionární vedení tepla pro jednoduché případy geometrií.....	25
2.5.3 Přestup tepla.....	26
2.5.4 Prostup tepla.....	27
2.5.5 Přenos tepla sáláním .....	27
2.6 Úvod do oblasti lisů pro výrobu a akustických a interiérových dílů pro automobilový průmysl.....	28
2.6.1 Akustické a pohledové díly .....	28
2.6.2 Materiály.....	29
2.6.3 Nástroje .....	30
3 Vlastní řešení disertační práce .....	32
3.1 Lis 30 kN.....	33
3.1.1 Okrajové podmínky .....	36
3.1.2 Materiálové vlastnosti.....	36
3.1.3 Výsledky výpočtů.....	36

3.1.4	Zhodnocení výsledků geometrické sub-optimalizace .....	38
3.1.5	Aktivní regulace deformací rámu stroje .....	38
3.2	Lis 1000 kN .....	40
3.2.1	Technologie.....	40
3.2.2	Základní požadavky na návrh.....	41
3.2.3	Morfologická matice stroje.....	42
3.2.4	Systémy pro vyrovnávání pohybu pohyblivé traverzy .....	43
3.2.5	Vedení.....	44
3.2.6	Rozmístění lisovacích válců.....	46
3.3	Výpočty lisu 1000 kN .....	46
3.3.1	Geometrické a statické okrajové podmínky .....	47
3.3.2	Kontakty.....	47
3.3.3	Materiálové vlastnosti.....	48
3.3.4	Výsledky.....	48
3.3.5	Vyhodnocení .....	53
3.4	Experimentální měření parametrů tkaniny .....	54
3.4.1	Provedené zkoušky:.....	55
3.4.2	Výsledky měření .....	57
3.4.3	Zhodnocení výsledků měření a jejich aplikace .....	57
3.5	Analýza hydraulického lisu 4000 kN a aplikace možných metod pro dosažení zvýšené přesnosti .....	58
3.5.1	Základní parametry a požadavky na stroj:.....	59
3.5.2	Shrnutí cílů této analýzy .....	59
3.5.3	Přehled řešených analýz.....	59
3.5.4	Materiálové vlastnosti.....	60
3.5.5	Diskretizace částí lisu.....	61
3.5.6	Vazby a kontakty .....	61
3.5.7	Okrajové podmínky .....	62
3.5.8	Nastavení teplotní analýzy .....	64
3.5.9	Výsledky analýzy .....	65
3.5.10	Vyhodnocení analýzy a metody pro zvýšení přesnosti .....	68
3.5.11	Analýza metod pro zvýšení přesnosti na modelu stolu .....	69
3.6	Experimentální měření posuvů na lisu 4000 kN .....	71
3.6.1	Závěry z měření .....	74
3.6.2	Návrh metodiky a doplnění normy pro měření lisů.....	75

4	Shrnutí .....	77
4.1	Zobecnění jednotlivých fyzikálních metod a způsobů dosažení požadované/vyšší přesnosti u lisů .....	77
4.1.1	Možnosti a omezení jednotlivých metod .....	77
4.2	Zobecnění procesních metod pro dosažení požadované/vyšší přesnosti u lisů	78
4.3	Doporučení a možnosti uplatnění výsledků práce v praxi .....	79
	Závěr .....	81
	Soupis bibliografických citací .....	83
	Přílohy .....	i



## Seznam obrázků

Obrázek 2-1:	Rozdělení výrobních strojů .....	16
Obrázek 2-2:	Postup měření geometrických parametrů [5] .....	20
Obrázek 2-3:	Sériové řazení pružin a paralelní řazení pružin [7] .....	23
Obrázek 2-4:	Základní pružinový model lisu [7] .....	23
Obrázek 2-5:	Nelineární průběh stykové tuhosti [8] .....	24
Obrázek 2-6:	Průběh teplot - rovinná stěna, válcová stěna, kulová stěna [9] .....	26
Obrázek 2-7:	Prostup tepla rovinnou stěnou – průběh teplot [9] .....	27
Obrázek 2-8:	Umístění akustických a pohledových dílů v osobním voze [12] .....	29
Obrázek 2-9:	Postup výroby dílu lisováním [11] .....	29
Obrázek 2-10:	Výroba dílu pinčováním [10] .....	29
Obrázek 2-11:	Příklad vzhledu části lisovaného dílu z tkaniny PE/PET .....	30
Obrázek 2-12:	Nástroj vyrobený z bloku (nahore), nástroj vyrobený z odlitku (dole) [15] ...	31
Obrázek 3-1:	Báze dat s vlivem na přesnost a její vliv na procesy v průběhu zakázky .....	32
Obrázek 3-2:	3D Model lisu 30 kN (vlevo) a znázornění zešikmení osy lisování vlivem celkové deformace [1] .....	34
Obrázek 3-3:	Nově navržený rám (zleva) a původní varianta rámu .....	35
Obrázek 3-4:	Okrajové podmínky: zleva lis s regulací průhybu, zprava lis bez regulace .....	36
Obrázek 3-5:	První (posunutí „a“=0,053 mm) a finální varianta rámu lisu (posunutí „a“=0,019 mm) .....	37
Obrázek 3-6:	Posunutí v ose x [mm] první a finální varianty, se zobrazením měřené hodnoty „a“ .....	37
Obrázek 3-7:	Posunutí v ose x [mm] u varianty lisu s aktivní regulací deformací rámu stroje .....	39
Obrázek 3-8:	Lis 1000kN popis jednotlivých částí stroje .....	42
Obrázek 3-9:	Detail vyrovnávacího mechanismu .....	43
Obrázek 3-10:	Příklad systému pro udržování rovnoběžnosti pohyblivé traverzy [16] .....	44
Obrázek 3-11:	Schémata možných vedení (modrá - rám, oranžová – pohyblivý stůl) [16] ...	44
Obrázek 3-12:	Příklady kladkového vedení používané u lisů [16], [12] .....	45
Obrázek 3-13:	Příklady možných konfigurací vedení se sloupy/vodícími tyčemi .....	45
Obrázek 3-14:	Půdorysné schéma možného rozmístění hydraulických válců .....	46
Obrázek 3-15:	Popis výpočtového modelu pro řešení úlohy na jedné polovině a jedné čtvrtině lisu .....	47
Obrázek 3-16:	Grafy průhybů upínací desky v příčných řezech varianty 1, centrické zatížení .....	48
Obrázek 3-17:	Grafy průhybů upínací desky v podélných řezech varianty 1, centrické zatížení .....	49
Obrázek 3-18:	Centrické zatížení lisu, posunutí v ose Y [mm]: Zleva varianta 1, zprava varianta 2 .....	50
Obrázek 3-19:	Centrické zatížení lisu, posunutí v ose Y [mm]: Zleva varianta 3, zprava varianta 4 .....	50

Obrázek 3-20:	Úloha s boční silou, celkové posuvy varianty 1 [mm] .....	51
Obrázek 3-21:	Úloha s boční silou, celkové posuvy varianty 2 [mm] .....	51
Obrázek 3-22:	Úloha s boční silou, celkové posuvy varianty 3 [mm] .....	51
Obrázek 3-23:	Úloha s boční silou, celkové posuvy varianty 4 [mm] .....	52
Obrázek 3-24:	Úloha s boční silou, celkové posuvy varianty 5 [mm] .....	52
Obrázek 3-25:	Úloha s boční silou, celkové posuvy varianty 6 [mm] .....	52
Obrázek 3-26:	Přípravky pro 2. a 3. Zkoušku .....	55
Obrázek 3-27:	Přípravky vyrobené pro experimentální měření.....	55
Obrázek 3-28:	Zkouška na trhačce Zwick/Roell Z050 a detaily s upnutím jednotlivých nástrojů.....	56
Obrázek 3-29:	Hlavní díly lisu a použité materiály.....	60
Obrázek 3-30:	Plochy stolu a beranu pro vyhodnocení rovinnosti .....	60
Obrázek 3-31:	Pevné vazby (vlevo) a kontaktní plochy (vpravo).....	62
Obrázek 3-32:	Okrajové podmínky .....	63
Obrázek 3-33:	Fotografie vulkanizačního lisu a snímek z termokamery [24] .....	64
Obrázek 3-34:	Vypočtené teplotní pole na validačním modelu vulkanizačního lisu [24] .....	64
Obrázek 3-35:	Analýza 1 a 2 – Redukované napětí dle HMM sestavy lisu [Pa] [25] .....	65
Obrázek 3-36:	Analýza 3 - Redukované napětí dle HMM sestavy lisu [Pa] vlevo, Analýza 2 Teplotní pole lisu [°C] - pohled do roviny symetrie [25].....	65
Obrázek 3-37:	Analýza 2 – Teplotní pole na rámu lisu [°C], teplotní ovlivnění rámu lisu [°C] [26].....	66
Obrázek 3-38:	Analýza 3 – Teplotní pole na rámu lisu [°C], teplotní ovlivnění rámu lisu [°C] [26].....	66
Obrázek 3-39:	Analýza 2 (levý) a 3 (pravý) – Celkové posuvy na rámu lisu [m] [26].....	67
Obrázek 3-40:	Hodnoty rovinnosti pro analyzované plochy z analýzy 1, 2 a 3 .....	67
Obrázek 3-41:	Hodnoty rovinnosti pro analyzované plochy z analýzy 4 a 5 .....	67
Obrázek 3-42:	Rovný I profil a bombírovaný I profil [25].....	68
Obrázek 3-43:	Model stolu lisu pro samostatnou analýzu.....	69
Obrázek 3-44:	Půdorysný pohled na ¼ lisu - okrajové podmínky.....	69
Obrázek 3-45:	Průhyb stolu lisu z výpočtu 1 – Křivka použita pro „bombírování “ horní plochy stolu ve výpočtu 3. ....	70
Obrázek 3-46:	Teplotní pole stolu z druhé analýzy stolu lisu [°C] .....	70
Obrázek 3-47:	Měřicí systém Leica Laser Tracker LTD800 [27], [28].....	72
Obrázek 3-48:	Lis 4000 kN použitý pro experimentální ověření posuvů a detail orýsování upínací desky.....	72
Obrázek 3-49:	Naměřený rastr bodů na spodní upínací desce v prvním měření bez zatížení a upínací desky.....	73
Obrázek 3-50:	Naměřený rastr bodů ve druhém měření s upnutým nástrojem a lisovací silou 4000 kN.....	73
Obrázek 3-51:	Vyhodnocení druhého měření vůči referenční ploše definované body z měření bez zatížení.....	74
Obrázek 3-52:	Vývojový diagram .....	76

## Seznam tabulek

Tabulka 1:	Přehled českých výrobců lisů.....	19
Tabulka 2:	Přehled hlavních zahraničních výrobců lisů .....	19
Tabulka 3:	Zařazení lisu dle konstrukce rámu .....	33
Tabulka 4:	Materiálové vlastnosti.....	36
Tabulka 5:	Přehled analyzovaných parametrů a vyhodnocení jejich vlivu .....	38
Tabulka 6:	Zařazení lisu dle konstrukce rámu .....	40
Tabulka 7:	Morfologické matice konstrukce stroje .....	42
Tabulka 8:	Analyzované varianty lisu .....	46
Tabulka 9:	Materiálové vlastnosti (z knihoven programu Solidworks) .....	48
Tabulka 10:	Vyhodnocení jednotlivých variant vedení stolů .....	53
Tabulka 11:	Vyhodnocení variant uspořádání válců.....	53
Tabulka 12:	Síly při stlačení prostým tlakem.....	57
Tabulka 13:	Síly při stlačování na tloušťku 3,5 mm různými nástroji .....	57
Tabulka 14:	Síly při stlačování na tloušťku 4 mm různými nástroji .....	57
Tabulka 15:	Zařazení lisu dle konstrukce rámu .....	59
Tabulka 16:	Materiálové vlastnosti [17], [18], [19], [20], [21] .....	60
Tabulka 17:	Rovinnosti zkoumané plochy.....	70
Tabulka 18:	Porovnání jednotlivých přístupů při návrhu.....	71
Tabulka 19:	Hodnoty posuvů uzlů na validačním výpočtovém modelu .....	72
Tabulka 20:	Rovinnosti .....	74
Tabulka 21:	Průhyby na měřeném pásu bodů .....	74
Tabulka 22:	Vstupy a výstupy u jednotlivých stupňů integrace procesů.....	79

## Seznam zkratk, symbolů a značek veličin

Značka veličiny, symbol, zkratka	Jednotka	Popis
Zkratky		
CAD	[-]	počítačem podporované navrhování
HMH	[-]	Huber, von Mises, Hencky
MKP	[-]	metoda konečných prvků
Fyzikální veličiny		
$c_0$	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}]$	Stefan-Bolzmanova konstanta 5,676
$E$	[Pa]	Modul pružnosti
$g$	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$	gravitační zrychlení
$F$	[N]	síla
$h_1, h_2$	[m]	výška hladiny v daném průřezu
$J$	$[\text{m}^4]$	kvadratický moment průřezu
$k$	$[\text{N}\cdot\text{m}^{-1}]$	tuhost
$l$	[m]	rozměr (délka, výška)
$l_0$	[m]	počáteční délka
$\Delta l$	[m]	rozdíl nezatížené a zatížené délky
$M$	[N·m]	zátěžný moment
$p$	[Pa]	tlak
$p_1, p_2$	[Pa]	tlak kapaliny v daném průřezu
$\Delta p$	[Pa]	tlaková ztráta způsobená přenosem energie mezi průřezy $S_1$ a $S_2$
$q$	$[\text{W}\cdot\text{m}^{-2}]$	tepelný tok
$Q$	$[\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$	průtok
$\dot{Q}$	[W]	průtok tepla
$Q_A$	[J]	teplo pohlcené tělesem

$Q_D$	[J]	teplo propuštěné tělesem
$Q_O$	[J]	teplo dopadající na těleso
$Q_R$	[J]	teplo odražené tělesem
$q_s$	[W.m <sup>-2</sup> ]	Intenzita záření
$r_1$	[m]	vnitřní poloměr
$r_2$	[m]	vnější poloměr
$S$	[m <sup>2</sup> ]	plocha
$S_1, S_2$	[m <sup>2</sup> ]	plocha průřezu
$T$	[K]	teplota vyzařujícího tělesa
$T_1$	[K]	teplota stěny
$T_2$	[K]	teplota stěny
$v_1, v_2$	[m.s <sup>-1</sup> ]	rychlosti proudu kapaliny v jednotlivých průřezech
$\gamma$	[m]	deformace tělesa
$\alpha_n$	[1]	konstanta dle uložení nosníku
$\alpha$	[W. m <sup>-2</sup> .K <sup>-1</sup> ]	součinitel přestupu tepla
$\delta$	[m]	tloušťka stěny
$\varepsilon$	[1]	poměrné prodloužení
$\varepsilon_s$	[1]	poměrná sálavost
$\lambda$	[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	součinitel tepelné vodivosti
$\rho$	[kgm <sup>-3</sup> ]	hustota kapaliny
$\sigma$	[Pa]	normálové napětí
$\varphi$	[rad]	deformace v natočení

## Úvod

Pro producenta lisů v tržním hospodářství je důležitá ekonomická konkurenceschopnost nabízených strojů. Stroje musí plnit technické požadavky zákazníka a producent lisů je nucen těchto parametrů dosáhnout s vynaložením co nejmenších výrobních nákladů. Kromě základních technických požadavků musí stroje plnit zpřísňující se normy v dané oblasti, mít vysokou spolehlivost a též dbát na ekologickou stránku. Svoji nezastupitelnou roli při návrhu stroje má též spektrum dostupných poznatků a know-how výrobce.

Nároky na přesnost výrobků se s vývojem nových moderních produktů stále zvyšují. Tento trend je patrný ve všech odvětvích průmyslu a producenti výrobních strojů to musí reflektovat. V současnosti je díky možnostem pokročilých metod výpočtů možné navrhovat stroje méně předimenzované než byly v minulosti. Ve fázi návrhu konstrukce je též možné využívat různých metodik a konstrukčních přístupů, které též v minulosti nebyly tak propracované (např. dle engineering design science).

Na základě závěrů komise ze státní doktorské zkoušky bylo zadané rámcové téma disertační práce "Metody optimalizace spolehlivosti a renovace výrobních zařízení" upřesněno na oblast lisů se zaměřením na jejich přesnost. Přesnost rámců a částí stroje má silnou vazbu na jeho spolehlivost. Dosažením vyšší přesnosti je možné snížit namáhání strojních částí (např.: vedení, těsnění atd.), a zvýšit tak jejich životnost a spolehlivost. Oblast renovací je v práci zohledněna navrženými metodami, které jsou při renovacích aplikovatelné.

Tato práce se zabývá návrhem a zhodnocením metod pro dosažení požadovaných parametrů přesnosti u lisů. Oblast lisů je velmi široká a existuje mnoho výrobců lisů pro různé tvářecí operace. Vybraní představitelé lisů jsou z oblasti výroby pro automobilový průmysl, který má svá specifika a v současné době je hybným motorem České ekonomiky. V práci jsou analyzovány a identifikovány konkrétní aktuální problematiky a problematické konstrukční uzly. Součástí práce jsou návrhy nekonvenčních fyzikálních a procesních metod užívaných při návrhu konstrukce a konkrétní příklady konstrukčních provedení na vybraných představitelích lisů. Práce je odstupňována od jednodušších metod až po ty, u kterých je nutné velmi vyspělé softwarové a měřicí vybavení vyžadující hlubší znalost výpočtových metod. Řešené typy lisů v dané oblasti byly vybírány tak, aby u nich byla vysoká rozmanitost použitých konstrukčních prvků a způsobů zatížení. Souhrn těchto výsledků vytváří bázi dat a postupů, s kterými lze efektivně řešit návrh stroje dle požadovaných parametrů. Výsledky práce by měly usnadnit rozhodování při návrhu koncepce lisu vzhledem k požadované přesnosti. Zobecněné výstupy práce jsou aplikovatelné i v oblasti jiných strojů. Vzhledem k potřebě ověření výsledků výpočtů bylo provedeno měření na skutečném lise, ze kterého vyplynula metodika pro eliminaci výrobních nepřesností z výsledků měření a doplnění hodnot na místech, kde není možné měřit.

První část s lisem „30 kN“ je věnována základním metodám a způsobům ovlivnění přesnosti a tuhosti rámu lisů. Ve druhé části s lisem „1000 kN“ jsou analyzovány možné konstrukční provedení a vliv použitých prvků na tuhost a výslednou přesnost lisů. Výpočtová část je podložena experimentálním měřením parametrů lisované tkaniny, jakožto vstupního materiálu, na zkušebním stroji. Poslední část s lisem „4000 kN“ je věnována teplotnímu vlivu na rám stroje a možnostem jejich eliminace spolu s dalšími pokročilými metodami analýz a způsobů eliminace deformací rámu. Je též navržena metoda a byl proveden experiment pro

ověření vypočtených posuvů měřením laserovým měřícím zařízením s eliminací výrobních a montážních nepřesností. V závěru práce je proveden přehled a zobecnění možných metod a přístupů k návrhu rámu stroje pro požadované parametry a jsou též stanoveny doporučení pro praxi. Výsledkem pro praxi by měla být vyšší technická úroveň zařízení a jeho užitných vlastností.

## 1 Cíle disertační práce

Cílem disertační práce je návrh obecných konstrukčních a výrobních opatření (metod), která povedou ke zvýšení přesnosti výroby na hydraulických lisech využívaných zejména v odvětví automobilového průmyslu. Pro zajištění přínosu do této problematiky jsou stanoveny následující dílčí cíle práce:

1. Teoretický úvod do řešené problematiky
2. Návrh konstrukčních variant, úprav a metod pro dosažení vyšší přesnosti u různých velikostí lisů
3. Experimentální měření mechanických vlastností lisovaného materiálu
4. Výpočtové řešení velikostně odstupňovaných tvářecích strojů
5. Experimentální měření na lisu
6. Shrnutí a zobecnění. Zhodnocení vlivu vybraných faktorů a jejich přínos
7. Stanovení doporučení pro praxi
8. Vyhodnocení výsledků

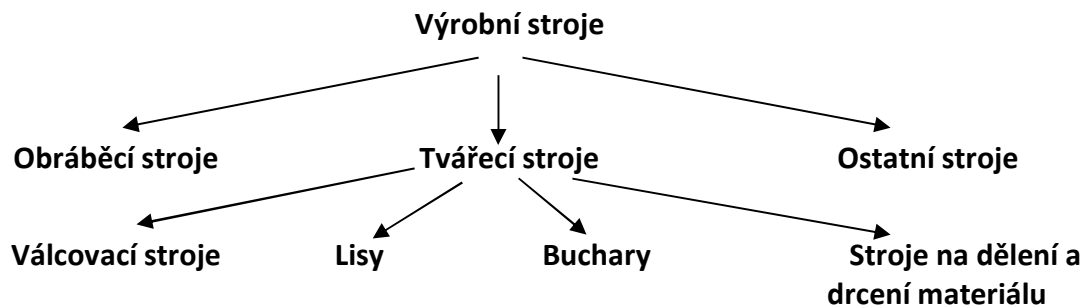


## 2 Úvod do oblasti tvářecích strojů

Definice: Tvářením je výrobní proces, kdy je působením vnější síly dosaženo požadované změny původního tvaru materiálu bez jeho porušení. [1], [2]

Tvářecí stroj je zařízení, které zpracovává materiál tvářením nebo stříháním za studena či za tepla jeho mechanickým přetvořením. [1], [2]

Rozdělení výrobních strojů viz Obrázek 2-1.



Obrázek 2-1: Rozdělení výrobních strojů

Tvářecí stroje lze dále dělit dle [1], [2]:

Druhu pohybu nástroje

- Přímočarý pohyb nástroje
- Nepřímočarý pohyb nástroje

Dle druhu pohonu

- Mechanické
- Hydraulické
- Mechanicko-hydraulické
- Ostatní

Dle technologie, pro kterou jsou konstruovány

- Plošné tvářením
- Objemové tvářením
- Dělení materiálu

Dle konstrukce rámu

- Otevřené
- Uzavřené

### 2.1 Základní pojmy z oblasti hydraulických lisů

Hlavním využívaným typem pohonu pro lisy je v rámci této práce pohon hydraulický. Hydraulický lis je stroj, u něhož je pracovní síla na beranu či traverze vyvozena tlakovou energií pracovní kapaliny. Energetickým zdrojem tlaku je čerpadlo(a) nebo akumulátor(y).

### 2.1.1 Základní teorie hydrauliky

U hydraulických lisů je používán zejména Pascalův zákon, který říká, že: „Tlak vyvolaný vnější silou, která působí na kapalinu v uzavřené nádobě, je ve všech místech kapaliny stejný“.

Rovnice pro hydraulický převod má následující tvar [1], [3]:

$$F_1 = S_1 \cdot p \quad (1)$$

$$F_2 = S_2 \cdot p \quad (2)$$

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1 \cdot p}{S_2 \cdot p} = \frac{S_1}{S_2} \quad (3)$$

$$F_2 = F_1 \cdot \frac{S_2}{S_1} \quad (4)$$

Pro výpočet hydraulických pohonů je používána rovnice kontinuity, která popisuje vztah mezi rychlostí proudění a obsahem průřezu.

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 = Q \quad (5)$$

$v_1, v_2$  - rychlosti proudu kapaliny v jednotlivých průřezích

$Q$  – průtok

Jako další vztah se v hydraulice používá Bernoulliho rovnice, která vyjadřuje zákon o zachování mechanické energie pro ustálené proudění kapaliny. [1], [3]

$$\frac{v_1^2}{2 \cdot g} + \frac{p_1}{\rho \cdot g} + h_1 = \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + \frac{p_2}{\rho \cdot g} + h_2 + \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} \quad (6)$$

$S_1, S_2$  - plocha průřezu

$v_1, v_2$  - rychlost proudu kapaliny v daném průřezu

$p_1, p_2$  - tlak kapaliny v daném průřezu

$h_1, h_2$  - výška hladiny v daném průřezu

$\rho$  - hustota kapaliny

$g$  - gravitační zrychlení

$\Delta p$  - tlaková ztráta způsobená přenosem energie mezi průřezy  $S_1$  a  $S_2$ , (odpor proti proudění, třecí odpor proti pohybu pístu a redukované mechanické odpory systému lisu)

Z rovnice plyne, že pro hydraulický tlak u pístu platí [1]:

$$p_2 = p_1 + \rho \cdot g \cdot (h_1 - h_2) + \frac{\rho}{2} \cdot (v_1^2 - v_2^2) - \Delta p \quad (7)$$

Tíhový a rychlostní člen rovnice jsou obvykle proti hydrostatickému tlaku zanedbatelné a proto lze zjednodušit na [1]:

$$p_2 = p_1 - \Delta p \quad (8)$$

### 2.1.2 Základní dělení hydraulických lisů [1], [3]

Dle uspořádání stroje

- Vertikální konstrukce
- Horizontální konstrukce

Dle pohonu

- Přímý pohon
- Akumulátorový pohon

Dle technologického použití

- Kovací
- Tažné
- Vytlačovací
- Dílenské
- Razící
- Pro zpracování odpadu
- Pro tváření plastů
- Textilní díly

Dle konstrukce rámu stroje

- Uzavřený rám
- Otevřený rám

Dle technologie

- Objemové tváření
- Vytlačování
- Plošné tváření
- Montážní a rovnací

### 2.1.3 Technologické možnosti hydraulických lisů [1], [3]

- Možnost regulace síly a rychlosti pístnice/plunžrů
- Možnost vyvození vysokých sil
- Možnost vyvození konstantní síly v průběhu celého zdvihu
- Možnost regulace zdvihu
- Možnost automatizace s použitím řídicího systému
- Možnost regulovat naklopení pohyblivé traverzy (stolu)

## 2.2 Přehled výrobců zabývajících se výrobou lisů různých druhů

Přehled hlavních českých výrobců zabývajících se výrobou lisů různých parametrů uvádí Tabulka 1. Hlavní zahraniční výrobce lisů uvádí Tabulka 2.

Tabulka 1: Přehled českých výrobců lisů

Čeští výrobci lisů	Internetové stránky výrobce
TS Plzeň	<a href="http://www.tsplzen.cz">http://www.tsplzen.cz</a>
ŽDAS	<a href="https://www.zdas.com">https://www.zdas.com</a>
Šmeral Brno a.s.	<a href="http://www.smeral.cz">http://www.smeral.cz</a>
Value 4 Industry	<a href="http://www.naretec.cz">http://www.naretec.cz</a>

Tabulka 2: Přehled hlavních zahraničních výrobců lisů

Zahraniční výrobci lisů	Internetové stránky výrobce
Dieffenbacher	<a href="https://www.dieffenbacher.de">https://www.dieffenbacher.de</a>
Siempelkamp	<a href="https://www.siempelkamp.com">https://www.siempelkamp.com</a>
Schuler	<a href="https://www.schulergroup.com">https://www.schulergroup.com</a>
Andritz	<a href="https://www.andritz.com">https://www.andritz.com</a>
SMS group	<a href="https://www.sms-group.com">https://www.sms-group.com</a>
Wepuko Pahnke	<a href="https://www.wepuko.de">https://www.wepuko.de</a>
NKMZ	<a href="http://nkmz.com">http://nkmz.com</a>
Lasco	<a href="https://www.lasco.de">https://www.lasco.de</a>
ERIE Press System	<a href="https://eriepress.com">https://eriepress.com</a>
Japan Steel Works	<a href="http://www.jsw.co.jp/en">http://www.jsw.co.jp/en</a>
MAWI	<a href="https://www.pressenzentrum.de">https://www.pressenzentrum.de</a>

## 2.3 Požadavky na parametry tvářecích strojů

### 2.3.1 Přesnost tvářecích strojů

Přesnost výroby je schopnost stroje vyrábět přesně. Nepřesnost stroje má vliv na výslednou odchylku výrobku od teoreticky přesného modelu. Čím vyšší je přesnost stroje, tím více odpadají následné technologické operace. [1]

Přesnost výroby je daná:

- přesností dráhy výstupního členu
- geometrickou přesností stroje a činných ploch
- vlastnostmi polotovaru

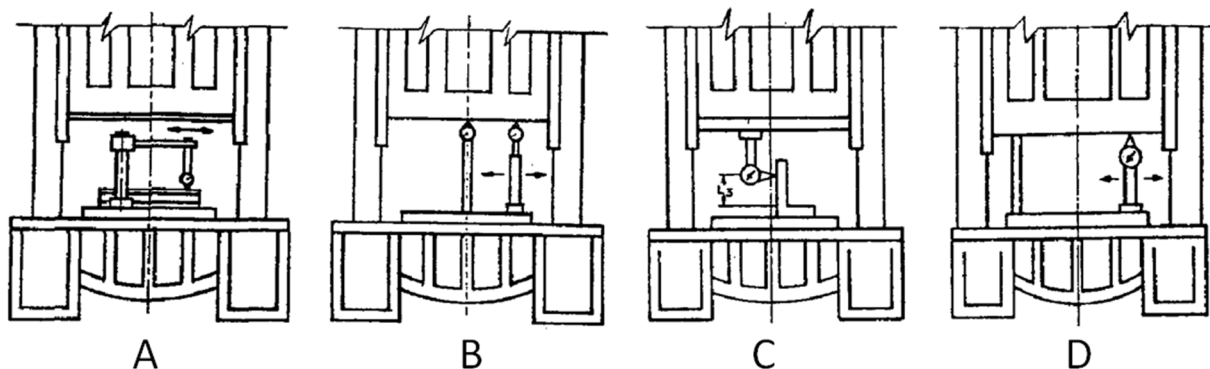
Přesnost tvářecího stroje je posuzována v zatíženém a nezatíženém stavu. V nezatíženém stavu se projeví hlavně montážní a výrobní nepřesnosti. V zatíženém stavu je konstrukce ovlivněna dalšími vlivy jakou jsou síly, teplota, vlhkost atd., které mohou zásadně měnit parametry přesnosti a stroj by měl být dimenzován tak, aby tyto vlivy byly co nejlépe eliminovány. [1]

### Druhy přesností tvářecího stroje [1]:

1. **Přesnost geometrická** – zahrnuje odchylku rozměrů, tvaru a vzájemné polohy částí stroje, které určují polohu a relativní dráhu činných členů stroje (např.: nástroj). Přesnost je zjišťována v nezátíženém stavu dle norem. Tato přesnost je ovlivněna přesností výroby jednotlivých dílů stroje a přesností jejich vzájemného spojení (montáže).
2. **Přesnost kinematická** – je vyjádřením chyb ve vazbě pohybů. Tyto chyby jsou dané výrobou a montáží jednotlivých částí stroje.
3. **Nastavení nástroje** – tato přesnost je ovlivněna:
  - Vůlemi v měřícím mechanismu a pohybovém mechanismu
  - Dynamickými vlastnostmi pohybového mechanismu
  - Krokem přestavení nástroje
4. **Pracovní přesnost** – tato přesnost je zkoušena na vzorovém výrobku. Měří se tvar, rozměr a vzájemná poloha ploch. Pokud výrobce garantuje některé parametry stroje (průhyb, rovinnost, paralelita atd.) pod zatížením i ty jsou při přejímkách strojů měřeny. Pracovní přesnost je především ovlivněna:
  - Zatížením stroje pracovní silou – která má za následek deformace a posunutí poddajných celků
  - Teplotní ovlivnění stroje – Vlivem tepla vznikají tzv. teplotní dilatace jednotlivých částí stroje. Vliv teplotního ovlivnění roste s teplotním rozdílem na jednotlivých částech stroje a s rozměry stroje. (čím je teplotní rozdíl vyšší a čím je stroj rozměrnější, tím je vliv teplotního ovlivnění větší) Dále může mít výrazný vliv kombinace (spojení) dílů s rozdílným součinitelem teplotní roztažnosti.

Rám stroje tedy musí odolávat silovému zatížení, musí být dostatečně tuhý. A dále musí odolávat teplotnímu zatížení – teplotně symetrická konstrukce, popřípadě toto teplotní ovlivnění co nejvíce eliminovat např.: dostatečnou tloušťkou izolace, dodatečným chlazením atd.

Měřené parametry u lisů jsou definovány například v normách [4], [5], [6] (ISO 6899, IS 14877, JIS B6403), ty určují i způsob jejich přeměření. Zpravidla se přeměřuje rovinnost upínacích desek (Obrázek 2-2 A), rovnoběžnost upínacích desek (Obrázek 2-2C), kolmost pohybu beranu vůči upínací desce stolu (Obrázek 2-2 B). Dále se provádí měření rovnoběžnosti s excentricky vloženým členem, tím je zjišťována vůle ve vedeních (Obrázek 2-2 D). Normy zařazují lisy do různých tříd přesností dle použití. Pro tyto třídy platí odlišné hodnoty specifikovaných přesností.



Obrázek 2-2: Postup měření geometrických parametrů [5]

## 2.4 Statická tuhost

Tuhost je jedním ze základních parametrů rámu stroje. Kritérium návrhu geometrie a rozměrů tvářecích strojů je obvykle maximální hodnota elastické deformace. Tuhost vyjadřuje odolnost proti pružným deformacím. V oblasti tvářecích strojů se jedná o tuhost polotovaru, nástrojů a pracovního prostoru stroje. Převrácená hodnota tuhosti se nazývá poddajnost. [1]

**Pružnost tělesa** – je schopnost tělesa se po odstranění vnějšího zatížení vrátit do původního stavu. Pružné chování tělesa je charakterizováno modulem pružnosti  $E$  [Pa], který je poměr napětí a jím vyvolané deformace. [1]

**Tuhost tělesa** – vyjadřuje odolnost tělesa proti pružné deformaci, která je způsobena vnějším zatížením. Pokud se deformace pohybuje v mezích Hookova zákona, tak platí, že tuhost je konstantní. [1]

### 2.4.1 Dělení tuhosti dle kritérií [1]:

#### 1. Dle zatížení

- Tuhost v posunutí
- Tuhost v natočení

Výpočet tuhosti v posunutí:

$$k = \frac{F}{y} \quad (9)$$

$k$  - tuhost [ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ]

$F$  - vnější síla [N]

$y$  - deformace tělesa [m]

Pro výpočet tuhosti se vzorec upravuje dosazením Hookova zákona, poměrného prodloužení a vzorce pro výpočet napětí v tahu (tlaku).

Hookův zákon:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (10)$$

$\sigma$  - normálové napětí [Pa]

$\varepsilon$  - poměrné prodloužení [1]

Poměrné prodloužení:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (11)$$

$\Delta l$  - rozdíl nezatížené a zatížené délky [m]

$l_0$  - počáteční délka [m]

Napětí v tahu (tlaku):

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (12)$$

$S$  - plocha průřezu [ $\text{m}^2$ ]

Dosažením těchto rovnic do obecného vztahu tuhosti po úpravě dostaneme:

$$k = \frac{F}{y} = \frac{E}{S \cdot l_o} \quad (13)$$

Výpočet tuhosti v natočení:

$$k = \frac{M}{\varphi} \quad (14)$$

$M$  – zátěžný moment [N.m]

$\varphi$  – deformace v natočení [rad]

## 2. Dle způsobu zatížení

- Statická tuhost
- Dynamická tuhost

## 3. Dle toho, k čemu je vztažena deformace

- Absolutní tuhost
- Relativní tuhost
- Dílčí tuhost
- Celková tuhost
- Celková tuhost stroje

### 2.4.2 Celková tuhost stroje – pružinová náhrada

Pro výpočet celkové tuhosti stroje lze jednotlivé komponenty rámu lisu nahradit pružinami a vytvořit tak zjednodušený pružinový model. Pružiny jsou v tomto modelu řazeny sériově či paralelně. Pro sériové řazení pružin platí, že se sčítají deformace. U řazení paralelního jsou deformace jednotlivých pružin sobě rovné. Schématické znázornění řazení pružin viz Obrázek 2-3. [1], [7]

Pro sériové řazení pružin platí:

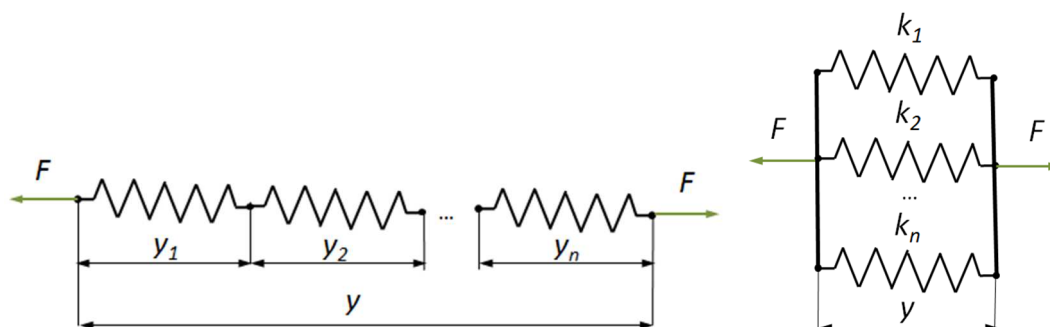
$$y = y_1 + y_2 + \dots + y_n = \sum \frac{1}{y_i} \quad (15)$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n} = \sum \frac{1}{k_i} \quad (16)$$

Pro paralelní řazení pružin platí:

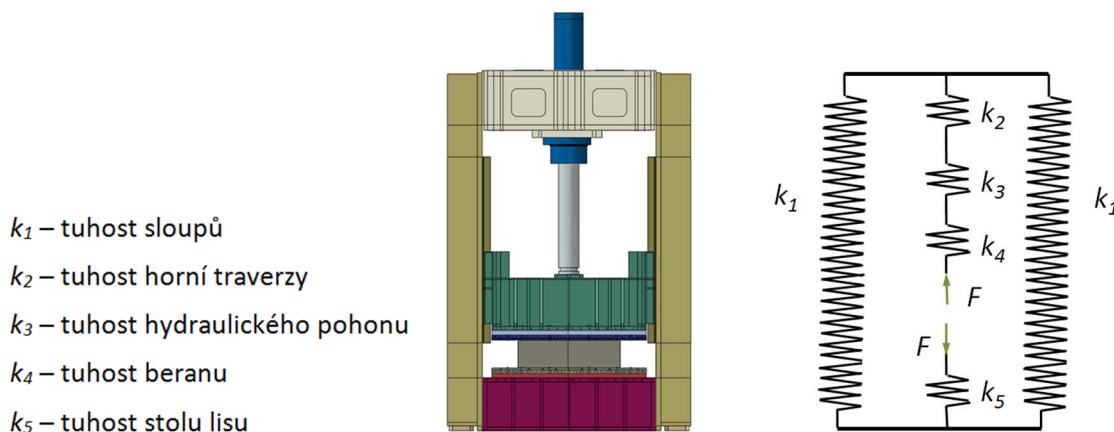
$$y = y_1 = y_2 = \dots = y_n \quad (17)$$

$$k = k_1 + k_2 + \dots + k_n = \sum k_i \quad (18)$$



Obrázek 2-3: Sériové řazení pružin a paralelní řazení pružin [7]

Pružinový model hydraulického lisu viz Obrázek 2-4.



- $k_1$  – tuhost sloupů
- $k_2$  – tuhost horní traverzy
- $k_3$  – tuhost hydraulického pohonu
- $k_4$  – tuhost beranu
- $k_5$  – tuhost stolu lisu

Obrázek 2-4: Základní pružinový model lisu [7]

Vztah pro celkovou tuhost lisu s použitím pružinového modelu:

$$k_c = \frac{1}{\frac{1}{k_1 + k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \frac{1}{k_4} + \frac{1}{k_5}} \quad (19)$$

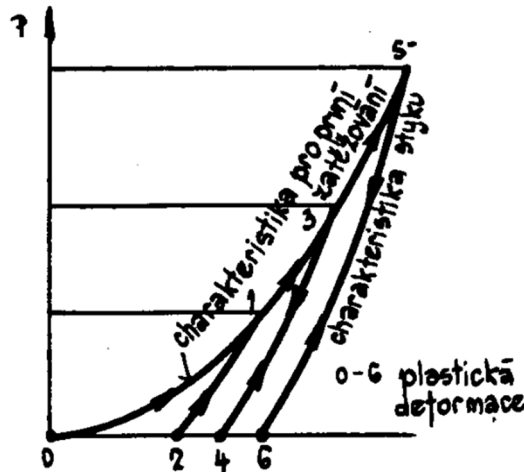
### 2.4.3 Styková tuhost

Styková tuhost je definovaná jako poměr mezi jmenovitým měrným tlakem a deformací povrchových vrstev. Deformace povrchu se skládají z trvalých (plastických) a elastických deformací. Rozlišují se makro a mikro nerovnosti. Mikro nerovnosti jsou dané zejména nástrojem použitým při obrábění. Makro nerovnosti jsou dané přesností tvaru součásti. Makro nerovnosti se deformují pouze elasticky, zatímco u mikro nerovností dochází k plastickým deformacím. Během několika prvních zatěžovacích cyklů dojde k plastické deformaci mikro nerovností a styková tuhost se zvýší, viz Obrázek 2-5. [1], [8]

Styková tuhost je závislá na [1], [8]:

- **Drsnosti ploch** – čím je nižší hodnota drsnosti, tím je vyšší hodnota tuhosti
- **Vzájemné předpětí ploch** – čím vyšší je předpětí, tím je vyšší tuhost
- **Velikosti ploch** - čím jsou plochy větší, tím hůře na sebe vzájemně doléhají a to z důvodu obtížnější přesné výroby rozměrných dílů
- **Počtu zatěžovacích cyklů** – čím více cyklů proběhlo, tím je styková tuhost vyšší





Obrázek 2-5: Nelineární průběh stykové tuhosti [8]

#### 2.4.4 Možné způsoby ovlivnění tuhosti stroje

Při návrhu stroje lze tuhost ovlivnit několika způsoby. Jsou to [1]:

1. **Geometrií součástí** - Geometrie součástí musí být volena vzhledem k předpokládanému druhu a velikosti zatížení.
2. **Uložením součástí** - U nosníku je ohybová tuhost vyjádřena vztahem, kde hodnota  $\alpha_n$  je závislá na typu uložení:

$$k = \frac{\alpha_n \cdot E \cdot J}{l^3} \quad (20)$$

$J$  – kvadratický moment průřezu [ $m^4$ ]

$l$  – délka nosníku [m]

$E$  – modul pružnosti [Pa]

$\alpha_n$  – konstanta dle uložení nosníku, (např.: nosník na dvou podporách zatížený silou uprostřed  $\alpha_n=48$ , oboustranně vetknutý nosník zatížený uprostřed  $\alpha_n=192$ ) [1]

Z porovnání hodnoty konstanty alfa pro oboustranně vetknutý nosník a nosník na dvou podporách je vliv uložení velmi patrný. Pro dosažení co nejvyšší tuhosti je třeba, aby se vzájemně spojované díly co nejlépe blížily uložení vetknutému. Z toho důvodu je vhodné pro spojování rámu volit předepnuté šroubové spoje doplněné o komponenty přenášející síly tvarem (kolíky, čepy, pera).

#### 3. Materiálem součástí

Hlavní materiálové charakteristiky zohledňované při návrhu stroje a volbě materiálu jsou z hlediska tuhosti:

**Modul pružnosti** – Materiál s vyšším modulem pružnosti má při stejném zatížení menší deformace.

**Poissonovo číslo** – Je převrácená hodnota Poissonovy konstanty, která je poměr relativního prodloužení k relativnímu zúžení při namáhání tahem. Pro izotropní materiály je nezávislé na směru zatížení.

Z hlediska návrhu strojních částí je třeba zohledňovat mnohem více parametrů pro splnění požadovaných vlastností. Mezi tyto parametry patří:

- Mez pevnosti, mez kluzu, mez únavy
- Hustota materiál
- Součinitel tření
- Tvrdost povrchu
- Tlumící vlastnosti materiálu (při dynamickém namáhání)
- Součinitel délkové (objemové) roztažnosti
- Měrná tepelná kapacita
- Součinitel tepelné vodivosti
- Magnetismus (elektromagnetická indukce)

## 2.5 Teplotní stálost (odolnost) – Sdílení tepla

Vzhledem k faktu, že lisy jsou tepelně zatěžovány z důvodu technologických požadavků, např.: vysoká teplota vyhřáté formy, je nutné porozumět základním zákonitostem z oblasti sdílení tepla. Tato kapitola má za cíl shrnout základní teorii spojenou s řešením a vyhodnocením úloh sdílení tepla řešených v kapitole 3.5.

Sdílení tepla se uskutečňuje třemi základními způsoby [9]:

### 1. Vedením

- V tuhých tělesech
- V nepohybujících se tekutinách

### 2. Prouděním

- Přirozeně za působení vlivu změny hustoty a Archimedova zákona
- Nuceně

### 3. Sáláním – Elektromagnetické vlnění

- Viditelné záření  $0,4 \div 0,8 \mu\text{m}$
- Infračervené záření  $0,8 \div 10 \mu\text{m}$
- Tepelné záření  $10 \div 340 \mu\text{m}$

#### 2.5.1 Základní pojmy

Teplotní pole je skalární pole, které každému bodu ve vyšetřované oblasti přiřadí teplotu (v MKP výpočtech každému uzlu).

Tepelný tok je množství tepla, které projde jednotkovou plocho kolmo na směr šíření za jednotku času. [9]

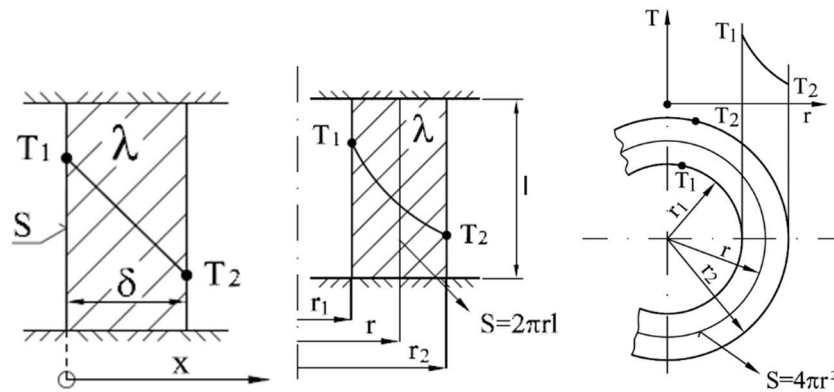
$$q = -\lambda \text{grad}(T) \quad (21)$$

$q$  – tepelný tok [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

$\lambda$  – součinitel tepelné vodivosti [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ], součinitel tepelné vodivosti je zpravidla závislý na teplotě

#### 2.5.2 Stacionární vedení tepla pro jednoduché případy geometrií

Předpokladem je, že na vnější i vnitřní stěně jsou konstantní teploty. Jsou uvedeny příklady pro rovinnou stěnu, válcovou stěnu a kulovou stěnu. Tyto případy jsou zakresleny viz Obrázek 2-6. [9]



Obrázek 2-6: Průběh teplot - rovinná stěna, válcová stěna, kulová stěna [9]

Pro rovinnou stěnu:

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{dT}{dx} \quad (22)$$

$$\dot{Q} = S \cdot \frac{\lambda}{\delta} \cdot (T_1 - T_2) \quad (23)$$

Pro válcovou stěnu:

$$\dot{Q} = 2 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (24)$$

Pro kulovou stěnu:

$$\dot{Q} = 4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l \cdot \frac{(T_1 - T_2)}{\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}} \quad (25)$$

$\dot{Q}$  – průtok tepla [W]

$T_1$  – teplota stěny [K]

$T_2$  – teplota stěny [K]

$r_1$  – vnitřní poloměr [m]

$r_2$  – vnější poloměr [m]

$\delta$  – tloušťka stěny [m]

$S$  – plocha stěny [m<sup>2</sup>]

$l$  – výška válce [m]

### 2.5.3 Přestup tepla

Přestup tepla probíhá ze stěny do okolní tekutiny. Přestup je závislý na teplotním rozdílu stěny a okolí, na látkových vlastnostech tekutiny a charakteru proudění tekutiny. Charakter proudění a látkové vlastnosti tekutiny zohledňuje součinitel přestupu tepla. [9]

Rovnice empirického Newtonova zákona:

$$\dot{Q} = S \cdot \alpha \cdot (T_1 - T_2) \quad (26)$$

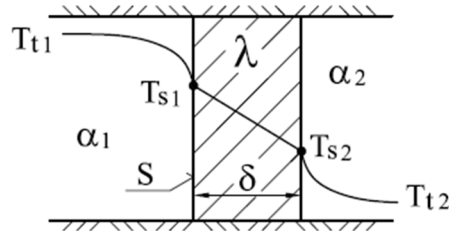
Rovnice pro tepelný tok, po vydělení Newtonova zákona plochou:

$$q = \alpha \cdot (T_1 - T_2) \quad (27)$$

$\alpha$  – součinitel přestupu tepla [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

#### 2.5.4 Prostup tepla

Prostup tepla je složen z přestupu z tekutiny do stěny, z vedení ve stěně a z přestupu ze stěny do druhé tekutiny. Situace je graficky znázorněna viz Obrázek 2-7. [9]



Obrázek 2-7: Prostup tepla rovinnou stěnou – průběh teplot [9]

Rovnice pro přestup – vedení – přestup s parametry dle obrázku:

$$\dot{Q} = S \cdot \alpha_1 \cdot (T_{t1} - T_{s1}) \quad (28)$$

$$\dot{Q} = S \cdot \frac{\lambda}{\delta} \cdot (T_{s1} - T_{s2}) \quad (29)$$

$$\dot{Q} = S \cdot \alpha_2 \cdot (T_{s2} - T_{t2}) \quad (30)$$

Rovnice pro průtok tepla:

$$\dot{Q} = S \cdot \frac{(T_{t1} - T_{t2})}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (31)$$

Při zavedení součinitele prostupu tepla „ $k$ “ lze rovnice dále zjednodušit.

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (32)$$

Tvar rovnice se zjednodušením součinitele prostupu tepla:

$$\dot{Q} = S \cdot k \cdot (T_{t1} - T_{t2}) \quad (33)$$

#### 2.5.5 Přenos tepla sáláním

Teplo je přenášeno elektromagnetickým vlněním s různou délkou. Teplo, které dopadne na těleso, je pohlcováno (absorbováno), propuštěno (diatermie) a odráženo (reflexe). Dle zákona o zachování energie platí rovnice [9]:

$$Q_O = Q_A + Q_D + Q_R \quad (34)$$

$Q_O$  – teplo dopadající na těleso

$Q_A$  – teplo pohlcené tělesem

$Q_D$  – teplo propuštěné tělesem

$Q_R$  – teplo odražené tělesem

Technické výpočty přenosu tepla sáláním používají Stefan-Bolzmanova zákona:

$$q_s = \varepsilon_s \cdot c_0 \cdot T^4 \quad (35)$$

$q_s$  – Intenzita záření [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

$\varepsilon_s$  – poměrná sálavost [1]

$T$  – teplota vyzařujícího tělesa [K]

$c_0$  – Stefan-Bolzmanova konstanta  $5,676 \text{ [W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}]$

## 2.6 Úvod do oblasti lisů pro výrobu a akustických a interiérových dílů pro automobilový průmysl

### 2.6.1 Akustické a pohledové díly

Akustické a pohledové díly se nacházejí v osobních automobilech, užitkových vozech, tahačích a dalších typech vozů. Díly se nacházejí v oblasti zavazadlového prostoru, oblasti interiéru vozu, exteriéru a v oblasti pohonné jednotky. Obrázek 2-8 ilustruje, kde se takovéto díly v osobním voze nacházejí. Díly jsou vyráběny různými metodami, např. lisováním, pinčováním nebo pěnováním. [10], [11]

Lisovaný díl se před vložením do nástroje předejde, a tím se zvyšuje jeho plasticita a je snížen nárok na výhřevnost formy a lisovací síly (V některých případech není polotovár před vložením do lisovacího nástroje předežíván). Poté je ohřátý polotovar vložen do nástroje a zde získá požadovaný tvar a mechanické vlastnosti. Nakonec je díl oříznut vodním paprskem. Proces lisování znázorňuje Obrázek 2-9. [11]

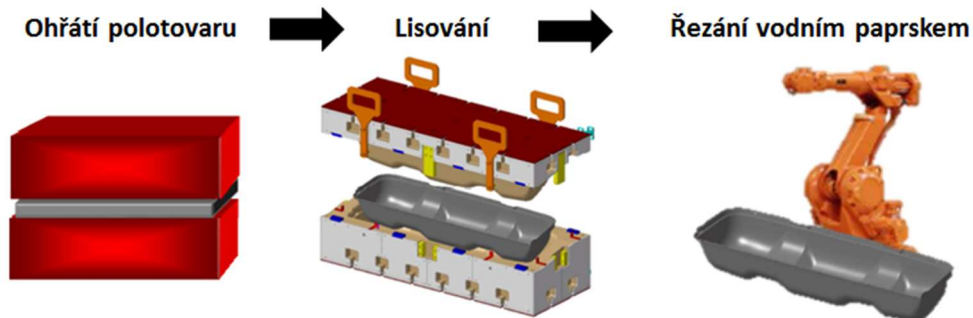
U pinčovaného dílu je polotovar slisován do požadovaného tvaru a zároveň je useknut pinčovací hranou na požadovaný tvar. Pinčování probíhá za vysoké teploty, která by poškodila pohledovou stranu dílu. Proto je výsledný pohledový povrch na díl nalepen. Tento proces se nazývá kašírování. Nakonec je díl oříznut do požadovaného tvaru vodním paprskem. Výroba dílu pinčováním viz Obrázek 2-10. [10]

Díly vyráběné pěnováním se vyrábí vstříknutím pěny vtokovými kanály do dutiny formy, která má tvar požadovaného dílu. Obvykle bývá dutina před vstříkem vyložena PUR fólií, která ve výsledku tvoří vnější povrch dílu. Pak následuje ohřev formy s vytvrzením pěny. Po vyjmutí dílu z formy je díl očištěn od vtokových kanálů pěny i přesahů povrchové fólie a případných přetoků. [11]

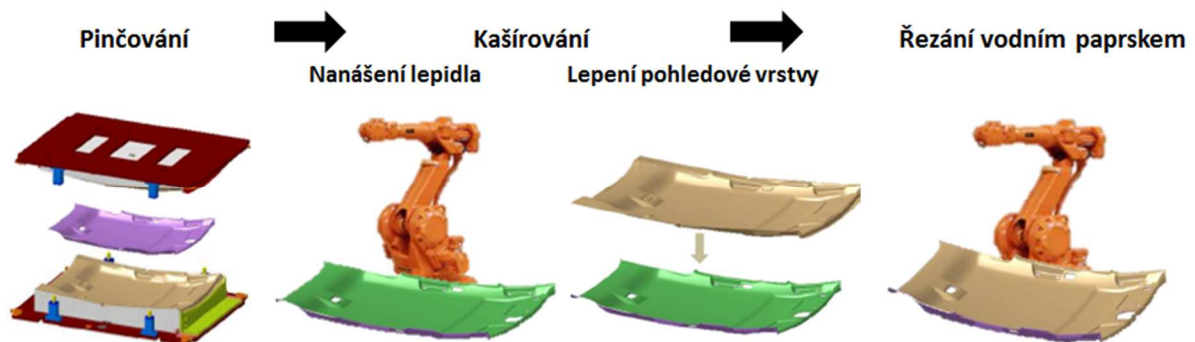
Díly se dají dělit na akustické a pohledové. Akustické díly mají za úkol snížení hluků a vibrací z motoru, podvozku a vnějšího okolí. Dále snižují tepelné vlivy od motoru a vnějšího prostředí. Akustické díly na rozdíl od pohledových dílů nejsou normálně vidět. Jejich hlavní odlišností od pohledových dílů je v použitém materiálu a ve vrstvení. Pohledový díl je obvykle díl, který je viditelný z vnitřní části vozu. U pohledových dílů je kladen větší důraz na estetiku a komfort. [10], [11]



Obrázek 2-8: Umístění akustických a pohledových dílů v osobním voze [12]



Obrázek 2-9: Postup výroby dílu lisováním [11]



Obrázek 2-10: Výroba dílu pinčováním [10]

## 2.6.2 Materiály

Materiálové složení dílů se odvíjí od požadovaných vlastností. Základem dílů jsou většinou netkané textilie, které jsou vyrobené z textilních a syntetických vláken. Dále se používají skelná vlákna, hliníkové folie, pěny a vytvrzovadla. Hliníkové folie se používají z důvodu lokálního teplotního odstínění. [10], [11]

Používané typy materiálů:

### 1) Textilní tkaniny

- Bavlina
- Syntetické
- Termoplastické
- Fenolová pryskyřice

**2) Plasty vyztužené karbonovými vlákny**

**3) Termoplasty**

- ABS
- PP
- PET
- PA

**4) Polyuretanové pěny**

- Řezané pěny
- Za tepla tvarované pěny
- Viskoelastické pěny

**5) Kombinace**

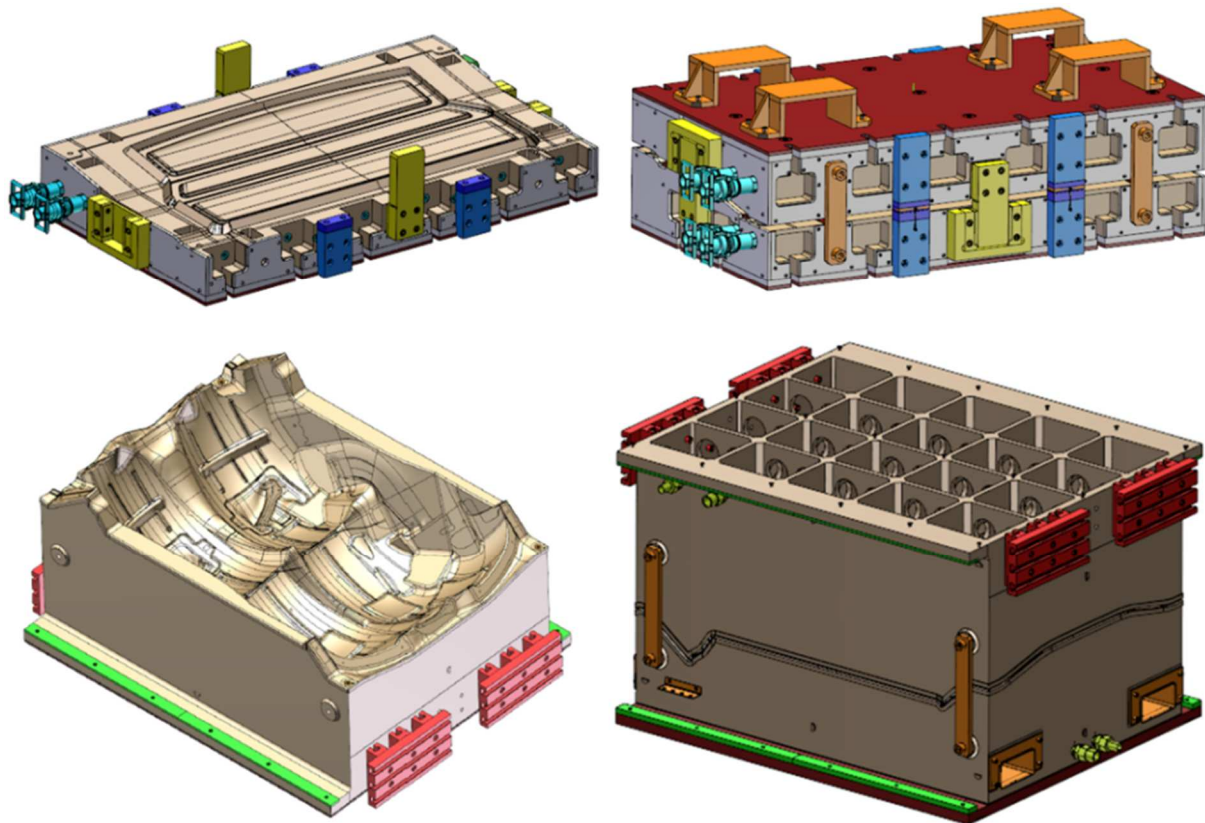
- Fleece / Fleece
- Fleece / PUR pěna
- Fleece / Termoplasty
- Fleece / PUR pěna / Termoplasty
- ...



Obrázek 2-11: Příklad vzhledu části lisovaného dílu z tkaniny PE/PET

### 2.6.3 Nástroje

Nástroj je obvykle tvořen dvěma základními díly, a to horní a spodní částí, jejichž tvar je definovaný tvarem lisovaného dílu. Nástroje se vyrábějí jako kované nebo válcované bloky z plného materiálu nebo jako odlitky. Bloky z plného materiálu jsou frézovány do požadovaného tvaru. Odlitky mají obvykle vnitřní odlehčovací žebrování a na funkčních plochách je odlitá dutina přibližného tvaru výslednému výrobku. Bloky mohou být vyrobeny například z nástrojové oceli, odlitky se vyrábějí obvykle ze slitin hliníku. Nástroje mohou mít z hlediska technologie temperační funkci. Mohou díl ochlazovat, ohřívat, případně udržovat jeho teplotu. Pro zajištění temperace nástroje jsou v blocích vrtané temperační okruhy, u odlitků se zalévají do odlitku trubky, které kopírují tvarovou plochu. Obrázek 2-12 zobrazuje příklady možného provedení nástroje vyrobeného z bloku a nástroje vyrobeného z odlitku. [13], [14]



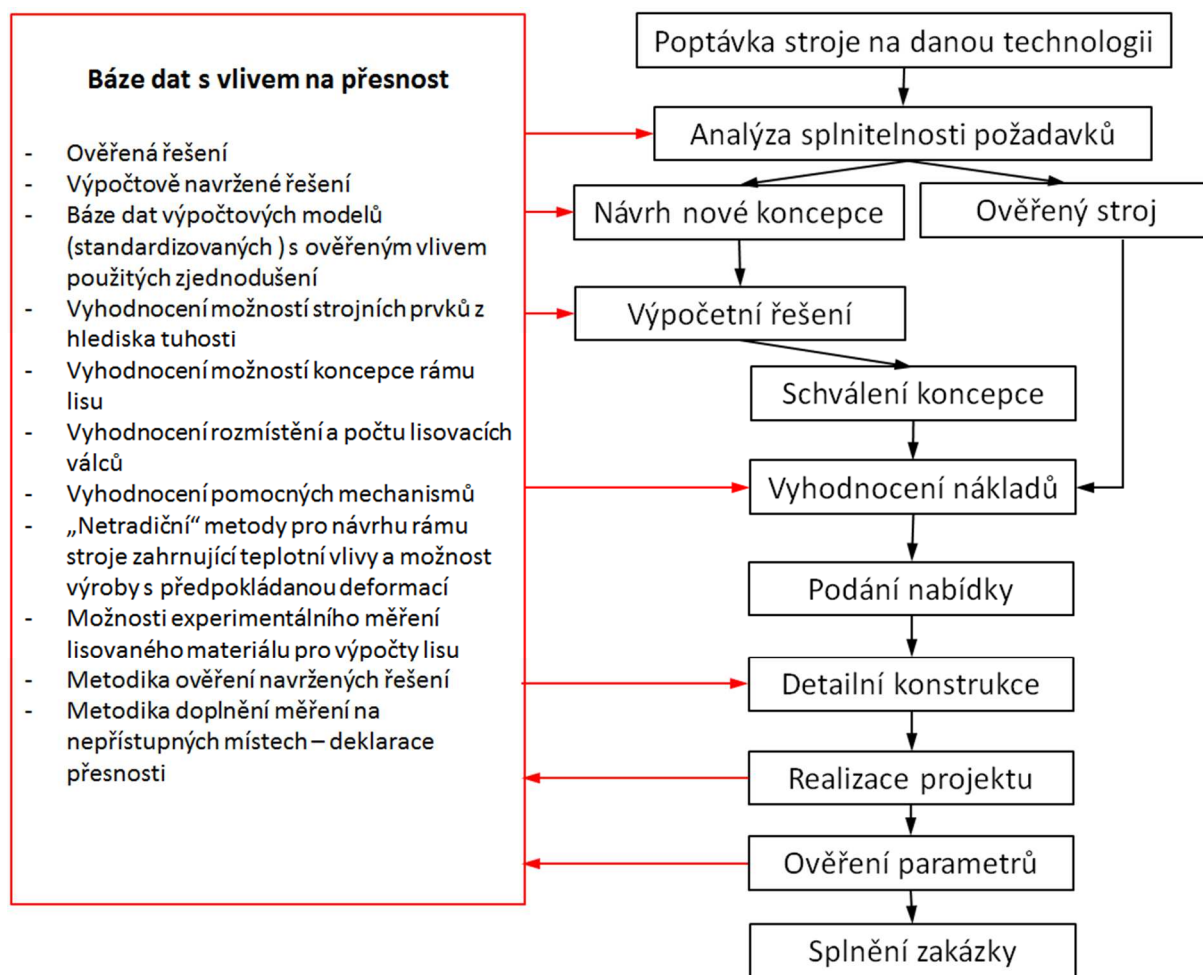
Obrázek 2-12: Nástroj vyrobený z bloku (nahore), nástroj vyrobený z odlitku (dole) [15]



### 3 Vlastní řešení disertační práce

Řešené typy lisů v dané oblasti byly vybrány tak, aby u nich byla vysoká rozmanitost použitých konstrukčních prvků a způsobů zatížení. Souhrn výsledků následujících kapitol vytváří základní bázi dat a postupů, s kterými lze efektivně řešit návrh stroje dle požadovaných parametrů. Výsledky práce pomohou usnadnit rozhodování při návrhu koncepce lisu s ohledem na požadovanou přesnost stroje. Vzhledem k nutnosti ověření výsledků výpočtů bylo provedeno měření na skutečném lise. Z tohoto měření vyplynula metodika pro snížení (eliminaci) vlivu výrobních a montážních nepřesností na požadované výsledky měření a doplnění měřených parametrů na místech, kde není umožněno měřit.

Výsledná báze dat má vliv na přesnost stroje, jeho měření, výpočtovou analýzu, experimentální ověření a další. Oblasti rozsahu vlivu na jednotlivé procesy v průběhu zakázky stroje popisuje Obrázek 3-1.



Obrázek 3-1: Báze dat s vlivem na přesnost a její vliv na procesy v průběhu zakázky

Vzhledem k velkému množství druhů lisů s různými účely bylo zvoleno zaměření na lisy, které se používají v automobilovém průmyslu, kde je vysoká poptávka po těchto lisech daná častou změnou modelů automobilů a zvyšujícími se požadavky na přesnost. Byly zvoleny dva lisy pro lisování interiérových a akustických dílů a dále byl vybrán montážní lis pro lisování kroužku na náboj kola, který se používá v automatizovaných montážních linkách. Pro

demonstraci rozdílných parametrů byly lisy voleny v odstupňované řadě 30 kN, 1000 kN a 4000 kN.

Na každý z těchto lisů jsou kladeny odlišné požadavky a používají odlišnou technologii. V případě lisu 30 kN je proveden návrh konstrukce lisu s požadavkem na vyšší přesnost a je popsána jednoduchá metodika analýzy geometrie rámu s ohledem na výslednou tuhost. Tento způsob je snadno použitelný i v průmyslové praxi. Dále je proveden návrh aktivní regulace deformací rámu stroje.

U lisu 1000 kN jsou analyzovány možné konstrukční provedení rámu stroje s různými vedeními a umístěním lisovacích válců. Je stanoven vliv jednotlivých konstrukčních řešení. Pro účely výpočtů bylo provedeno experimentální měření parametrů tkaniny lisované za různých podmínek.

V případě lisu 4000 kN je řešeno teplotní ovlivnění rámu lisu a možné způsoby eliminace vlivu tepla na rám. Jsou též navrženy komplexní možnosti návrhu rámu lisu pro dosažení vysoké přesnosti. U tohoto lisu bylo též provedeno experimentální měření k ověření posunutí, jehož výstupem je i metodika pro doplnění výsledků z měření a možnosti zpracování měření.

### 3.1 Lis 30 kN

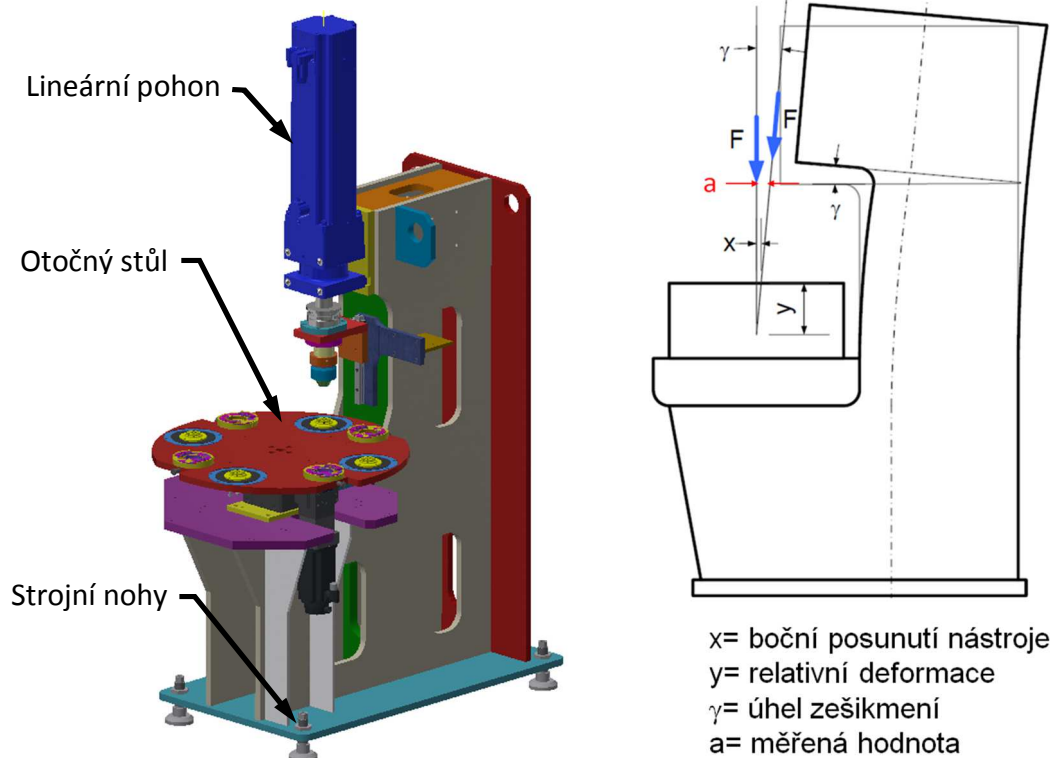
Jedná se jednorúčelový montážní lis pro lisování kroužku na náboj. Tento typ lisu se používá v automobilovém průmyslu na automatizovaných montážních linkách. Lis je vybaven otočným stolem se čtyřmi pozicemi: pro zakládání, pro indukční ohřev, pro lisování a pro odebrání. Díly jsou na stůl umísťovány manipulátory. Základní části lisu popisuje Obrázek 3-2. Tabulka 3 zařazuje lis dle konstrukce rámu.

Tabulka 3: Zařazení lisu dle konstrukce rámu

Otevřený C -rám	Uzavřený
Z jednoho kusu	Dělený
Předepjatý	Nepředepjatý
Horizontální	Vertikální
Sloupový	Stojanový

#### Základní parametry a požadavky na stroj:

Lisovací síla:	30 kN
Výška/šířka/hloubka:	2100/1075/750 mm
Zdvih:	130 mm
Bezpečnost:	bez přístupu personálu
Doba lisování:	max. 3 s
Zavážení materiálu:	Manipulátorem na otočný stůl
Maximální vyosení v měřeném bodě „a“, viz Obrázek 3-2:	0,02 mm
Teplota okolí:	20° - 30°C
Transport:	běžný transport



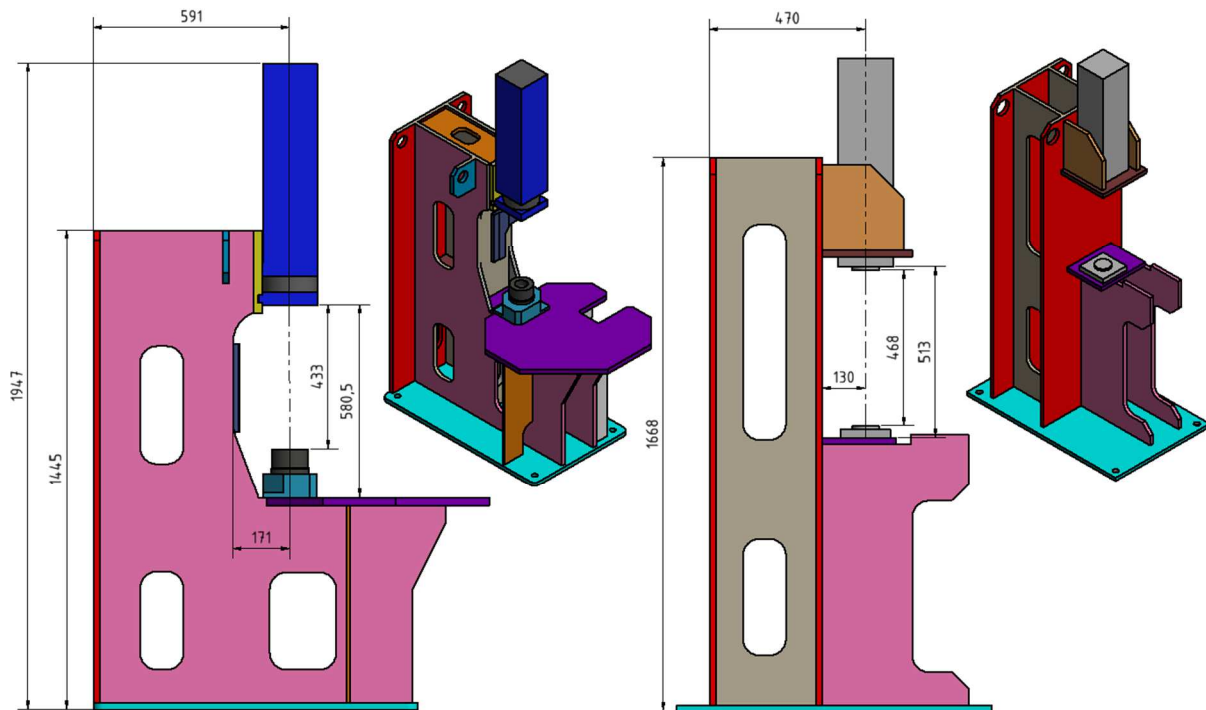
Obrázek 3-2: 3D Model lisu 30 kN (vlevo) a znázornění zešikmení osy lisování vlivem celkové deformace [1]

Výpočet byl proveden v MKP řešiči v programu Inventor, který je přizpůsoben pro běžné konstruktéry a nevyžaduje velké výpočtářské zkušenosti. Neumožňuje velké možnosti volby v nastavení, ve kterých by se nezkušený výpočtář neorientoval. Pro menší firmy je cenově velmi dobře dostupný. Cenový rozdíl vůči pokročilým výpočtovým programům jako je Abauqus CAE je enormní.

V tomto případě byla řešena úprava koncepce C rámu montážního lisu. Kritériem návrhu bylo dodržet předepsanou přesnost a umožnit doplnění dalších technologických prvků, které lis zpřesní nebo dovybaví.

Mezi doplněné vybavení patří: Otočný stůl s vysokou opakovatelnou přesností (0,01 mm) poháněný servopohonem, který je zástavbově vyšší než původní pneumatické řešení. Doplnění čtvrté polohy na otočný stůl, na kterou je přidán indukční ohřev lisovaného kroužku. To má za následek zvětšení otočného stolu. Nová zástavba zvětšila rameno momentu. Dále bylo doplněno spodní pneumatické středění náboje. Byla též provedena změna ukotvení lisovacího lineárního pohonu, která umožní jednodušší montáž a obrábění rámu lisu.

Na základě těchto změn byla provedena jednoduchá geometrická sub-optimalizace, ve které je zkoumán vliv parametrů geometrie rámu lisu na výslednou přesnost. U každého parametru byl vyhodnocován jeho přínos vzhledem k nárůstu hmotnosti rámu. Takovouto analýzu by měl být schopen provést běžný konstruktér se základní znalostí výpočtů.



Obrázek 3-3: Nově navržený rám (zleva) a původní varianta rámu

Na základě vyhodnocení parametrů zavedených do tabulky (viz. Tabulka 5) se vyberou parametry s nejlepšími výsledky, a zahrnou se do modelu a provede se další kolo výpočtů. Důležité je ověřit, zda změna jednotlivých parametrů se vzájemně „nevyruší“. I zdánlivě nepatrné změny geometrie mohou mít zásadní vliv na výslednou přesnost.

Pokročilejším řešením, které ovšem vyžaduje hlubší znalost výpočtového softwaru, je parametrická optimalizace, která na základě parametrického 3D modelu se zadaným rozsahem geometrických parametrů a požadovanými výsledky (posunutí, deformace, napětí atd.) vypočítá nejvhodnější konstrukční řešení.

Další možností je topologická optimalizace, která v zadaném objemu hledá ideální rozložení materiálu. U jednoduchých dílů lze programem vypočtenou geometrii relativně snadno převzít a implementovat do výsledného tvaru. U složitějšího dílu, jako je rám lisu, který musí dodržet mnoho technologických kritérií, je nutné na základě topologické optimalizace zpracovat technologicky proveditelný konstrukční návrh. Tento návrh je poté nutné podrobit parametrické optimalizaci viz předchozí odstavec.

Z hlediska časové náročnosti je první zmiňovaný přístup nejvýhodnější, což je v praktických případech, kdy jen nutné dodávat „Just in time“ velmi cenné. Obzvláště pokud se jedná o výrobu pouze jednoho kusu „malého“ lisu, u kterého hmotnostní úspora v řádu desítek až set kil nemůže převážet náklady na zaměstnance (výpočtáře/konstruktéra). Viz jednoduchý příklad níže, který vyhodnocuje bod zvratu výhodnosti.

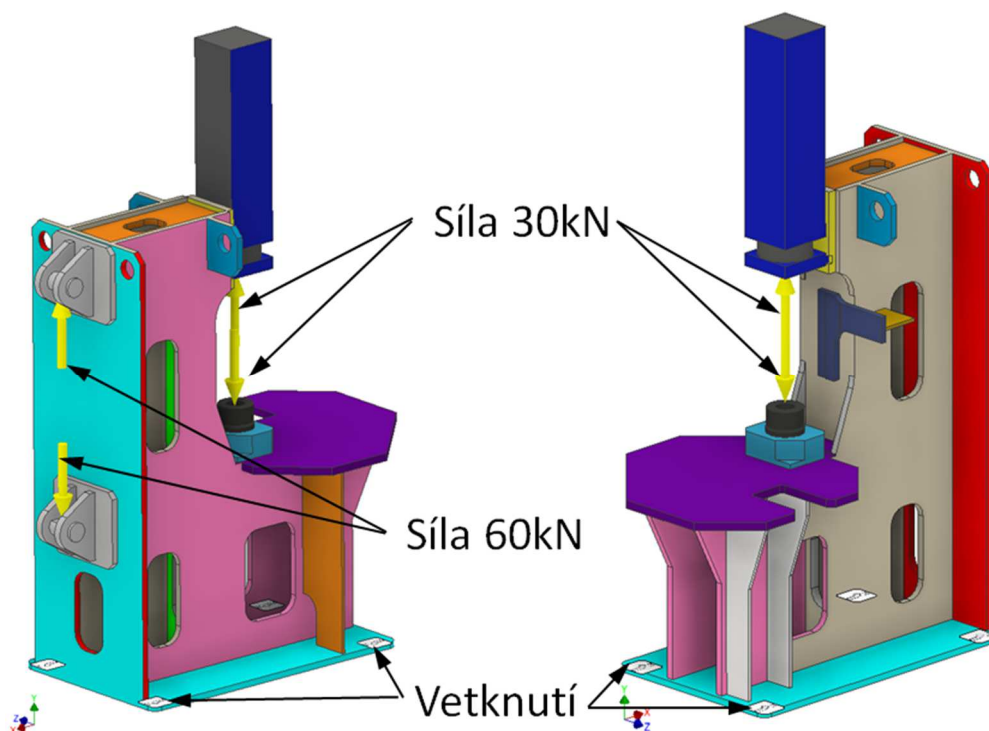
Cena za kg konstrukční oceli běžně používané na rámy strojů (např.: S355) je přibližně 30 Kč. Jestliže bude činit úspora při použití komplexnější optimalizační metody 100 kg, tak úspora činí 3 000 Kč. Pokud se tedy jedná o kusovou výrobu malého lisu, tak je použití komplexních analýz, které mohou v nákladech stát 30 000 Kč a více, naprosto nevýhodné.

Dále je provedena analýza lisu s aktivní regulací hodnoty posunutí „a“ a úhlu zešikmení „ $\gamma$ “. Pro tuto analýzu je použit výsledný model lisu po geometrické sub-optimalizaci. Na tento

model jsou doplněny prvky pro připevnění hydraulického válce, který vyvozuje sílu vyrovnávající průhyby od lisovací síly.

### 3.1.1 Okrajové podmínky

Rám je k základu připevněn dutými stavitelnými strojními nohama. Strojní nohy umožňují pevné spojení se základem. Rám není geometricky symetrický, a tak nemohlo být použito zjednodušení se symetrií. V oblasti závitů pro strojní nohy je aplikována okrajová podmínka vetknutí. Lis je zatížen tlakem odpovídajícím lisovací síle 30 kN v ose lisování na horní a spodní dosedací ploše. V případě lisu s řízenou regulací průhybu je na zadní straně lisu na čepech pro vyrovnávací válec definována síla 60 kN viz Obrázek 3-4.



Obrázek 3-4: Okrajové podmínky: zleva lis s regulací průhybu, zprava lis bez regulace

### 3.1.2 Materiálové vlastnosti

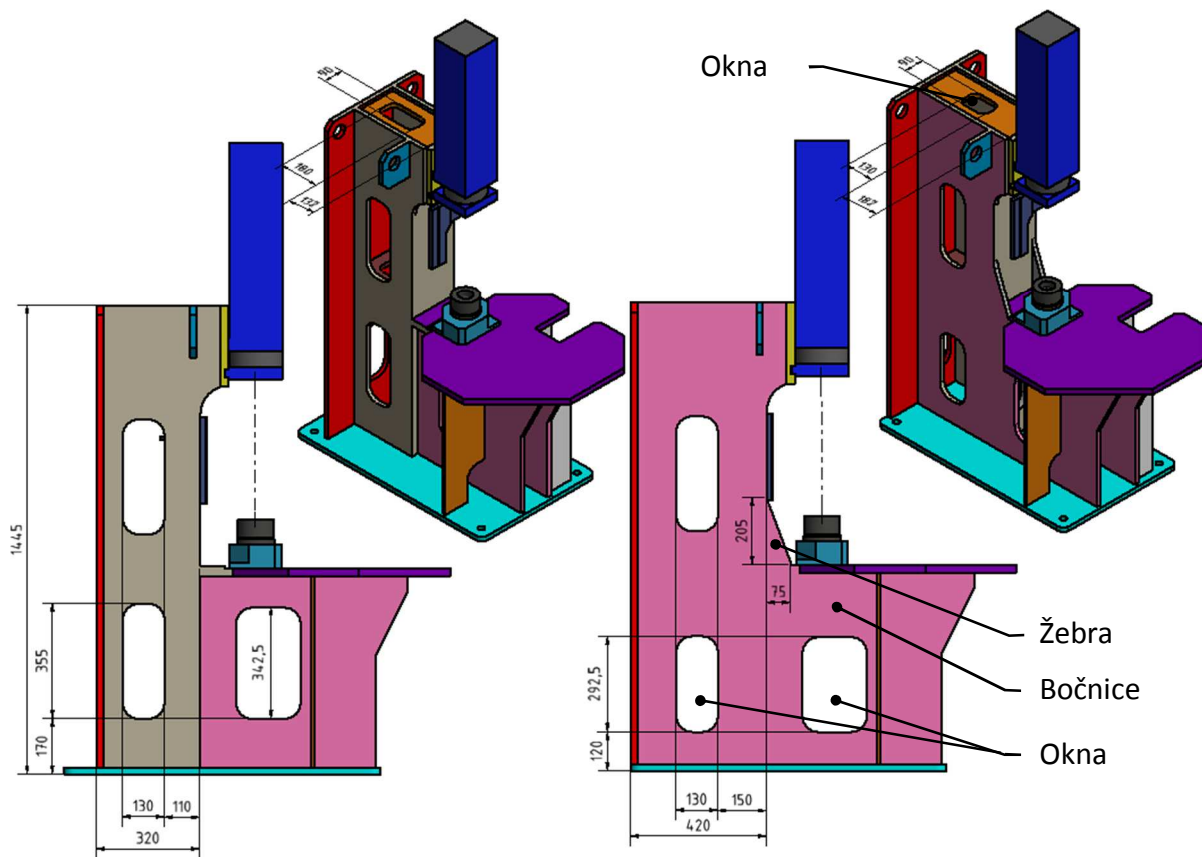
Fyzikální vlastnosti materiálu viz Tabulka 4. Rám je svařován z běžné konstrukční oceli.

Tabulka 4: Materiálové vlastnosti

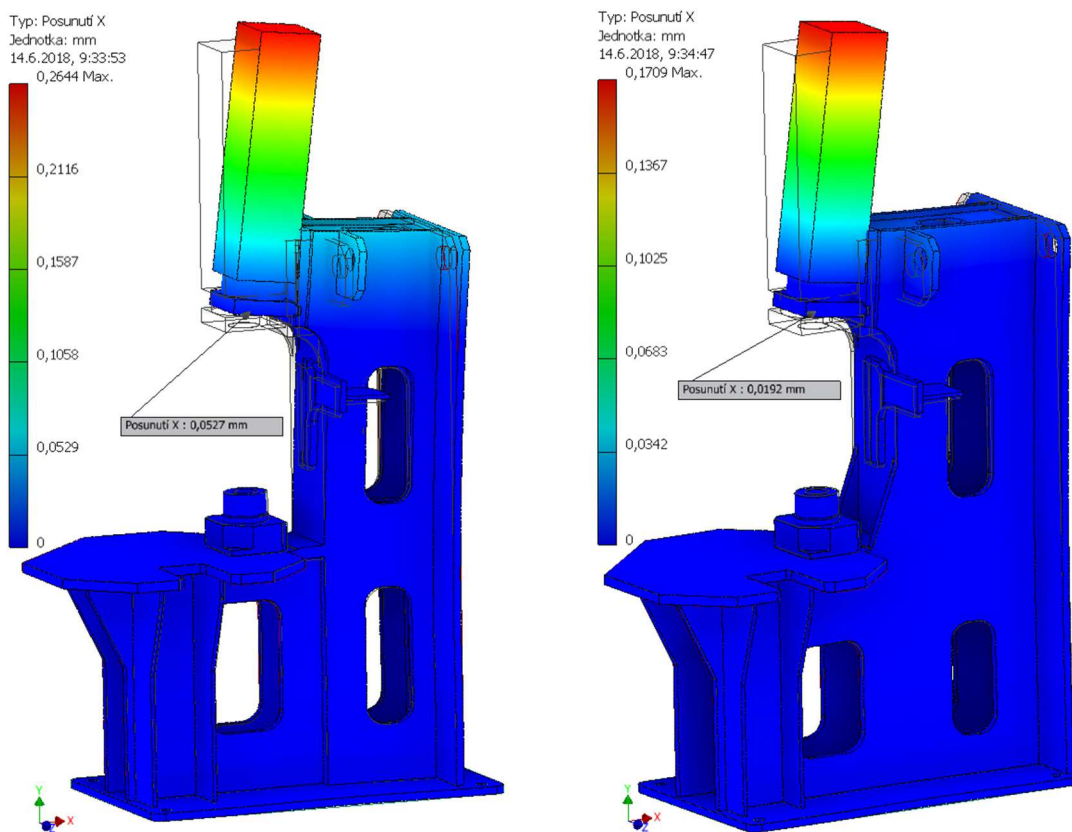
	Ocel - S355
Poissonovo číslo [-]	0.3
Modul pružnosti [Pa]	$210 \times 10^9$
Hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	7800

### 3.1.3 Výsledky výpočtů

Celkově bylo provedeno 18 výpočtů zkoumajících vlivy provedených úprav a výsledných variant. První navržená varianta rámu lisu viz Obrázek 3-5 se jevila jako příliš poddajná a nespĺňovala kritérium požadované tuhosti.



Obrázek 3-5: První (posunutí „a“=0,053 mm) a finální varianta rámu lisu (posunutí „a“=0,019 mm)



Obrázek 3-6: Posunutí v ose x [mm] první a finální varianty, se zobrazením měřené hodnoty „a“

Tabulka 5: Přehled analyzovaných parametrů a vyhodnocení jejich vlivu

Analyzovaný parametr	Změna hmotnosti oproti původnímu modelu [kg]	Rozdíl v naměřené přesnosti vůči výchozímu návrhu [mm]	Poměr hmotnost/vliv na přesnost [kg/mm]	Zahrnutí úpravy do výsledného modelu
Tloušťka stěny bočnice +5mm	+62	0,01	6200	NE
Délka bočnice +100mm	+44	0,017	2588	ANO
Tloušťka +5 a délka bočnice +100 mm	+118	0,024	4917	NE
Tloušťka +10 a délka bočnice +100 mm	+180	0,032	5625	NE
Doplnění žeber na bočnice	+3	0,004	750	ANO
Doplnění přední desky	+63	0,012	5250	NE
Změna polohy a rozměru otvoru v příčných vnitřních žebrech	+1	0,015	67	ANO
Rozměr hlavních oken v rámu -50mm + změna polohy	+5	0,015	333	ANO

### 3.1.4 Zhodnocení výsledků geometrické sub-optimalizace

- Celkový nárůst hmotnosti: 53kg
- Celkové snížení posuvů o 270% na požadovanou hodnotu „a“ nižší než 0,02mm

Z provedené suboptimalizace plyne, že i zdánlivě malá úprava geometrie může mít zásadní vliv na výslednou přesnost lisu. V tomto případě tuhost zásadně ovlivňuje poloha a rozměr oken v rámu lisu. Za povšimnutí stojí i doplnění žeber, které mají významný vliv.

Čas na zpracování geometrické sub-optimalizace činil 10 hodin, ve kterých je zahrnut čas na úpravy geometrie modelu, nastavení výpočtů a výpočtové časy jednotlivých variant.

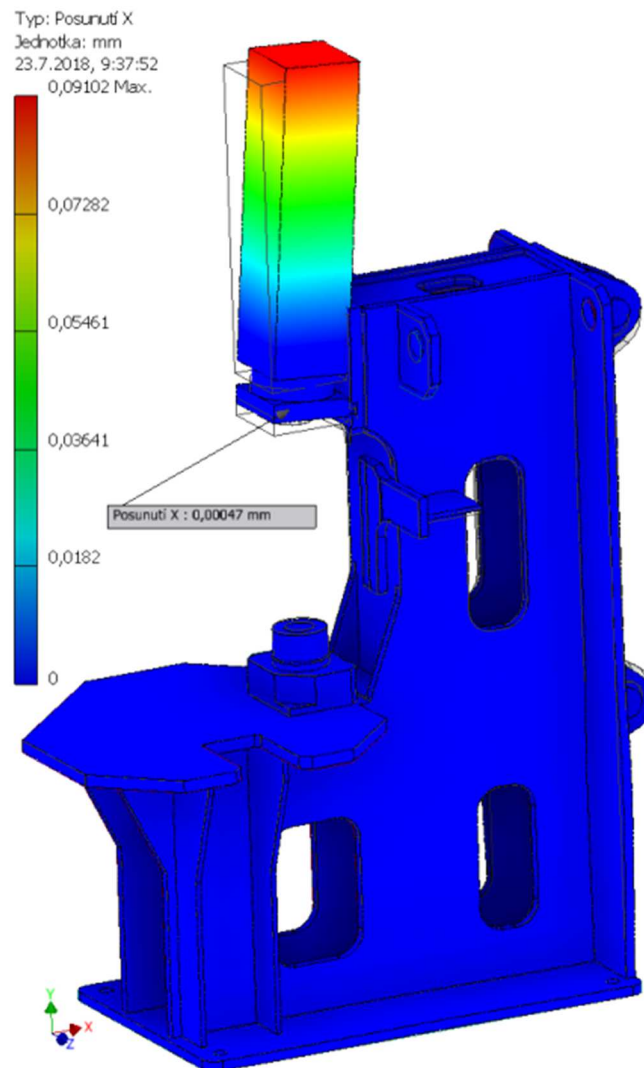
Tento případ též ilustruje, že je tvorba složitého parametrického optimalizačního modelu v případě kusové výroby značně časově i nákladově nevýhodná. Geometrická sub-optimalizace je uvedena jako příklad možného rychlého řešení, které je v dnešní době často velmi žádoucí.

### 3.1.5 Aktivní regulace deformací rámu stroje

Pro aktivní regulaci deformací v případě tohoto rámu stroje bylo navrženo umístění prvku vyvozující sílu na zadní stěně lisu, která vyrovnává deformace v ose x. Kromě zlepšení hodnoty „a“, je regulován i úhel zešikmení „y“. Jako prvek vyvozující sílu může být použit například hydraulický válec nebo jiný zdroj regulovatelné síly.

Výpočet je nastaven tak, aby hodnota  $a \approx 0$  mm. Vypočtená hodnota je  $a = 0,0005$  mm. Vzhledem k menšímu rameni, na kterém působí regulační člen, je potřebná síla na vyrovnání deformací 60 000 N. Úhel zešikmení je vůči výsledné variantě bez regulace ca 3,4 krát menší. Posunutí v ose x viz Obrázek 3-7. Výsledky ukazují, že lze dosáhnout razantního zvýšení přesnosti lisu. Tento způsob úpravy lisu s doplněním regulace je možné použít i pro zařízení, která jsou již v provozu, a vznikne u nich požadavek na vyšší přesnost. Pro dosažení stejné

přesnosti jako u regulované varianty lisu u lisu bez regulace by byla konstrukce lisu výrazně robustnější.



Obrázek 3-7: Posunutí v ose x [mm] u varianty lisu s aktivní regulací deformací rámu stroje



## 3.2 Lis 1000 kN

Tento typ lisu se používá pro výrobu interiérových a akustických dílů do osobních a užitkových vozidel. V praxi se využívá několik koncepcí lisů, které používají různé komponenty vedení, různé rozmístění lisovacích válců a odlišné typy konstrukce rámu. Tyto a nově navržené méně konvenční kombinace jsou shrnuty do morfologické matice viz Tabulka 7. Vybrané varianty z morfologické matice jsou řešeny metodou konečných prvků. Jednotlivé varianty jsou posuzovány z pohledu vlivu na tuhost, resp. rovinnost upínacích desek lisu.

Cílem této kapitoly je provést komplexní vyhodnocení možností pro konstrukční návrh tohoto typu lisu. A to jak z hlediska použitých komponent, tak i možností konstrukce rámu lisu, rozmístění a počtu lisovacích válců atd.

Je proveden výpočet a vyhodnocení pro centrické zatížení. Vzhledem k symetrii úlohy je řešena pouze jedna čtvrtina lisu, což přináší nemalou časovou úsporu výpočetního času. Též je provedeno vyhodnocení s boční silou od nástroje řešené na jedné polovině lisu (pro případy kdy může v nástroji převládat jeden směr výsledné horizontální síly). Mezi další vlivy mohou být zahrnuty excentrické síly, které mohou být způsobeny nepřesným umístěním nástroje do osy lisu, a nástroj může mít nesymetrickou formovací část s odlehčeními způsobující excentricitu síly. Při vývoji nástrojů je obvykle snaha, aby byly výsledné boční síly a excentricita co nejnižší, ideálně žádné. Avšak některé díly se složitou geometrií nebo převládajícím směrem horizontálních sil to zcela neumožní, a tak musí tyto síly, v případě nástrojů bez vedení, zachytit rám lisu (a lisovaný polotovár). Boční síla z nástroje nesmí být vyšší než třecí síla mezi nástrojem a upínací deskou. Ta je dána velikostí předepnutí upínacích šroubů nástroje, lisovací silou a součinitelem tření mezi upínací deskou a nástroje.

Tabulka 6: Zařazení lisu dle konstrukce rámu

Otevřený	Uzavřený
Z jednoho kusu	Dělený
Předepjatý	Nepředepjatý
Horizontální	Vertikální
Sloupový	Stojanový

### 3.2.1 Technologie

Tkanina, která je lisována ve stroji, je nejdříve ohřáta na 200°C v kontaktní peci. Kontaktní desky pece jsou vyhřívány na přibližně 230°C. Materiál se v daném čase musí na potřebnou teplotu ohřát v celém svém objemu. Teplota 200°C v tomto konkrétním případě je nutná z důvodu, že tkanina obsahuje termoplastická vlákna, která po zalisování a vychladnutí pomáhají dílu dosáhnout potřebného tvaru a mechanických vlastností.

Kontaktní pec je ve výrobní lince umístěna hned před lisem, do kterého je ohřátý materiál přemístěn manipulátory (transfery). Následuje operace lisování v nástroji.

Při výměně nástroje za jiný se provede zkušební výlisek nového dílu. U tohoto dílu je zkontrolována jeho geometrická přesnost. V případě, že díl má špatnou tloušťku, vymění se dorazové destičky pro provedení korekce. Každý nástroj může mít nepatrně jinou výšku nebo geometrii, případně je v něm lisována jiná tloušťka materiálu. Dorazy se zpravidla umísťují co

nejblíže k nástroji. To eliminuje deformace stolu lisu. V tomto případě je ovšem nutné, aby dorazy byly umístěny poměrně daleko od nástroje, a to z důvodu automatického zakládání tkaniny a prostoru nutného pro zástavbu manipulátoru.

### 3.2.2 Základní požadavky na návrh

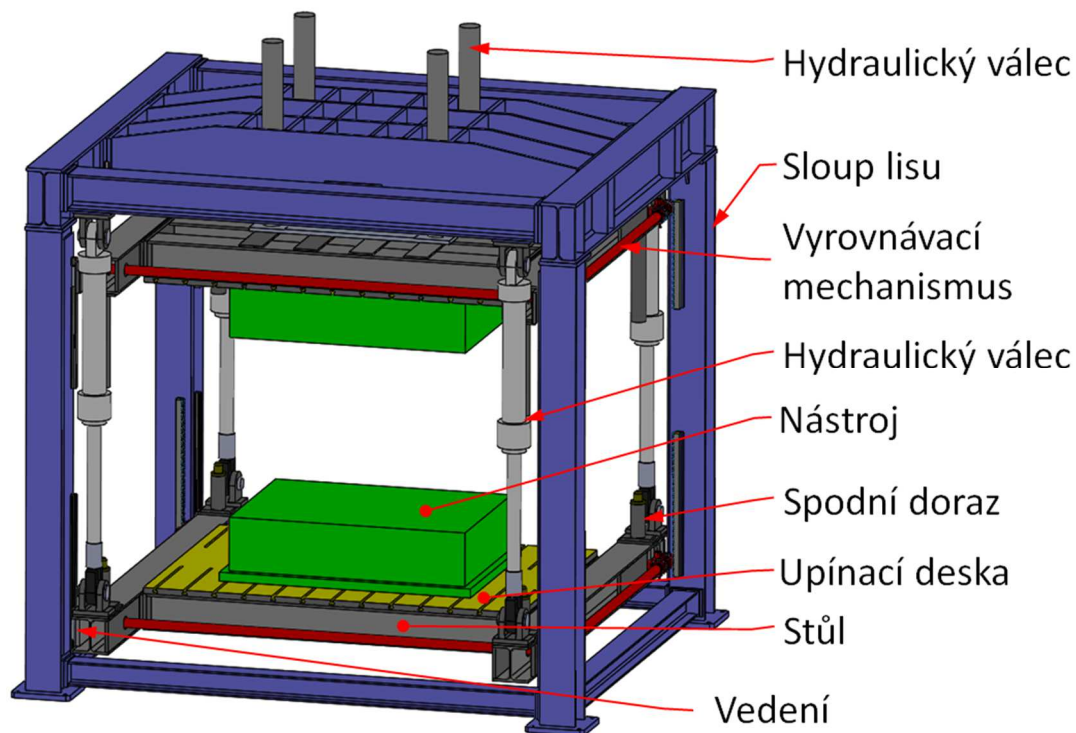
Návrh konstrukčního řešení hydraulického lisu pro použití v automatické lince na výrobu textilních dílů s provedení analýzy možných řešení s ohledem na:

- Funkční integraci stroje do automatické linky
- Splnění požadovaných technických parametrů stroje
- Nákladovost výroby, montáže a provozu stroje
- Bezpečnost provozu
- Spolehlivost a životnost

#### Základní technické parametry a požadavky na stroj:

Zavírací síla hydraulicky:	1000 kN
Zdvih dolní stůl, nezávislý pohon:	1000 mm
Zdvih horní stůl, nezávislý pohon	800 mm
Maximální světlost:	2600 mm
Velikost upínací desky:	2300 x 3200 mm
Způsob upínání:	T-drážky
Min. světlost mezi sloupy ve směru linky:	3500 mm
Min. světlost mezi sloupy kolmo na směr linky:	3500 mm
Bezpečnost:	bez přístupu personálu
Doba zavírání lisu:	max. 3 s, rychloposuv + lisování 50 mm/s
Doba otevření lisu:	max. 4 s
Výška nástroje:	min. 1050 mm
Zavážení materiálu nad dolní deskou v nejnižší poloze:	1100 mm
Hmotnost nástroje:	max. 6000 kg
Hmotnost horního nástroje:	max. 3000 kg
Paralelita bez zatížení:	0,5mm / 1000 mm
Průhyb při obsazení 2/3 upínací plochy:	max. 1 mm
Nastavení zavírací mezery pomocí externích dorazů:	3-6 mm, krok 0,5 mm
Výměna nástroje:	na hydraulických pojezdech
Teplota okolí:	20°- 40 °C
Maximální stavební výška:	6600 mm
Transport:	demontovatelné pro běžný transport

Obrázek 3-8 popisuje jednu variantu modelu tohoto typu hydraulického lisu. Rám lisu je svařenec, rozebíratelný na celky, které je možné dopravovat kamionovou dopravou. Lis je opatřen vyrovnávacím mechanismem se zkrutnými tyčemi. Upínací desky jsou opatřeny T drážkami pro připevnění nástrojů.



Obrázek 3-8: Lis 1000kN popis jednotlivých částí stroje

### 3.2.3 Morfologická matice stroje

Tabulka 7: Morfologické matice konstrukce stroje

Parametr	Technické řešení					
<b>Vedení stůlů</b>	Kuličkové lineární vedení	Vodící kladky	Kluzné plochy rovinné	Kruhové sloupy / Vodící tyče	Kombinace rovinného a kruhového vedení	„Bez vedení“
<b>Počet a umístění válců horního stolu</b>	1 válec – nad formou	2 válce – nad formou	4 válce – nad formou	4 válce – v rozích stolu		
<b>Počet a umístění válců spodního stolu</b>	1 válec – pod formou	2 válce – pod formou	4 válce – pod formou	4 válce – v rozích stolu		
<b>Vyrovnávání pohybu</b>	Hydraulicky (s odměřováním polohy)	Vyrovnávací mechanismus v jedné ose	Vyrovnávací mechanismus ve dvou osách			
<b>Rám stroje</b>	I profily	Vysoké a tlusté plechy	Skříňová konstrukce z plechů	Odlitek	Kombinace	
<b>Konstrukce stůlů</b>	I profily	Skříňová konstrukce	Odlitek	Kombinace		
<b>Konstrukce sloupů</b>	I profily	Skříňová konstrukce	Trubka	Tyčovina		
<b>Výměna nástroje</b>	Do boku	Po směru linky				

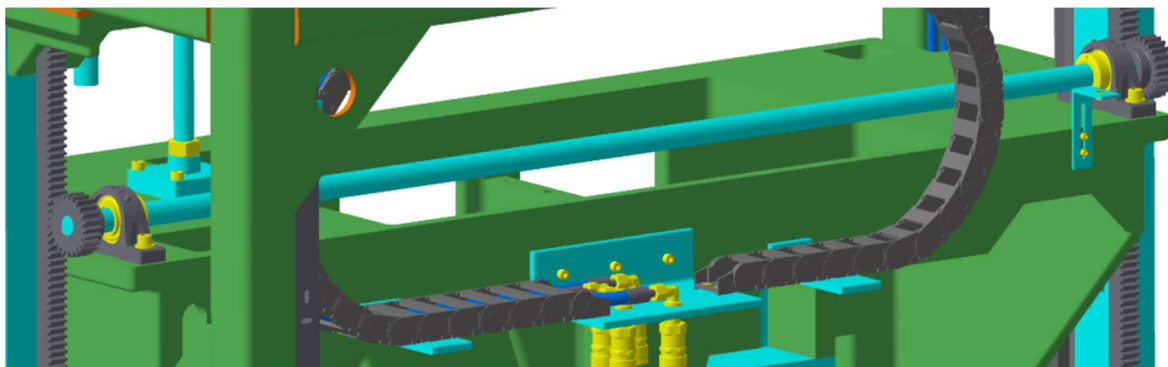
Prvky obsažené v morfologické matici jsou vysvětleny v dalších podkapitolách. Z výsledků výpočtové analýzy jednotlivých konstrukčních prvků v morfologické matici stroje viz Tabulka 7 vyplyne vliv na přesnost jednotlivých strojních prvků a koncepcí rámu stroje viz tabulky 9, 10 a 11. Tyto výsledky dávají přehled o tom, jakou koncepcí je možné použít pro požadovanou přesnost. Koncepce a prvky, které splňují přesnost, je poté nutné podrobit technickoekonomickému vyhodnocení a vybrat výslednou variantu.

### 3.2.4 Systémy pro vyrovnávání pohybu pohyblivé traverzy

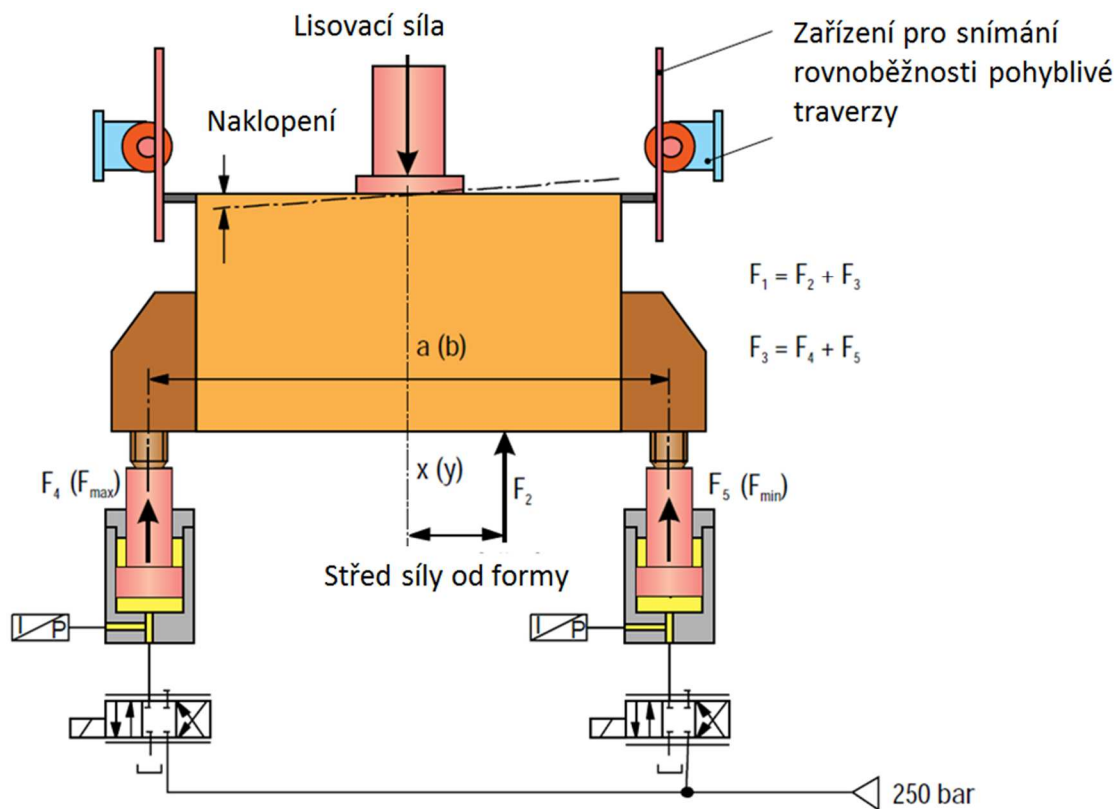
V praxi se používají dva základní systémy pro vyrovnávání pohybu traverzy. První z nich je mechanický se zkrutnými tyčemi viz Obrázek 3-9, druhý z nich je hydraulický viz Obrázek 3-10.

Mechanismus se zkrutnými tyčemi je obvykle uložen v ložiskových domcích připevněných k pohyblivé traverze. Cílem použití tohoto mechanismu je utlumení vibrací a rázů na dráze zdvihu nástroje, které mohou být způsobeny nevyrovnaností chodu hydraulických válců, naklápěním traverzy vlivem vůlí ve vedeních, či dalšími nepřesnostmi ovlivňující kinematický řetězec. Chod je vyrovnáván reakcí od krutu vyrovnávací tyče. K rámu lisu jsou připevněny hřebeny a po nich se „odvalují“ pastorky. Přínos vyrovnávacího mechanismu pro pohyblivé traverzy lisů je v poslední době v případě použití kvalitních předepnutých lineárních vedení zpochybňován.

Příklad s hydraulickým vyrovnáváním pohybu traverzy s jedním centrálně umístěným lisovacím válcem a dvěma postranními válci, které traverzu současně dorovnávají, je uveden viz Obrázek 3-10. Tento typ umožňuje vyrovnání „větších“ naklopení oproti mechanickému provedení se zkrutnými tyčemi, které by dosahovaly pro dosažení stejných výsledků enormních rozměrů. Nevýhodou řešení se třemi válci je vyrovnání náklonu pouze ve směru rozmístění válců. Boční náklon nelze řídit. Tuto nevýhodu odstraňuje použití minimálně 3 válců, obvykle 4 válců.



Obrázek 3-9: Detail vyrovnávacího mechanismu

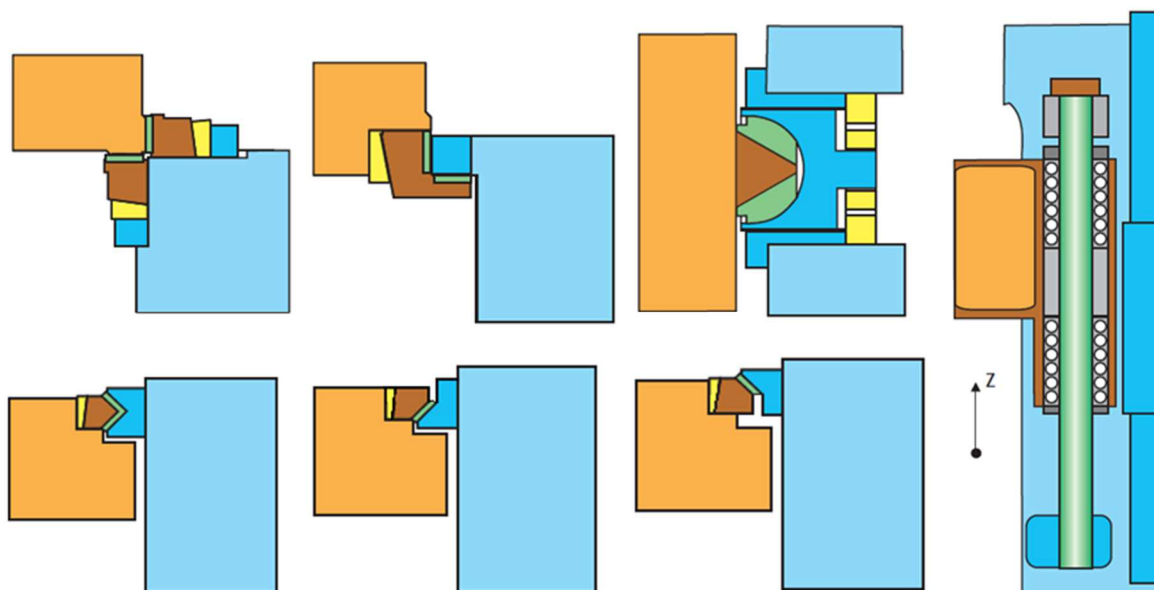


Obrázek 3-10: Příklad systému pro udržování rovnoběžnosti pohyblivé traverzy [16]

### 3.2.5 Vedení

#### Vedení plošné

Vedení lze rozdělit na čtyř, osmi a šestnácti plošné, dále je lze dělit na staticky určité a staticky neurčité. Obrázek 3-11 uvádí schémata možných konstrukčních provedení vedení použitelných v konstrukci lisu.

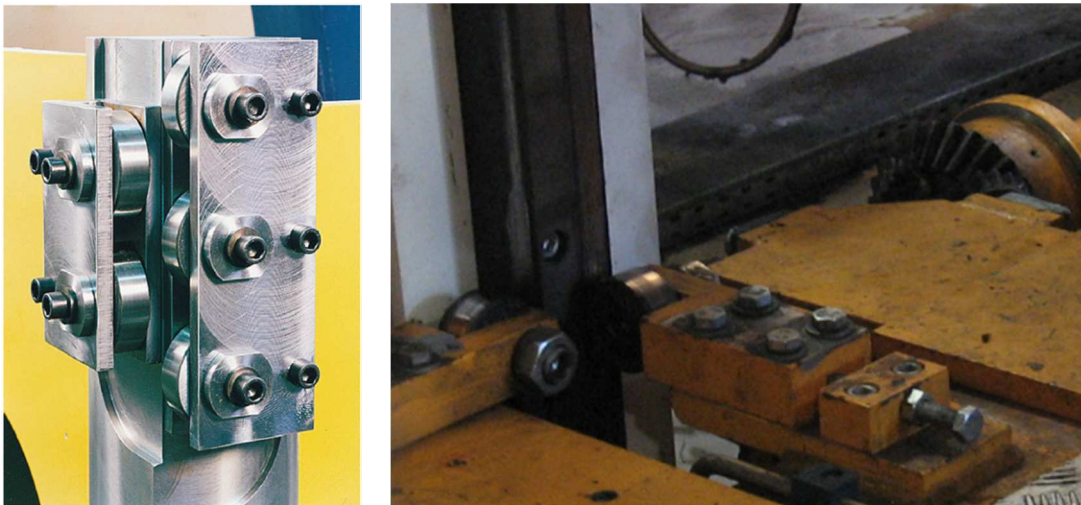


Obrázek 3-11: Schémata možných vedení (modrá - rám, oranžová - pohyblivý stůl) [16]

### Vedení kladkami

Vedení s kladkami lze dělit dle počtu a dle rozmístění. Příklady kladkového vedení viz Obrázek 3-12.

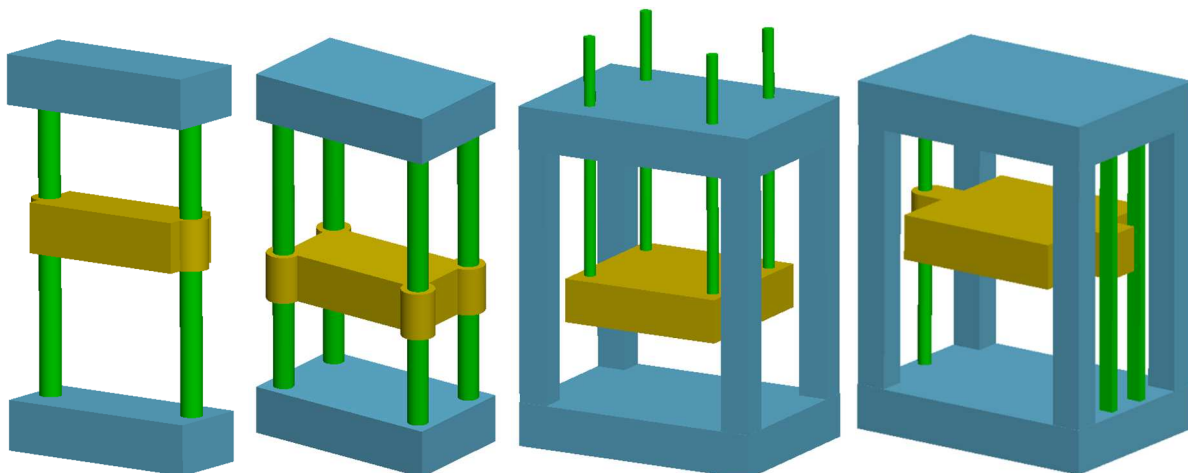
1. Dle počtu
  - 1+1 kladka
  - 2+2 kladky
  - 2+3 kladky
  - ...
2. Dle rozmístění
  - Rozmístění má obdobné možnosti jako případě schématu plošného vedení uvedeného viz Obrázek 3-11.



Obrázek 3-12: Příklady kladkového vedení používané u lisů [16], [12]

### Možné konfigurace vedení sloupy /tyčemi

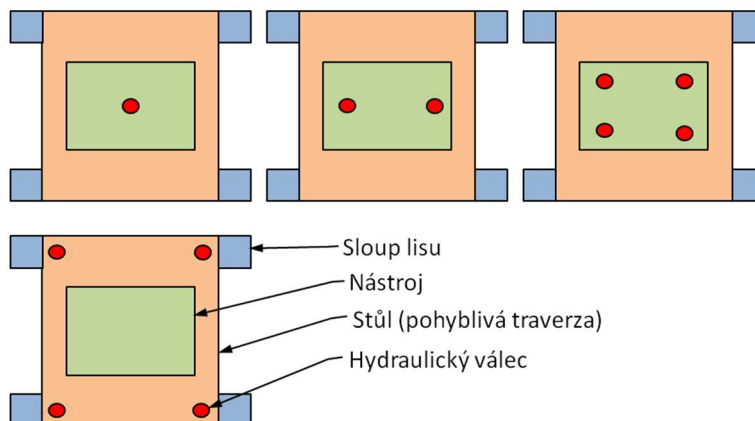
- 2 sloupy stojanu lisu
- 4 sloupy stojanu lisu
- 4 vodící tyče
- Kombinace jedné vodící tyče v rámu a dvou kluzných ploch



Obrázek 3-13: Příklady možných konfigurací vedení se sloupy/vodícími tyčemi

### 3.2.6 Rozmístění lisovacích válců

Obrázek 3-14 popisuje možné příklady rozmístění lisovacích válců s jedním, dvěma a čtyřmi lisovacími hydraulickými válci. Varianta se třemi válci se v tomto segmentu lisů nevyužívá.



Obrázek 3-14: Půdorysné schéma možného rozmístění hydraulických válců

### 3.3 Výpočty lisu 1000 kN

Výpočty byly provedeny na konstrukčních variantách lisu popsaných viz Tabulka 8. Zaměření je kladeno zejména na porovnání variant vedení a rozmístění lisovacích válců a následné vyhodnocení dosažené přesnosti a vlivu na přesnost. Rám lisu je upraven pro variantu 3 a 4.

Tabulka 8: Analyzované varianty lisu

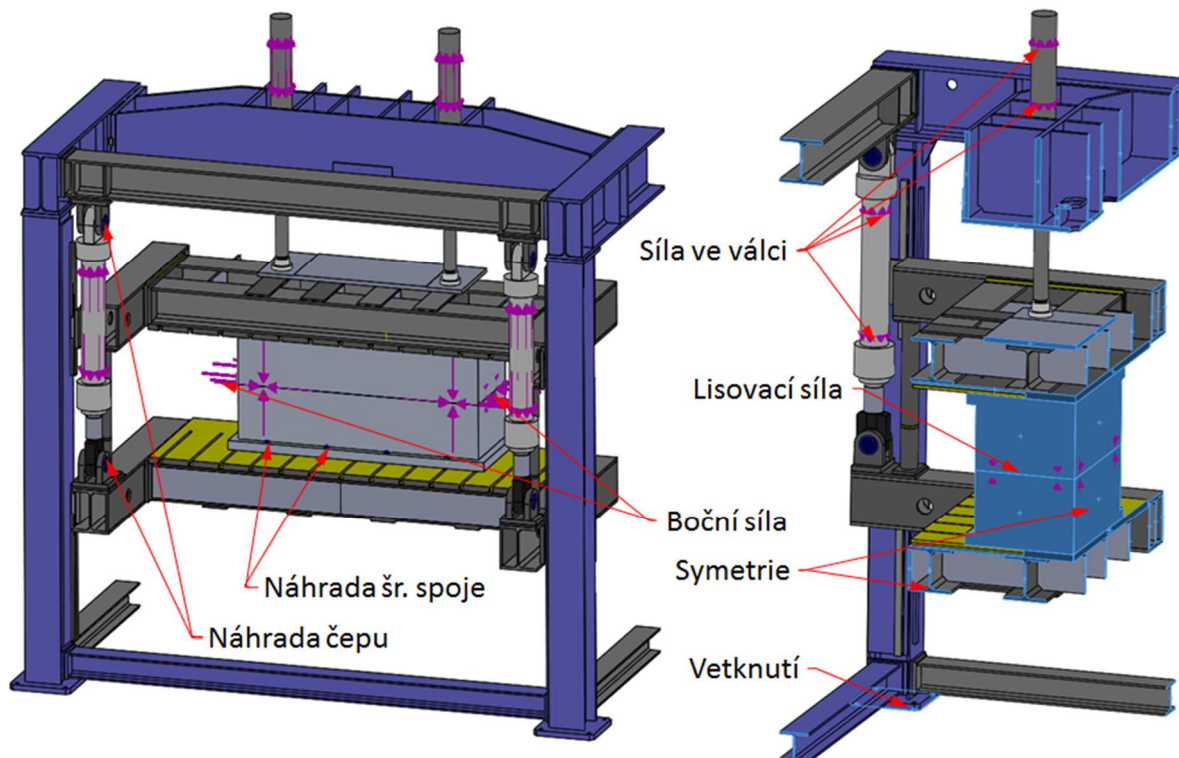
	Varianta 1	Varianta 2	Varianta 3	Varianta 4	Varianta 5	Varianta 6	Varianta 7
<b>Vedení stolů</b>	Kuličkové lineární vedení	Kuličkové lineární vedení	Kuličkové lineární vedení	Vodící tyče	Vnější půlprizma	Vnitřní půlprizma	Bez vedení
<b>Počet a umístění válců horního stolu</b>	4 válce – nad formu	2 válce – nad formou	4 válce – v rozích stolu	4 válce – nad formu	4 válce – nad formu	4 válce – nad formu	4 válce – nad formu
<b>Počet a umístění válců spodního stolu</b>	4 válce – v rozích stolu	4 válce – v rozích stolu	4 válce – v rozích stolu	4 válce – pod formu	4 válce – v rozích stolu	4 válce – v rozích stolu	4 válce – v rozích stolu
<b>Rám stroje</b>	Základní konstrukce viz Obrázek 3-8	Základní konstrukce viz Obrázek 3-8	Bez prostřední horní traverzy	Se spodní traverzou z vysokých plechů pod rovinou podlahy	Základní konstrukce viz Obrázek 3-8	Základní konstrukce viz Obrázek 3-8	Základní konstrukce viz Obrázek 3-8
<b>Konstrukce stolů</b>	Kombinace skříňové konstrukce s I profily						
<b>Konstruk. sloupů</b>	I profily s navařenými plechy						
<b>Výměna nástroje</b>	Do boku						

### 3.3.1 Geometrické a statické okrajové podmínky

Výpočty jsou řešeny na jedné čtvrtině lisu pro centrické zatěžování a na jedné polovině lisu pro analýzu s vlivy boční síly od nástroje.

V rovinách symetrie je aplikována odpovídající okrajová podmínka. V hydraulických válcích je nastavena síla (tlak) na plochu, která odpovídá celkové uzavírací síle 1000 kN, tzn. jeden válec 250 kN. Boční síla o celkové velikosti 30 kN je aplikována na horní (dosedací) plochy nástrojů. Každý nástroj je předepnut vůči stolu 8 šrouby velikosti M20, předpětí šroubu je 50 kN. Aby byly simulovány čepy hydraulických válců, byla použita náhrada čepů s nulovou rotační tuhostí z knihovny programu Solidworks. Obrázek 3-15 popisuje jednotlivé okrajové podmínky použité ve výpočtu lisu.

Velikost lisovací síly v nástroji byla stanovena na základě výsledků materiálových zkoušek provedených v kap. 3.4. Na základě vyhodnocení obvyklých tvarů nástrojů, účinné plochy nástroje (20-30% odlehčení) a použitého rozměru nástroje byla síla stanovena na hodnotu 640 kN, zbylých 360 kN je přenášeno dorazy.



Obrázek 3-15: Popis výpočtového modelu pro řešení úlohy na jedné polovině a jedné čtvrtině lisu

### 3.3.2 Kontakty

Použitý typ kontaktu umožňuje vzájemné odlehnutí a posuv dílů. Pro kontakt nástroje s upínací deskou je uvažován kontakt s třením. Ostatní kontakty jsou uvažovány bez tření. Kontaktní páry jsou definovány níže:

- Spodní nástroj – Spodní stůl.
- Horní nástroj – Horní stůl
- Spodní doraz – Horní doraz
- Vodící element – Vodící plocha (horní i spodní)
- Pístnice – válec (horní i spodní)



### 3.3.3 Materiálové vlastnosti

Tabulka 9 obsahuje přehled fyzikálních vlastností použitých materiálů. Svařovaný rám stroje je vyráběn z běžné konstrukční oceli. Nástroj použitý pro analýzu je uvažován jako odlévaný z hliníku s vnitřním žebrováním.

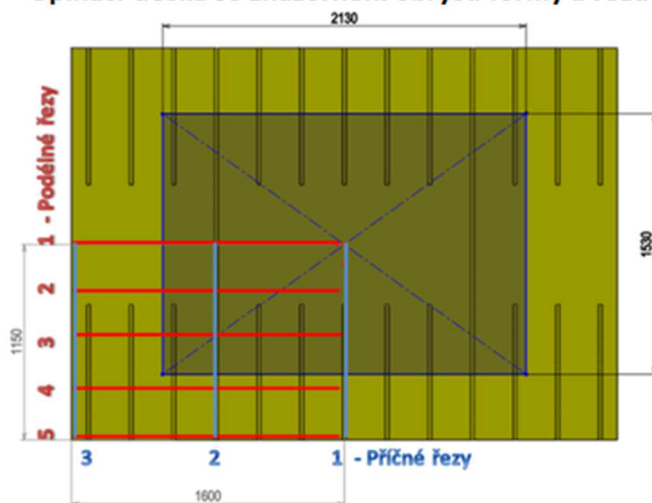
Tabulka 9: Materiálové vlastnosti (z knihoven programu Solidworks)

	Ocel - S355	Hliník EN-AW 5083
Poissonovo číslo [-]	0.3	0.33
Modul pružnosti [Pa]	$210 \times 10^9$	$70 \times 10^9$
Hustota [ $\text{kg/m}^3$ ]	7800	2660

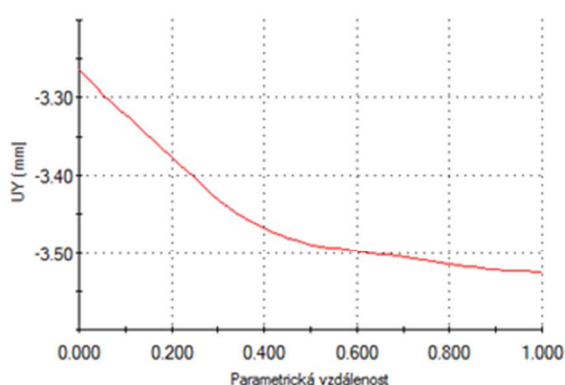
### 3.3.4 Výsledky

Pro názornost je na následujících obrázcích (Obrázek 3-16 a Obrázek 3-17) uvedeno vyhodnocení průhybů (deformací) spodní upínací desky v jednotlivých řezech první varianty lisu s centrickým zatížením. Toto vyhodnocení je určeno k porovnání se stanovenou maximální hodnotou průhybu a je dále použitelné při validaci výpočtového modelu a pro doplnění měřených hodnot viz kapitola 3.6.

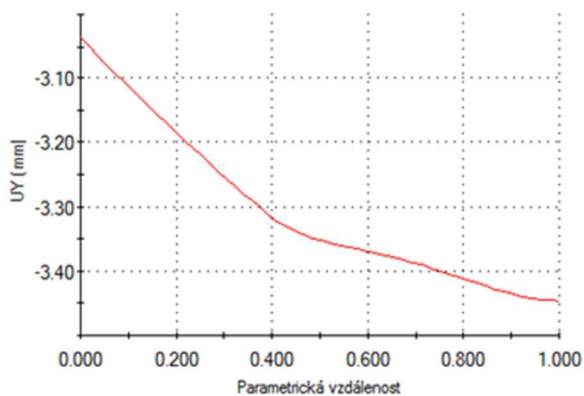
#### Upínací deska se znázornění obrysu formy a řezů



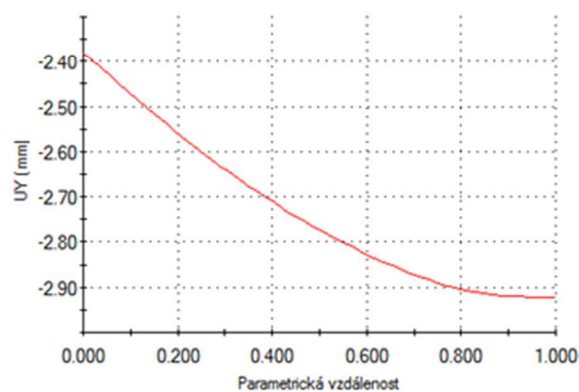
Řez příčný 1 – průhyb 0,60 mm



Řez příčný 2 – průhyb 0,59 mm

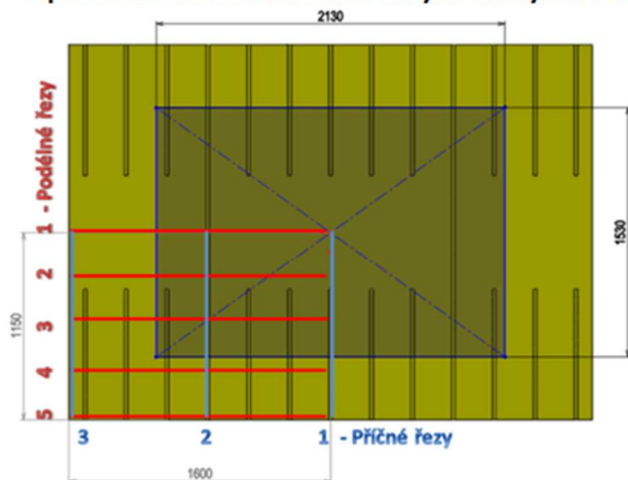


Řez příčný 3 – průhyb 0,67 mm

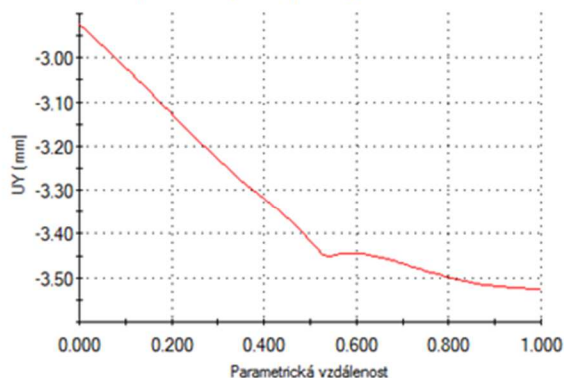


Obrázek 3-16: Grafy průhybů upínací desky v příčných řezech varianty 1, centrické zatížení

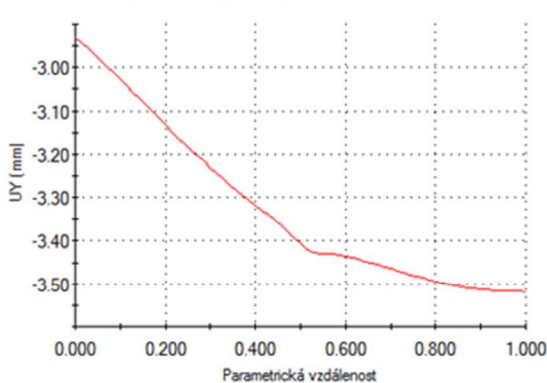
Upínací deska se znázornění obrysu formy a řezů



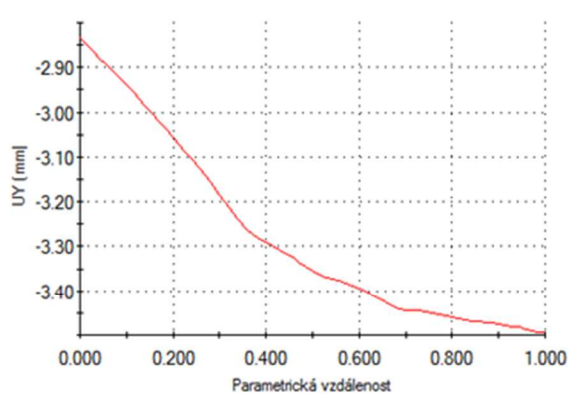
Řez podélný 1 – průhyb 0,60 mm



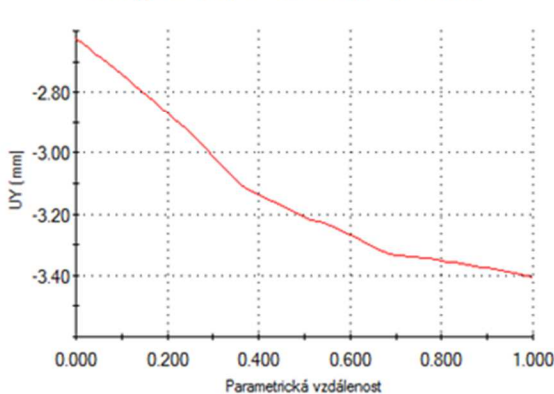
Řez podélný 2 – průhyb 0,59 mm



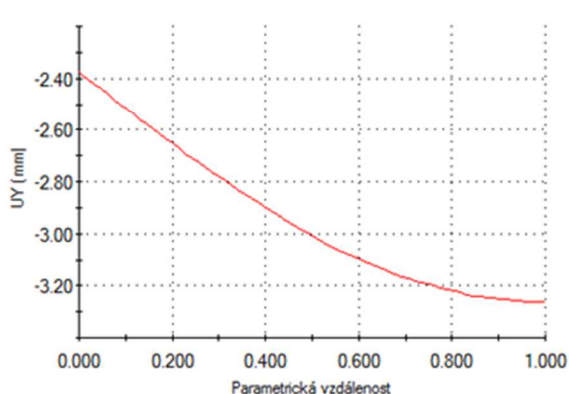
Řez podélný 3 – průhyb 0,67 mm



Řez podélný 4 – průhyb 0,77 mm



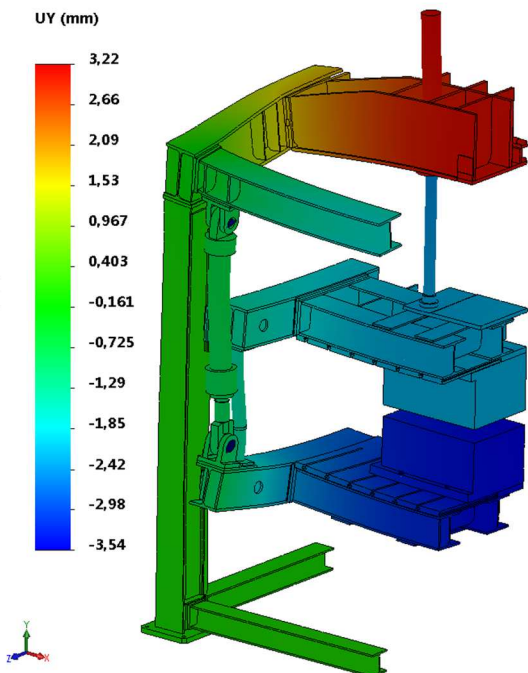
Řez podélný 5 – průhyb 0,88 mm



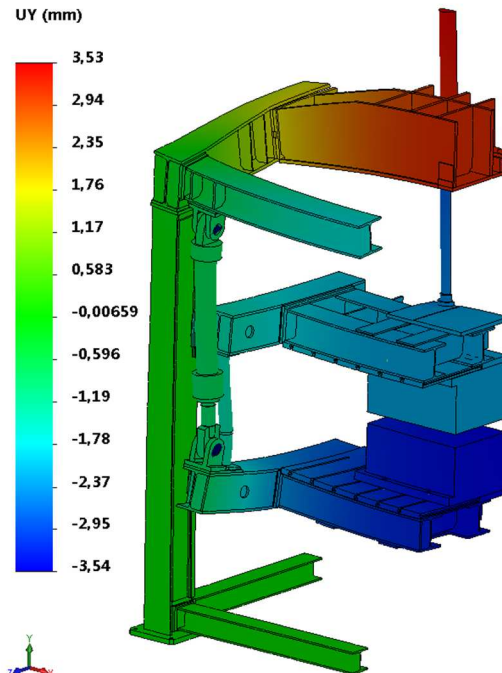
Obrázek 3-17: Grafy průhybů upínací desky v podélných řezech varianty 1, centrické zatížení

Na následujících obrázcích (Obrázek 3-18 až Obrázek 3-25) jsou zobrazeny posuvy jednotlivých variant lisů. Z těchto obrázků jsou patrné odlišné deformace stolů a rámu lisu, na které má vliv odlišné konstrukční provedení variant. Tabulka 10 a Tabulka 11 obsahují vyhodnocení variant vedení a rozmístění hydraulických válců s ohledem na dosaženou rovinnost a teoretické přesazení forem vlivem boční síly.

Měřítko deformace: 100

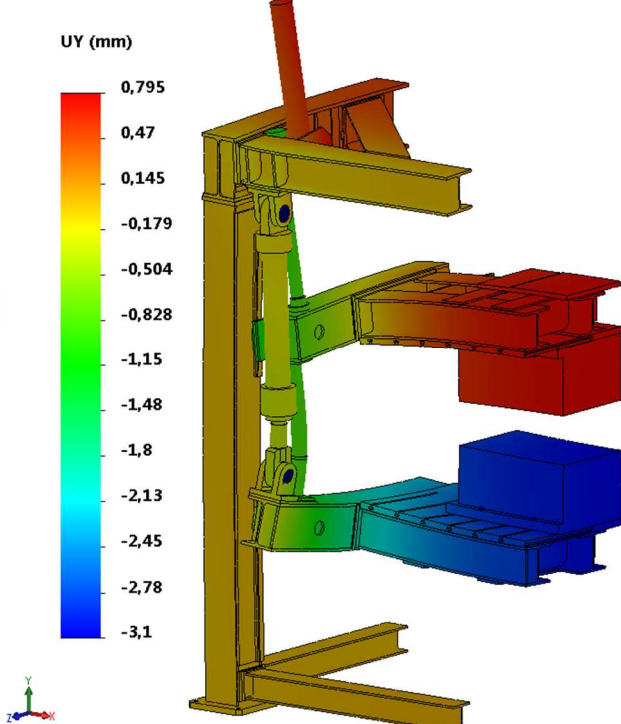


Měřítko deformace: 100

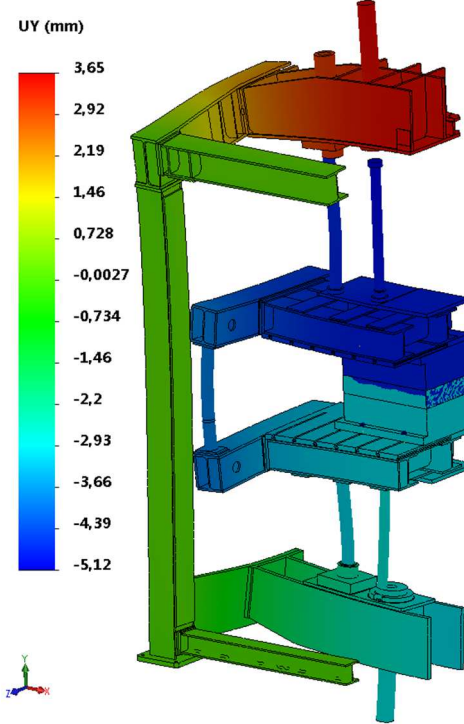


Obrázek 3-18: Centrické zatížení lisu, posunutí v ose Y [mm]: Zleva varianta 1, zprava varianta 2

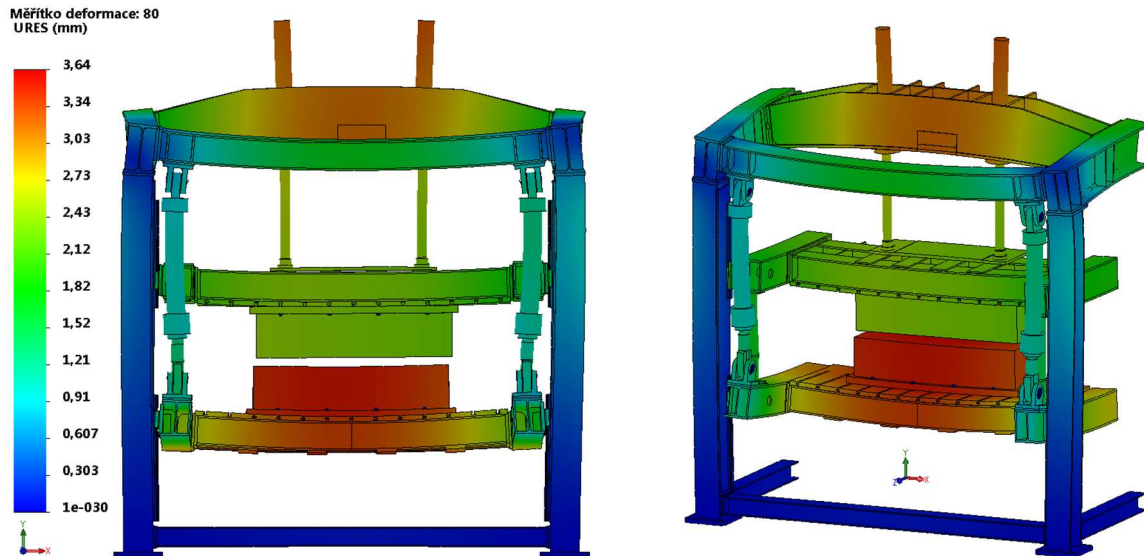
Měřítko deformace: 100



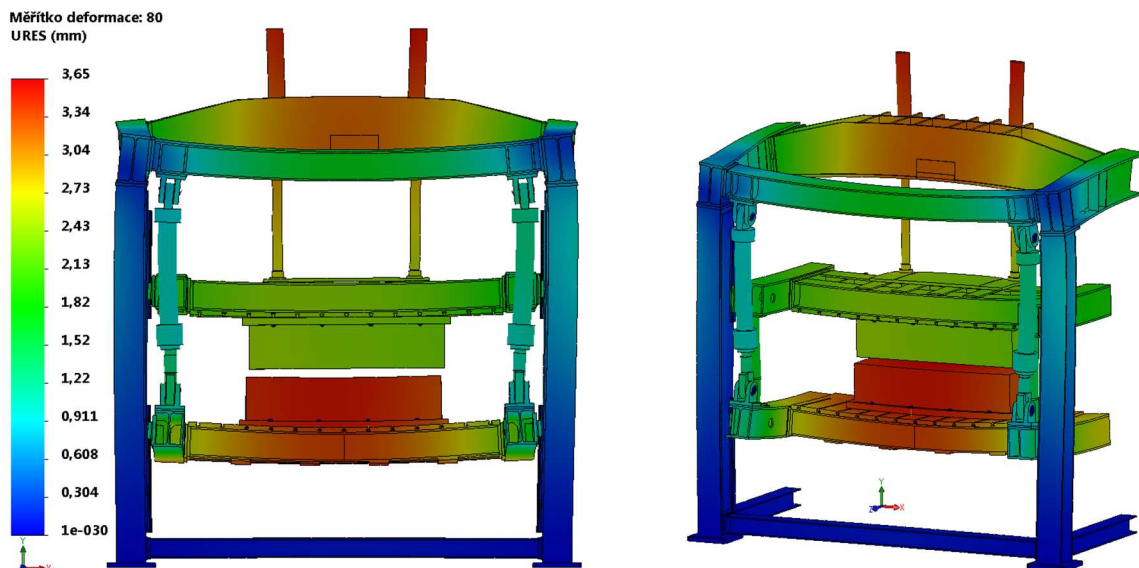
Měřítko deformace: 100



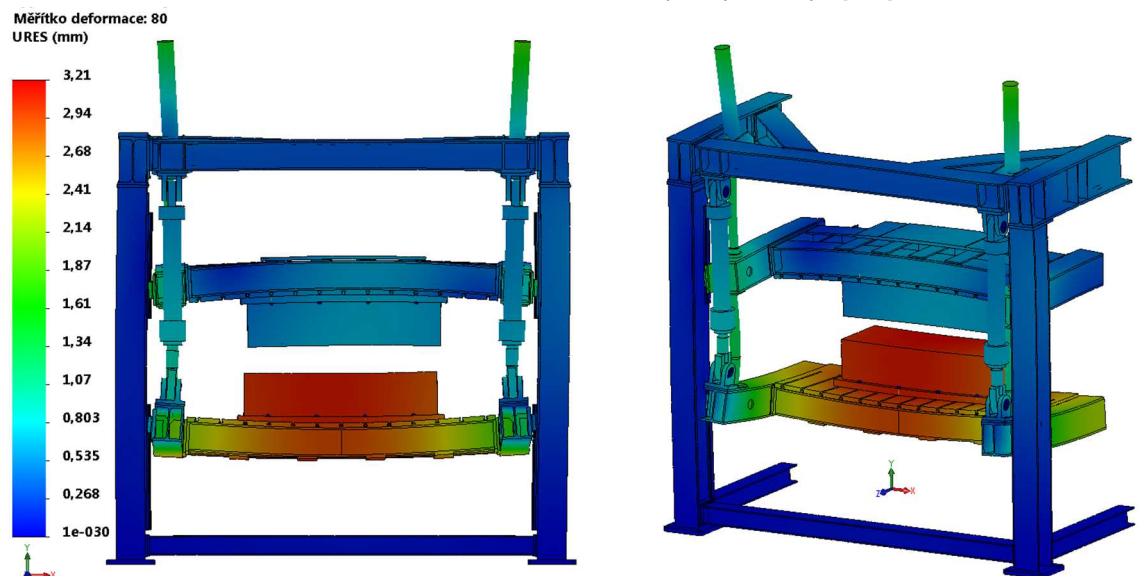
Obrázek 3-19: Centrické zatížení lisu, posunutí v ose Y [mm]: Zleva varianta 3, zprava varianta 4



Obrázek 3-20: Úloha s boční silou, celkové posuvy varianty 1 [mm]



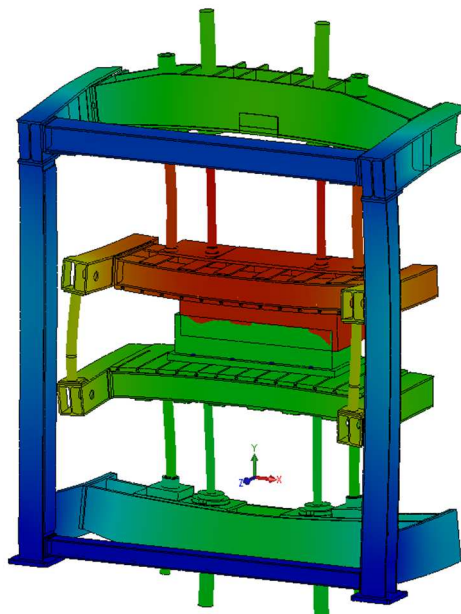
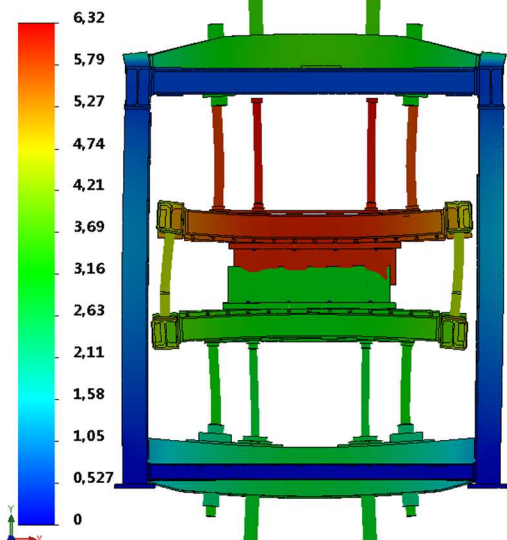
Obrázek 3-21: Úloha s boční silou, celkové posuvy varianty 2 [mm]



Obrázek 3-22: Úloha s boční silou, celkové posuvy varianty 3 [mm]

Měřítka deformace: 80

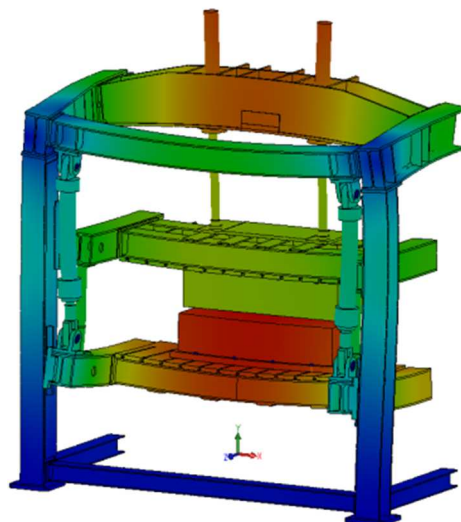
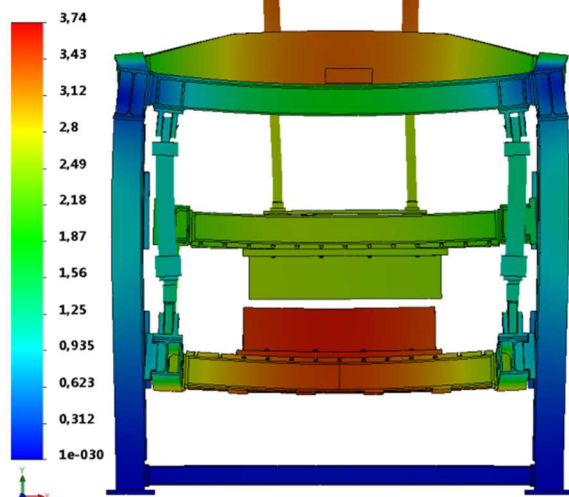
URES (mm)



Obrázek 3-23: Úloha s boční silou, celkové posuvy varianty 4 [mm]

Měřítka deformace: 80

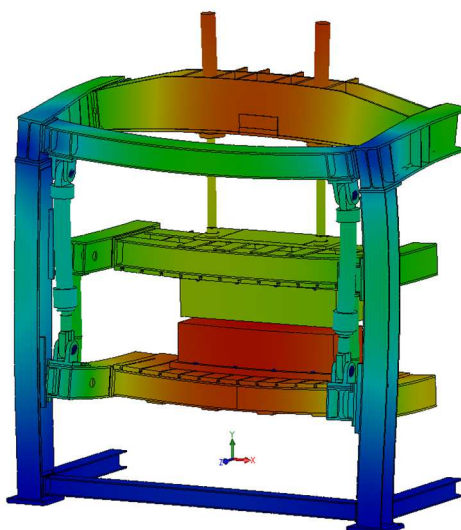
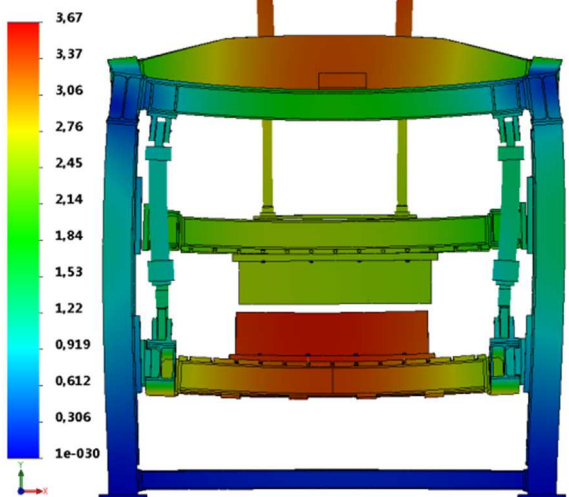
URES (mm)



Obrázek 3-24: Úloha s boční silou, celkové posuvy varianty 5 [mm]

Měřítka deformace: 80

URES (mm)



Obrázek 3-25: Úloha s boční silou, celkové posuvy varianty 6 [mm]

Tabulka 10: Vyhodnocení jednotlivých variant vedení stolů

	Spodní stůl		Horní stůl		Teoretické přesazení forem vlivem síly ve formě [mm]
	Rovinnost (centrické zatížení) [mm]	Rovinnost (s boční silou) [mm]	Rovinnost (centrické zatížení) [mm]	Rovinnost (s boční silou) [mm]	
Bez vedení	1,19	Nehodnoceno	0,46	Nehodnoceno	Nehodnoceno
Vnější půl prizmat	1,18	1,21	0,46	0,58	0,72
Vnitřní půl prizmat	1,14	1,21	0,46	0,62	0,36
Lineární vedení	1,14	1,23	0,44	0,61	0,29
Vodící tyče	0,39	0,70	0,43	0,83	0,84

Tabulka 11: Vyhodnocení variant uspořádání válců

Rozmístění a počet lisovacích válců	Spodní stůl		Horní stůl		Teoretické přesazení forem vlivem síly ve formě [mm]
	Rovinnost (centrické zatížení) [mm]	Rovinnost (s boční silou) [mm]	Rovinnost (centrické zatížení) [mm]	Rovinnost (s boční silou) [mm]	
4 válce v rozích spodního stolu 4 válce nad formou	1,14	1,23	0,44	0,61	0,29
4 válce v rozích spodního stolu 2 válce nad formou	1,14	1,23	0,46	0,60	0,29
4 válce v rozích spodního stolu 4 válce v rozích horního stolu (bez prostřední traverzy)	1,18	1,26	0,57	1,05	0,31
4 + 4 válce nad/pod formou	0,39	0,70	0,43	0,83	0,84

### 3.3.5 Vyhodnocení

#### Centrické zatížení

Dle předpokladu nemá typ použitého vedení při řešení symetrické úlohy (bez excentrické, či boční síly) zásadní vliv na dosaženou rovinnost. Nejvyšší tuhosti dosahuje lineární vedení. Vliv je ovšem při centrickém zatížení pouze v řádu 0,02 až 0,05 mm. Pro srovnání je uvedena i varianta s vodícími tyčemi. Ovšem u této varianty je síla z válců

potřebná na lisování přenášena „přímo“ do formy, stůl je tedy namáhán více tlakem. Na ohyb namáhá stůl v tomto případě pouze síla, která je daná reakcí ve vnějších dorazech.

Zásadní vliv na deformace stolu potažmo upínací desky má umístění vnějšího dorazu – čím dále je umístěn od formy, tím více se deformuje stůl lisu. Též má zásadní vliv umístění lisovacího válce pro spodní stůl. Když je tento válec umístěn za vnějším dorazem, dochází k vyšším deformacím spodního stolu.

Při přímém porovnání použití dvou a čtyř lisovacích válců pro horní stůl vyplývá, že rozdíl je téměř nulový. Nejlepší variantou z pohledu dosažené přesnosti je varianta s použitím 4+4 válců pod i nad formou. Dochází tak nejnižšímu namáhání stolů ohybem. Tato varianta má nevýhodu, že má vyšší zástavbovou výšku a pro lis musí být vytvořena základová jáma, zatímco ostatní varianty se umísťují na úroveň podlahy haly.

### **Zatížení boční silou od nerovnoměrnosti formy**

Z provedených výpočtů s bočním zatížením lze usuzovat tuhost varianty rámu stroje v bočním směru. Boční síla simulující nerovnoměrnost formy způsobuje přesazení horní a spodní formy. Toto přesazení lze považovat za teoretické a vzniklo by pouze v případě, že by to umožnil tvar formy a „nízká tuhost“ lisovaného materiálu.

Nejlépe svazuje rám se stoly lineární kuličkové vedení a to se jeví také jako nejvíce tuhé. U vnějšího půl prizmatického vedení dochází k odlehnutí vodící plochy vlivem deformací stolu, u vnitřního půl prizmatického vedení je přítlak vedení zvýšen. Navržená varianta s vodícími tyčemi je v bočním směru nejméně tuhá, to lze řešit úpravou dimenzování vodících tyčí.

Umístění lisovacích válců dále od průmětu nástroje má za vliv vyšší ohybový moment, potažmo vyšší průhyby. Rozdíl mezi provedením se dvěma a čtyřmi lisovacími válci nad formou je nízký.

Jako nejlepší varianta z hlediska dosažené přesnosti je možné volit čtyři nebo dva lisovací válce a umístit je do průmětu formy. Z hlediska provedených výpočtů vedení dosahuje nejlepších výsledků lineární vedení a vnitřní poloviční prizma. Výsledky pro vedení nelze aplikovat obecně, jelikož tuhost každého rámu lisu je jiná a způsob namáhání též, z čehož plyne odlišný charakter deformací, který může mít přímý vliv na vodící elementy.

### **Závěr**

Pro komplexní vyhodnocení z hlediska budování znalostní báze dat (pro produkční firmy) je třeba doplnit tyto varianty o výpočty s dalšími provedeními konstrukce rámu, měřením a ekonomickým vyhodnocením. Tato studie je příkladem možného postupu při řešení výpočtů s různými konstrukčními variantami, jejich vyhodnocením a nástínem procesu tvorby znalostní báze dat.

## **3.4 Experimentální měření parametrů tkaniny**

Pro účely experimentálního ověření potřebné síly (tlaku) na stlačení tkaniny na požadovanou tloušťku bylo navrženo měření na zkušebním stroji Zwick/Roell Z050. Zkouška byla provedena na Fakultě aplikovaných věd na ZČU. Tkanina od výrobce Fibertex s tloušťkou 10 mm obsahuje termoplastická vlákna (složení: 60% PET, 40% PP, váha 1500gramů/m<sup>2</sup>), která musejí být z technologických důvodů ohřáta na teplotu 200°C. Po vychladnutí tyto

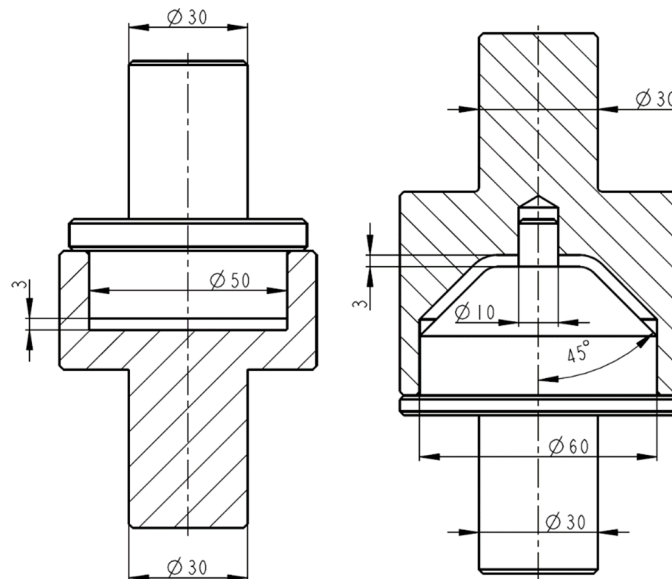
plasty dosahují požadovaných mechanických vlastností. Z tohoto důvodu jsou vzorky před vložením do zkušebního stoje vyhřátý v peci. Kontrola teploty zkoušeného dílu je prováděna pomocí termočlánu. Dále je provedeno vyhodnocení na vzorcích i za pokojové teploty 20 °C. Na základě výsledků měření sil je stanovena síla, která je přenášena formou ve výpočtech lisu 1000 kN v kap. 3.3.

Průměr vzorku byl stanoven na hodnotu 50 mm. Vzorek byl vyhřátý na 200°C a poté vložen do netemperovaného přípravku.

### 3.4.1 Provedené zkoušky:

1. Prostým tlakem - mezi dvěma deskami
2. "Pěchováním" - vzorek se nemůže rozšiřovat v ose kolmé na směr lisování, pro tyto účely byl navrhnut a vyroben přípravek.
3. Zkouška ve tvarovém nástroji - vzorek tvaru mezikruží s vnějším průměrem 50mm a dírou o průměru 10mm. Pro účely tohoto měření byl též navržen a vyroben přípravek.

Uvedené zkoušky s přípravky pro druhou a třetí zkoušku mají za cíl vyhodnotit vlivy, které mohou nastat v běžně používaných typech nástrojů z důvodu lokálního napěchování a tvaru dílu, kdy může dojít k nárůstu lisovací síly. Přípravky pro zkoušku 2 a 3 viz Obrázek 3-26. Výkresová dokumentace přípravků je uvedena v příloze 1.

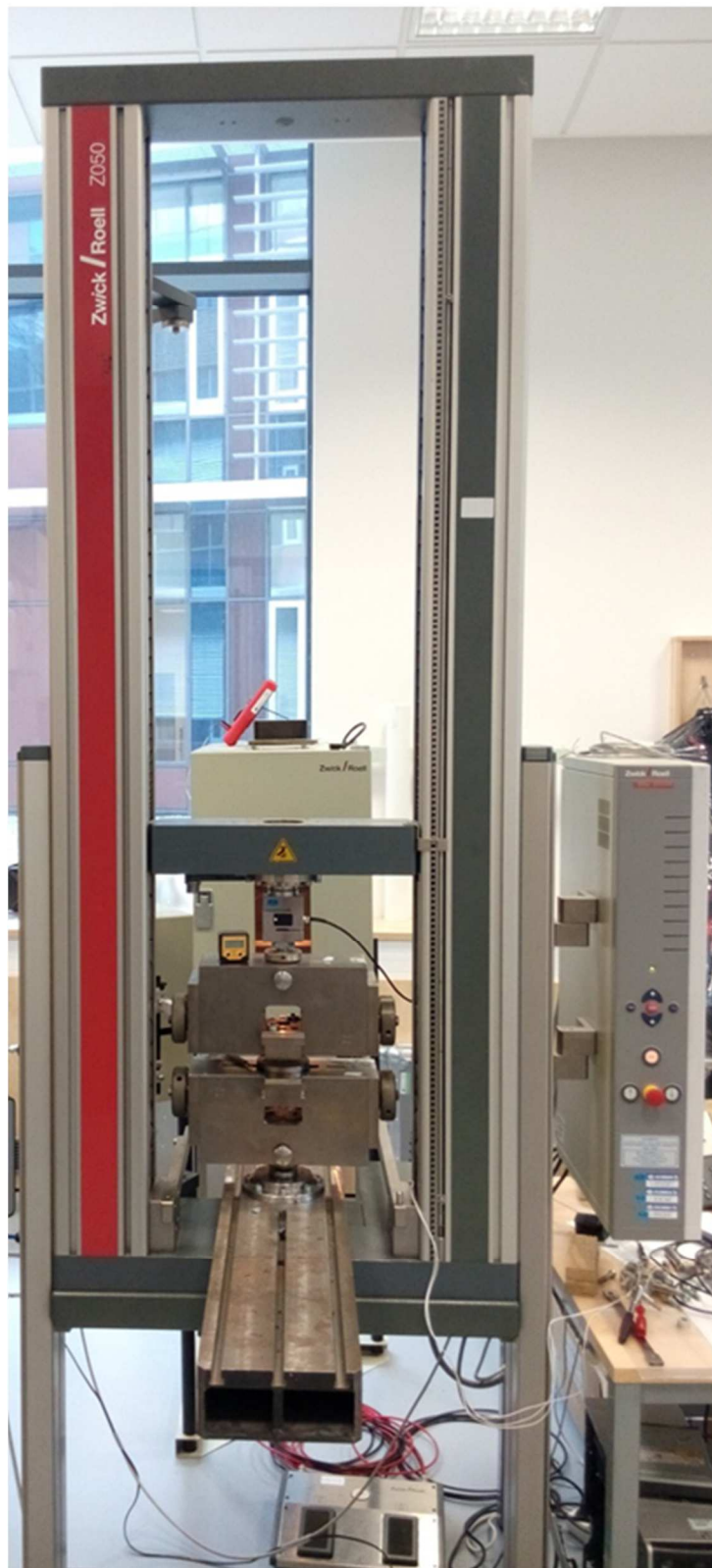


Obrázek 3-26: Přípravky pro 2. a 3. Zkoušku

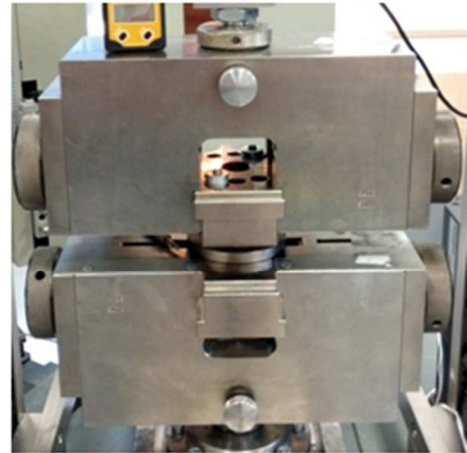


Obrázek 3-27: Přípravky vyrobené pro experimentální měření





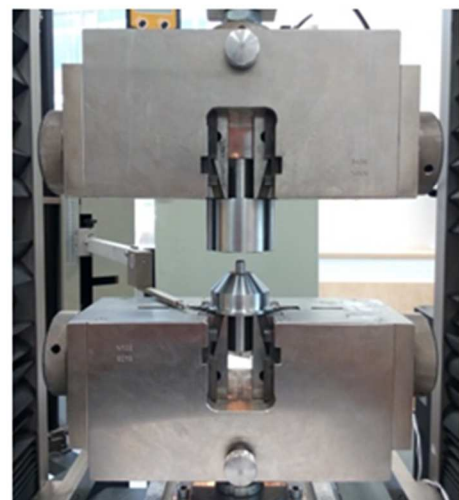
1. Nástroj



2. Nástroj



3. Nástroj



Obrázek 3-28: Zkouška na trhače Zwick/Roell Z050 a detaily s upnutím jednotlivých nástrojů

### 3.4.2 Výsledky měření

Tabulka 12: Síly při stlačení prostým tlakem

Vzorek	Síla [N]					Průměr
	1	2	3	4	5	
Tlak, T=3mm, 200°C	1953	2016	2057	1897	1992	1983
Tlak, T=3mm, 20°C	5263	5106	4324	4869	5024	4917
Tlak, T=2mm, 200°C	7454	7755	8248	7570	7887	7782

Tabulka 13: Síly při stlačování na tloušťku 3,5 mm různými nástroji

Stlačení vzorku na T=3.5mm	Síla [N]					Průměr
	1	2	3	4	5	
Tlak, 200°C	1320	1357	1361	1304	1343	1337
Tlak, 20°C	3036	2950	2604	2806	2891	2857
Pěchování, 20°C	3295	3149	3359	2916	3623	3268
Tvarový nástroj, 200°C	1887	1544	1418	1369	1762	1596
Tvarový nástroj, 20°C	2578	2891	2563	2760	2795	2717

Tabulka 14: Síly při stlačování na tloušťku 4 mm různými nástroji

Stlačení vzorku na T=4mm	Síla [N]					Průměr
	1	2	3	4	5	
Tlak, 200°C	337	340	350	317	348	338
Tlak, 20°C	1896	1761	1553	1753	1804	1753
Pěchování, 20°C	2037	1856	1956	1745	2237	1966
Tvarový nástroj, 200°C	1082	922	834	808	1052	940
Tvarový nástroj, 20°C	1627	1826	1612	1727	1758	1710

### 3.4.3 Zhodnocení výsledků měření a jejich aplikace

V průběhu experimentu se ukázalo, že u tohoto typu materiálu dochází při vložení do pece k určitému smrštění jeho velikosti. Velikost smrštění je závislá na době, po kterou byl vzorek umístěn v peci (Čím déle byl v peci umístěn vzorek, tím k většímu smrštění došlo.). Z tohoto důvodu musely být vzorky do pece vkládány jednotlivě, aby byl tento jev co nejvíce eliminován. První sada 15-ti vzorků byla delším setrváním v peci znehodnocena a následně vyřazena z experimentu.

Z důvodu smrštění materiálu nebyla zkouška „napěchováním“ u vyhřátého vzorku prováděna a byla provedena pouze u vzorku s pokojovou teplotou.

Před zkouškou s přípravky bylo nutné provést zatížení na prázdno, pro vymezení případných vůlí a vytvořit záznam zatížení naprázdno, z kterého je jasně patrné, v jakém bodě na sebe dosednou dorazy a zda nedochází ke tření nástrojů vůči sobě.

Grafické záznamy ze zkoušek jsou uvedeny v příloze 2. Tvar křivek připomíná tvar exponenciály. Na začátku stlačování je síla téměř nulová a v určitém momentě, když dojde k dostatečnému zahuštění vláken, dochází k výraznému nárůstu tuhosti.

Při porovnání výsledků zkoušek tlakem a pěchováním u nevyhřátého materiálu se potvrdil mírný nárůst síly (10%) vlivem znemožnění deformace do stran a tření materiálu o stěnu přípravku. U tvarového nástroje je za pokojové teploty síla na lisování srovnatelná se silou prostým tlakem (U tvarového nástroje je celková plocha dílu menší o středovou díru.) Za tepla lisovaný vzorek ve tvarovém nástroji vyžaduje vyšší síly než je tomu u lisování prostým tlakem. Dále je patrné, že s velikostí deformace vzorku se tento rozdíl zmenšuje.

Naměřené hodnoty jsou použity jako vstupní hodnota do výpočtů lisu 1000 kN uvedených v kapitole 3.3.

### 3.5 Analýza hydraulického lisu 4000 kN a aplikace možných metod pro dosažení zvýšené přesnosti

Analýza je provedena u hydraulického lisu pro výrobu akustických a interiérových dílů automobilu, stejně tomu bylo v předchozí kapitole. Rozdílná je ovšem technologie. Díly jsou tvořeny sendvičovými vrstvami, které jsou vloženy do vyhřáté formy v lisu, kde pod definovaným tlakem, nebo spíše stlačením, získají svůj konečný tvar. Nástroje tohoto lisu jsou temperovány vedením tepla z upínacích desek lisu. Upínací desky v sobě mají otvory pro topné elementy.

Lis je čtyřsloupové konstrukce se dvěma dvojčinnými lisovacími válci. Jednotlivé části lisu jsou svařence, které jsou demontovatelné pro běžný transport. Hlavní díly lisu popisuje Obrázek 3-29. Zařazení lisu dle konstrukce viz Tabulka 15.

Z důvodu zvyšujících se požadavků na přesnost, a to i za zvýšených teplot, zde se zejména jedná o rovinnost měřenou na upínacích deskách lisu, je nutné ke konstrukci stroje přistupovat komplexněji. K zajištění této přesnosti je nutné zajistit dostatečnou tuhost rámu stroje a analyzovat tepelné ovlivnění rámu stroje, kde toto ovlivnění (zejména z důvodu nerovnoměrného ohřátí dílů lisu) může mít vyšší vliv na přesnost než samotná lisovací síla. Hlavním úkolem je vytvořit výpočtový model umožňující komplexní výpočet se zahrnutím teplotního a silového působení. A na základě tohoto modelu analyzovat možné přístupy k řešení problematiky zajištění potřebné přesnosti lisu. Úloha byla řešena metodou konečných prvků v softwaru Abaqus jako kombinovaná teplotně-statická úloha. Byla uvažována geometrická symetrie lisu a centrického zatížení, tudíž bylo možné řešit pouze jednu čtvrtinu lisu. Dále byl řešen vliv chlazení rámu lisu, výkon chlazení se také odvíjel od požadované maximální teploty na rámu lisu dané bezpečnostními požadavky. Úloha je řešena jako stacionární, jelikož mezi jednotlivými produkčními cykly nedochází ke zdatelnému rozdílu teplot. Pro vyhodnocení napjatosti kompozitních izolačních desek bylo použito kritérium maximálních napětí. Pro kovy byla uvažována platnost Hookova zákona a z hlediska pevnosti bylo použito redukované napětí dle HMM. S použitím výsledků této analýzy byly navrženy metody (postupy), s jakými lze postupovat při návrhu rámu lisu. Navržené metody jsou dále použity na jednoduchém modelu stolu lisu. Výhody a nevýhody

těchto metod jsou popsány v kap. 3.5.10 a 3.5.11. Tyto metody je možné použít i u jiných podobně pracujících strojů, kde je teplotně ovlivněn rám stroje jako např. vulkanizační lisy.

Tabulka 15: Zařazení lisu dle konstrukce rámu

Otevřený	Uzavřený
Z jednoho kusu	Dělený
Předepjatý	Nepředepjatý
Horizontální	Vertikální
Sloupový	Stojanový

### 3.5.1 Základní parametry a požadavky na stroj:

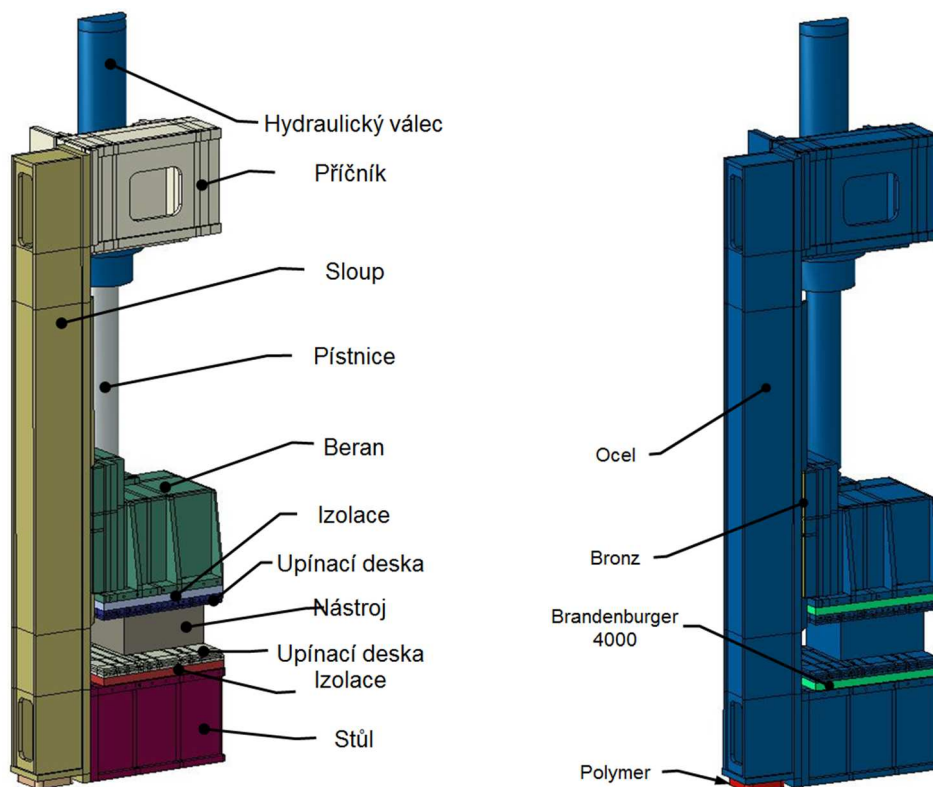
Zavírací síla hydraulicky:	4000 kN
Zdvih:	1500 mm
Velikost upínací desky:	2250x1750 mm
Způsob upínání:	T-drážky
Rychlost zdvihu:	max. 300 mm/s
Hmotnost celého nástroje:	max. 12 000 kg
Hmotnost horního nástroje:	max. 6 000 kg
Teplota okolí:	20° - 40°C
Rovinnost upínacích desek bez zátěže:	max. 0,2 mm
Průhyb vlivem zatížení:	max. 0,25mm
Transport:	demontovatelné pro běžný transport

### 3.5.2 Shrnutí cílů této analýzy

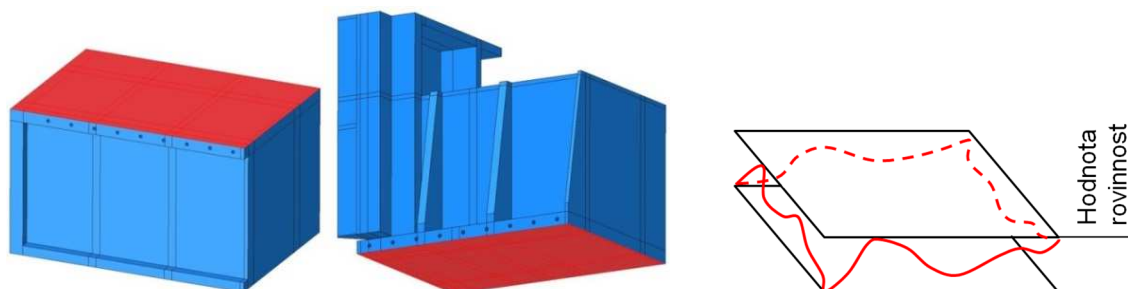
- Vytvoření výpočtového modelu pro ověření rámu lisu s různým typem zatěžování
- Vyhodnocení posuvů bez zatížení (pouze s vlivem gravitace)
- Vyhodnocení teplotních polí a chlazení na rámu lisu
- Pevnostní posouzení jednotlivých dílů rámu lisu
- Na základě výsledků této analýzy navrhnout metody pro návrh rámu lisu a vyhodnotit je na zjednodušeném modelu

### 3.5.3 Přehled řešených analýz

1. Statický výpočet lisu – Zatížení lisovací silou 4000 kN (s uvažování a bez uvažování gravitace)
2. Kombinovaná teplotně/statická úloha - Zatížení lisovací silou 4000 kN a vytápění topných desek
3. Kombinovaná teplotně/statická úloha - Zatížení lisovací silou 4000 kN, vytápění topných desek, chlazení stolu a beranu
4. Kombinovaná teplotně/statická úloha - Vytápění topných desek
5. Kombinovaná teplotně/statická úloha - Vytápění topných desek, chlazení stolu a beranu



Obrázek 3-29: Hlavní díly lisu a použité materiály



Obrázek 3-30: Plochy stolu a beranu pro vyhodnocení rovinnosti

### 3.5.4 Materiálové vlastnosti

Tabulka 16 uvádí přehled fyzikálních vlastností materiálů použitých ve výpočtovém modelu. Modul pružnosti izolačních desek byl uvažován jako teplotně závislý. Píst, válec a nástroj jsou nakupované díly a nejsou pevnostně posuzovány.

Tabulka 16: Materiálové vlastnosti [17], [18], [19], [20], [21]

	Ocel- S355	Brandenburger S 4000	Bronz CuSn12	Polymer-guma
Poissonovo číslo [-]	0.3	0.25	0.34	0.49
Modul pružnosti [Pa]	$210 \times 10^9$	$7,5 \times 10^9 - 20^\circ\text{C}$ $4 \times 10^9 - 200^\circ\text{C}$	$110 \times 10^9$	$10 \times 10^6$
Měrná tep. kapacita [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]	460	900	380	2010
Tepelná vodivost [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]	53	0.12	42	0,14
Teplotní roztažnost [ $1 \cdot \text{K}^{-1}$ ]	$11 \times 10^{-6}$	$28 \times 10^{-6}$	$19 \times 10^{-6}$	$77 \times 10^{-6}$
Hustota [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	7800	1350	8900	1000

### 3.5.5 Diskretizace částí lisu

V rámci modelování lisu byly brány v úvahu dvě roviny symetrie. Všechny díly lisu byly diskretizovány s použitím 3D elementů s 8 uzly a plnou integrací. Celý lis byl rozdělen na několik částí, zpravidla podle toho, jak je vyráběn. Každá část byla modelována jako jeden díl a poté byly některé sloučeny tak, že více strojních částí bylo zkombinováno do jedné. Program umožňuje přiřazení materiálu pro jednotlivé elementy, tudíž není problematické nastavit pro elementy na jedné části různé materiálové vlastnosti. Tato metoda byla použita například u lineárního vedení v případě bronzových desek, které jsou modelově sloučené s rámem lisu.

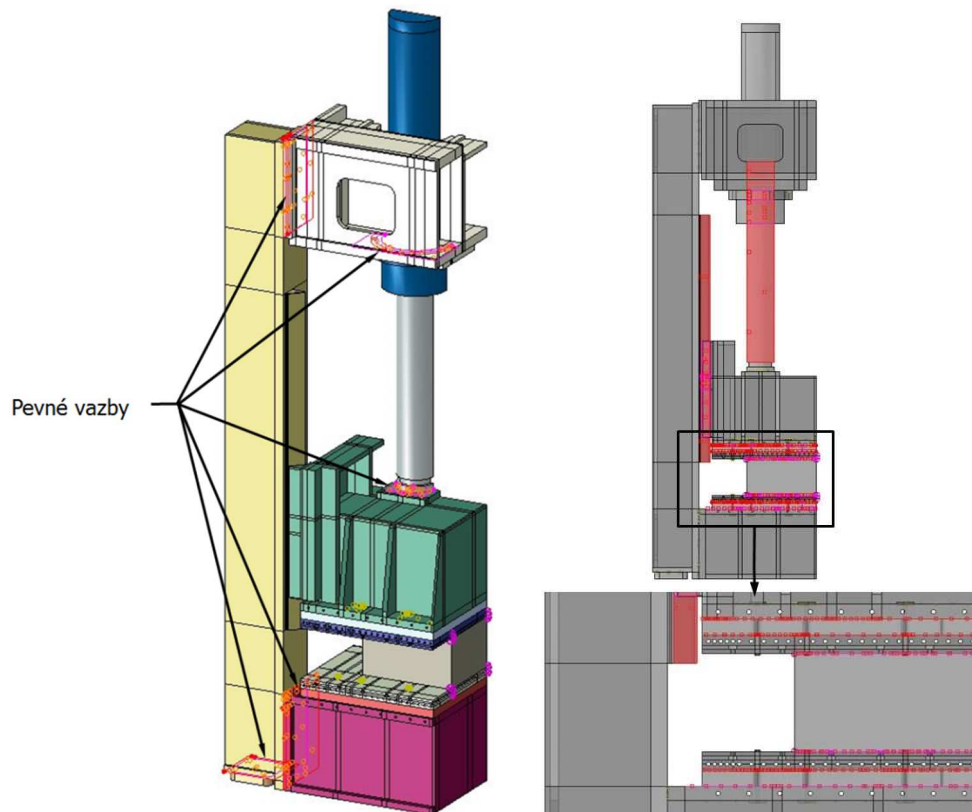
### 3.5.6 Vazby a kontakty

Pevné vazby jsou definovány pro pevné spoje šrouby a pery. Pevné vazby neumožňují vzájemný posuv spojených dílů a mohou tak, oproti reálnému spoji, vykazovat vyšší tuhost. Pevné vazby a kontakty viz Obrázek 3-31. Pevné vazby jsou definovány mezi následujícími díly:

- Sloup – horní traverza
- Sloup – stůl lisu
- Sloup – podložka lisu
- Pístnice – beran
- Hydraulický válec – horní traverza

Kontakty přenášejí teplo a tlakové síly. Použitý typ kontaktu umožňuje vzájemné odlehnutí a posuv. Kontaktní jsou definovány mezi těmito díly:

- Horní izolační deska – beran
- Horní izolační deska – horní upínací deska
- Spodní izolační deska – spodní upínací deska
- Spodní izolační deska – stůl lisu
- Nástroj – horní upínací deska
- Nástroj – spodní upínací deska
- Vedení beranu – obložení sloupu
- Pístní tyč – hydraulický válec



Obrázek 3-31: Pevné vazby (vlevo) a kontaktní plochy (vpravo)

### 3.5.7 Okrajové podmínky

Lis je pro výpočet modelován tak, že jsou všechny jeho díly v pracovní pozici. Síla je u skutečného lisu vyvozena pracovní kapalinou v hydraulickém válci. Tudíž byl nastaven do lisovacích válců tlak odpovídající lisovací síle lisu. Upínací desky lisu jsou v modelu k rámu připevněny předepínacími elementy jako náhrada reálného spojení šroubovým spojem s pružnými podložkami. Tuhost předepínacích elementů odpovídá tuhosti skutečného spoje (pro elementy je definován speciální materiál ve vztahu k požadované tuhosti). Předepnutí těchto elementů bylo simulováno použitím speciální okrajové podmínky „bolt load“. Tato podmínka vyvolá zkrácení dílu o požadovanou délku, čímž simuluje předepnutí.

#### Geometrické okrajové podmínky

Jsou použité dvě roviny symetrie v modelu. Posuvy kolmé na tyto roviny jsou rovny nule. Celý lis je umístěn na čtyřech polymerových deskách. Posuvy v ose z na spodní části desek jsou rovny nule, jedná se o místo kontaktu polymerových desek s podlahou. Obrázek 3-32 popisuje jednotlivé okrajové podmínky.

#### Statické okrajové podmínky

Analýza 1:

- Předepnutí elementů pro spojení upínacích desek s rámem lisu pomocí okrajové podmínky „bolt load“ posuvem o 1,75mm. To je přibližně 8x7000 N na jednu čtvrtinu výpočtového modelu.
- Zatížení lisovací silou 4000 kN. (1000 kN na jednu čtvrtinu)

- Gravitace (Pro výpočet vlivu gravitace bez lisovacího zatížení byl vytvořen separátní výpočet, výsledky jsou použity pro vyhodnocení vlivu)

#### Analýza 2:

- Předepnutí elementů jako v analýze 1.
- Zatížení lisovací silou 4000 kN.
- Vytápění upínacích desek tepelným tokem  $724 \text{ W.m}^{-2}$ . Tepelný tok je na okrajích (100 mm) zvýšen na 130% hodnoty v centrální oblasti na  $936 \text{ W.m}^{-2}$ , dle specifikace výrobce topných tyčí viz Obrázek 3-32. (Hodnota tepelného toku byla získána iterativní metodou s ohledem na požadovanou teplotu v nástroji.)

#### Analýza 3:

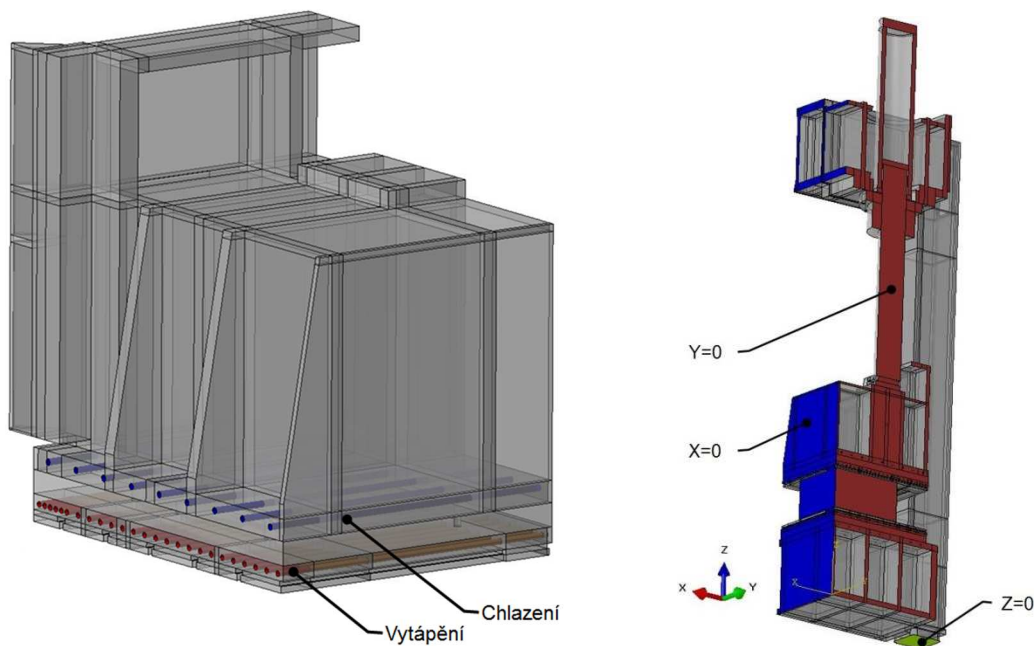
- Předepnutí elementů jako v analýze 1.
- Zatížení lisovací silou 4000 kN.
- Vytápění upínacích desek tepelným tokem jako v analýze 2.
- Chlazení rámu tepelným tokem  $-350 \text{ W.m}^{-2}$  viz Obrázek 3-32. Hodnota tepelného toku byla získána iterativní metodou s požadavkem na maximální teplotu rámu nižší než  $45 \text{ }^\circ\text{C}$ .

#### Analýza 4:

- Gravitace
- Předepnutí elementů jako v analýze 1
- Vytápění upínacích desek tepelným tokem jako v analýze 2

#### Analýza 5:

- Gravitace
- Předepnutí elementů jako v analýze 1
- Vytápění upínacích desek tepelným tokem jako v analýze 2
- Chlazení rámu tepelným tokem jako v analýze 3

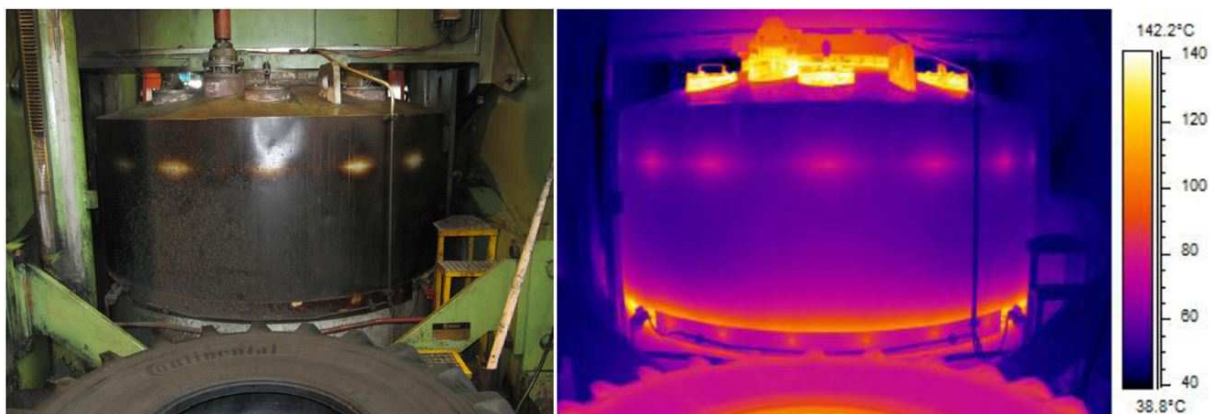


Obrázek 3-32: Okrajové podmínky

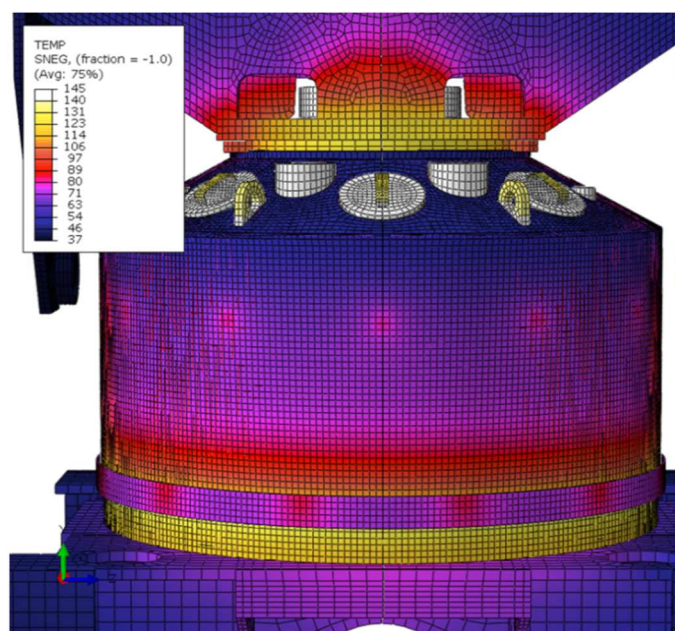


### 3.5.8 Nastavení teplotní analýzy

Teplotní pole je vhodné zpravidla ověřit termokamerou nebo termočlánky. V tomto případě to bohužel nebylo umožněno provozovatelem lisu. Pro co nejdůvěhodnější nastavení simulace bylo provedeno nastavení modelu obdobným způsobem jako v případě teplotního výpočtu prováděného u vulkanizačního lisu. Vulkanizační lis je stroj, v němž probíhá finální fáze výroby pneumatik. Do formy vulkanizačního lisu se vkládá polotovar pneumatiky, který za působení definovaného tlaku a teploty získává svůj konečný tvar a konečné mechanické vlastnosti. U vulkanizačního lisu bylo možné provést měření termokamerou a zjistit, jaké nastavení simulace je vhodné k zajištění co nejlepší shody. Teplotní pole vulkanizačního lisu bylo validováno srovnáním výsledků modelu se snímkem z termokamery. Obě analýzy jsou podobné v tom, že vytápěná zóna má teplotu kolem 200°C, stroje mají podobné rozměry, rámy strojů mají obdobné tloušťky plechů a je používán totožný typ izolačních desek. Oba stroje jsou shodně umístěny v prostorách průmyslové haly. Na základě těchto předpokladů byl výpočet nastaven obdobným způsobem. Simulace vulkanizačního lisu byla vytvářena také v programu Abaqus CAE. Obrázek 3-33 a Obrázek 3-34 zobrazuje fotografie lisu, snímek z termokamery a vypočtené teplotní pole na vnějším plášti lisu. Ze srovnání je zřejmá dostatečná shoda. [22], [23], [24]



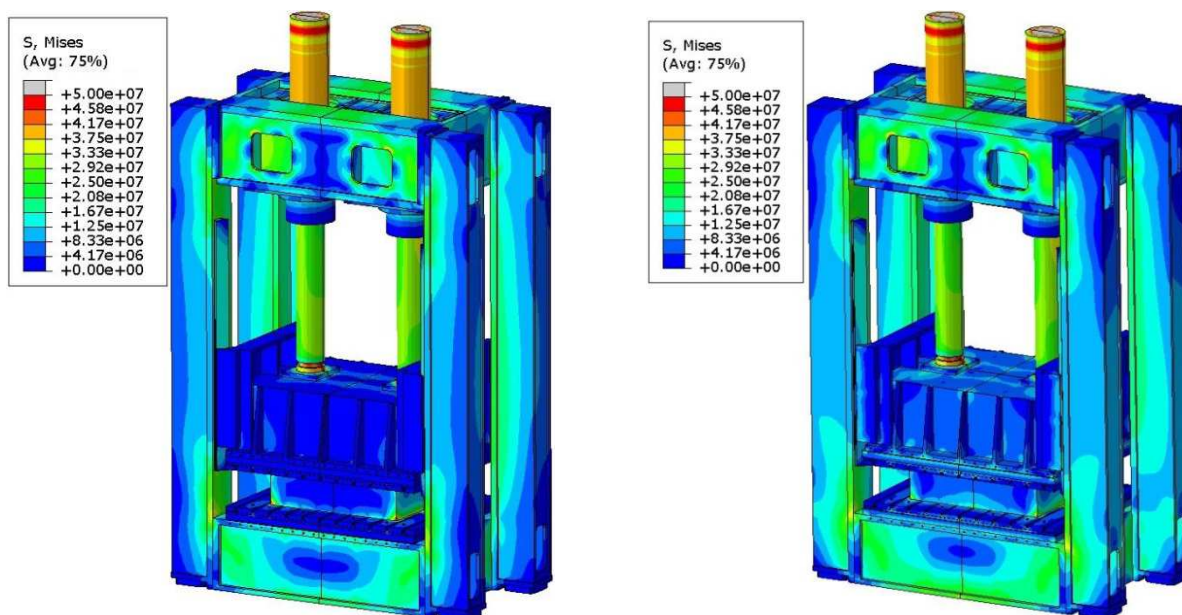
Obrázek 3-33: Fotografie vulkanizačního lisu a snímek z termokamery [24]



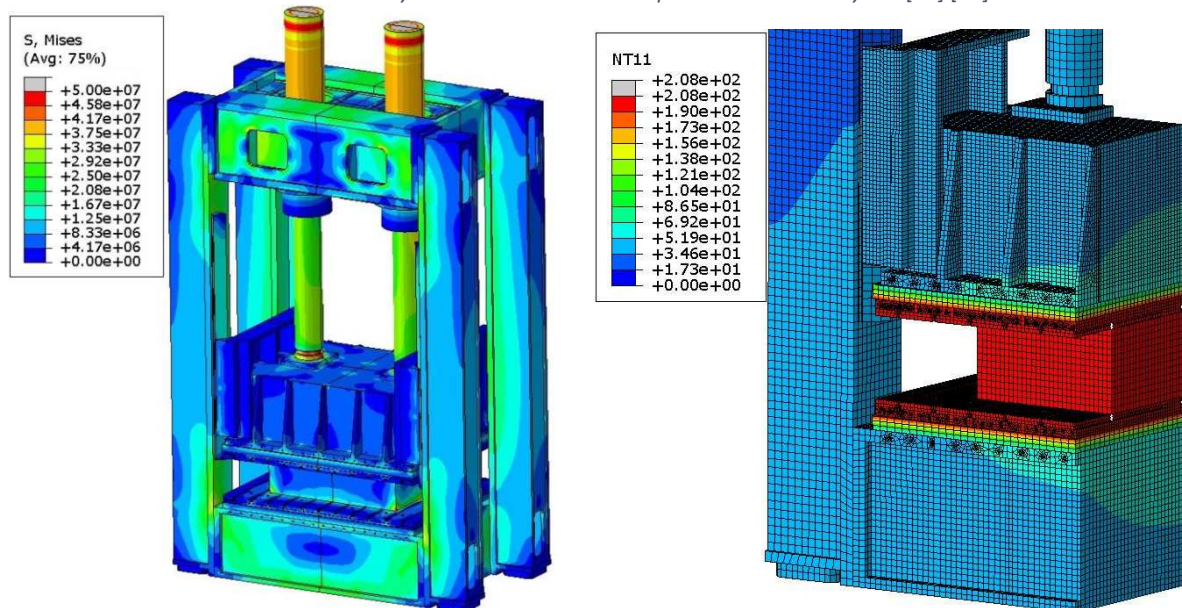
Obrázek 3-34: Vypočtené teplotní pole na validačním modelu vulkanizačního lisu [24]

### 3.5.9 Výsledky analýzy

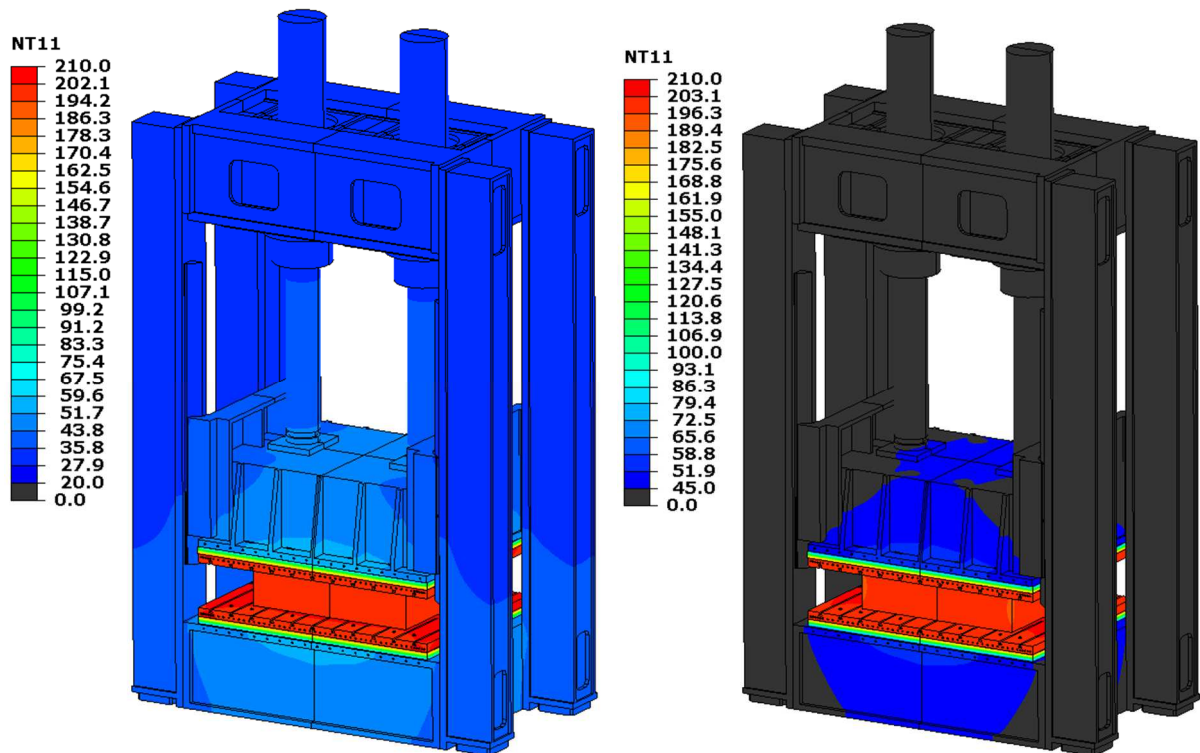
Redukované napětí dle HMM na rámu lisu ve výpočtech 1, 2 a 3 obvykle nepřesahuje 50 MPa, viz Obrázek 3-35 a Obrázek 3-36. Pro analýzy 4 a 5, kde je aplikováno pouze chlazení a vytápění, se na rámu lisu nevyskytuje žádné významné napětí. Přídavná deformace způsobená gravitací je nízká (4-6%) ve srovnání se zatížením lisovací silou. Teplotní pole analýz z 2 a 3 viz Obrázek 3-37 a Obrázek 3-38. Největší tepelné ovlivnění rámu je znatelné na beranu a stole lisu. Pro názornost jsou použité dvě stupnice, kde stupnice na obrázcích vpravo je ohraničena teplotou 45°C, což je maximální hodnota, která by na rámu lisu měla být naměřena. Hlavním účelem této analýzy bylo zjistit hodnoty rovinnosti rámu lisu (beranu a stolu) a na nich upevněných upínacích deskách. Hodnoty rovinností pro první tři analýzy viz Obrázek 3-40. Hodnoty rovinností ve dvou zbylých analýzách viz Obrázek 3-41. Vyhodnocení těchto hodnot je provedeno v další kapitole.



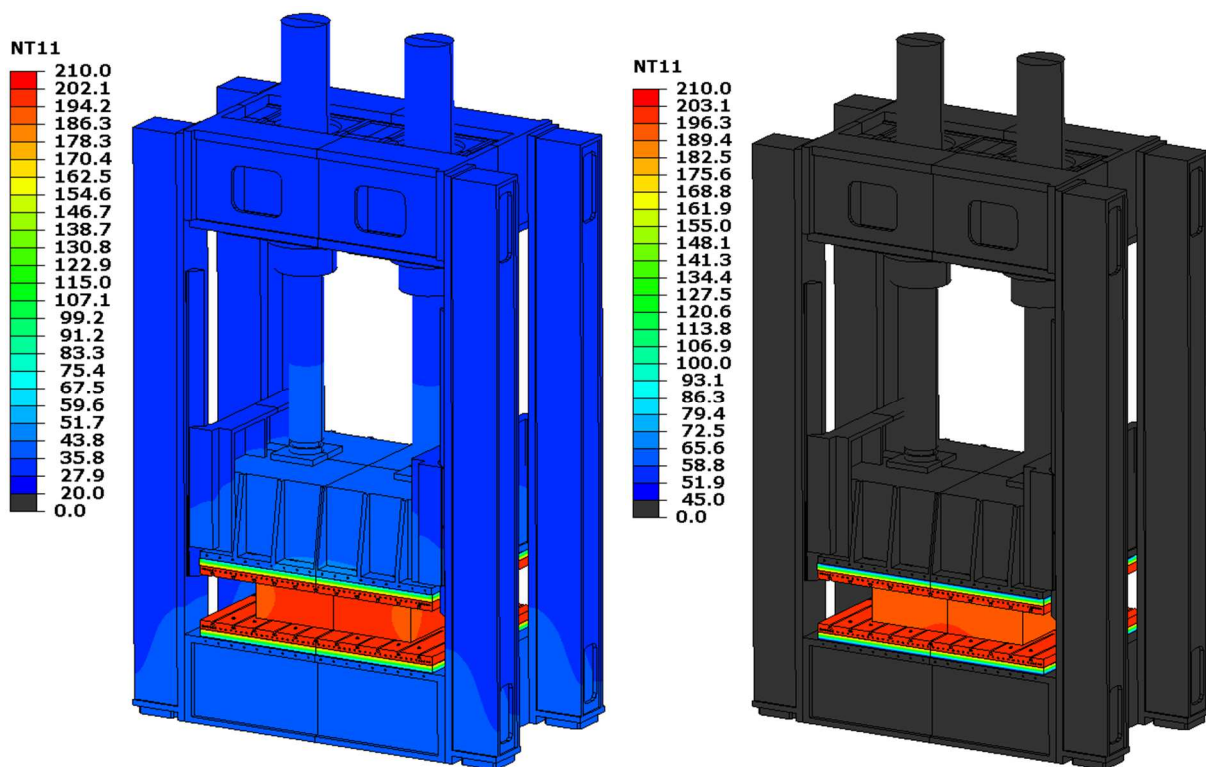
Obrázek 3-35: Analýza 1 a 2 – Redukované napětí dle HMM sestavy lisu [Pa] [25]



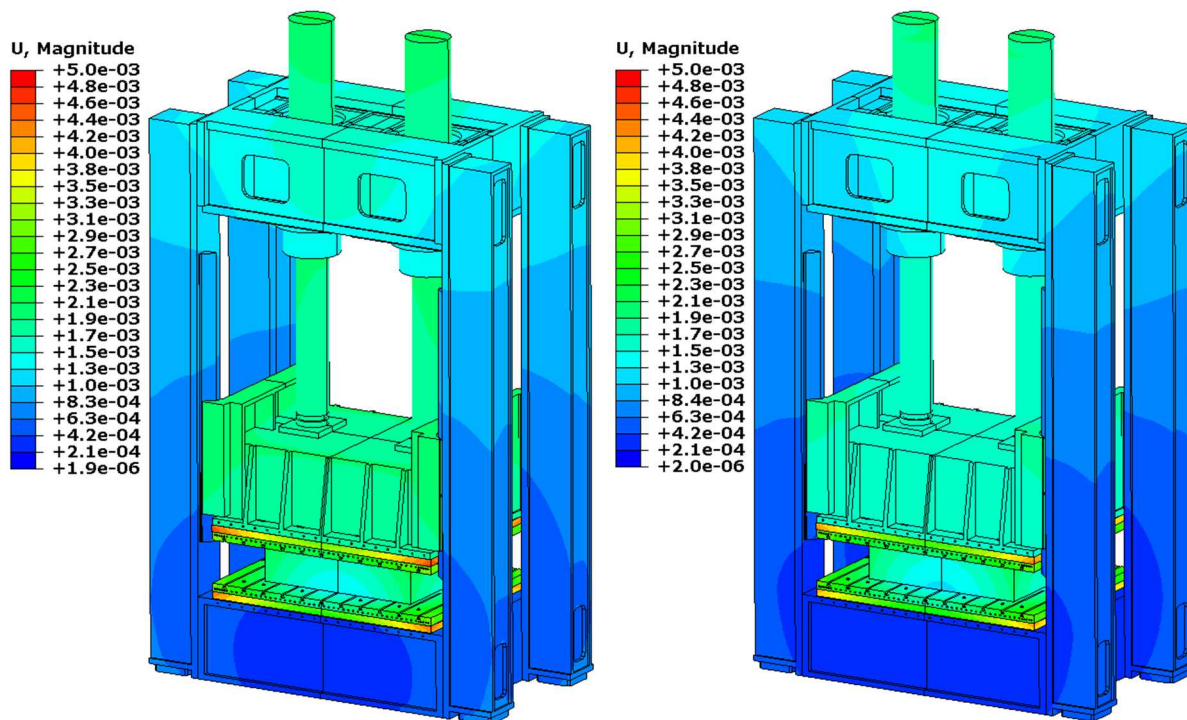
Obrázek 3-36: Analýza 3 - Redukované napětí dle HMM sestavy lisu [Pa] vlevo, Analýza 2 Teplotní pole lisu [°C] - pohled do roviny symetrie [25]



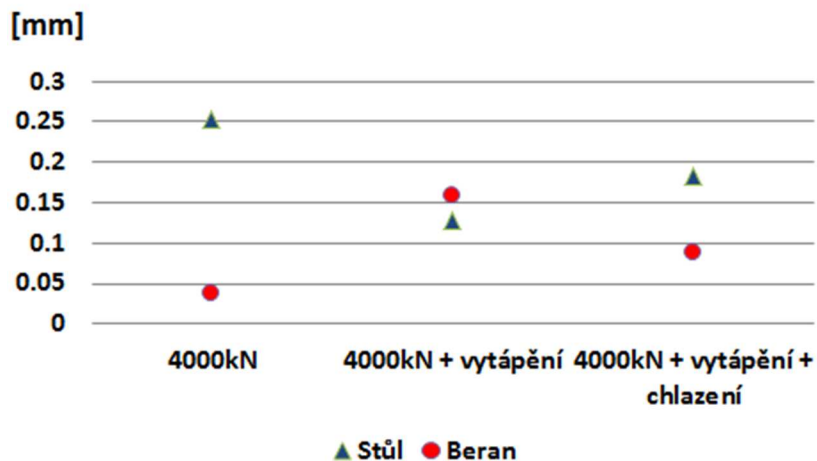
Obrázek 3-37: Analýza 2 – Teplotní pole na rámu lisu [°C], teplotní ovlivnění rámu lisu [°C] [26]



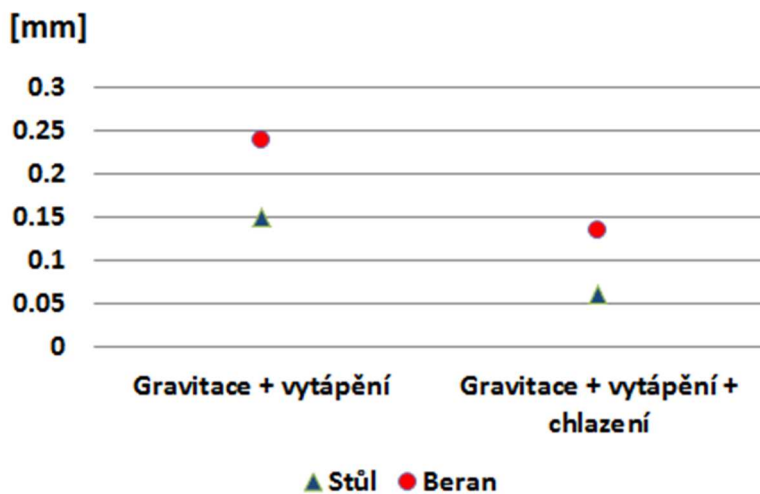
Obrázek 3-38: Analýza 3 – Teplotní pole na rámu lisu [°C], teplotní ovlivnění rámu lisu [°C] [26]



Obrázek 3-39: Analýza 2 (levý) a 3 (pravý) – Celkové posuvy na rámu lisu [m] [26]



Obrázek 3-40: Hodnoty rovinnosti pro analyzované plochy z analýzy 1, 2 a 3



Obrázek 3-41: Hodnoty rovinnosti pro analyzované plochy z analýzy 4 a 5

### 3.5.10 Vyhodnocení analýzy a metody pro zvýšení přesnosti

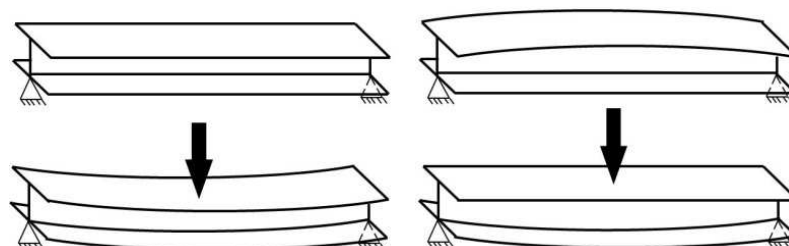
Stůl lisu se vlivem lisovacího zatížením deformuje násobně více než je tomu u beranu lisu, to je způsobeno nižší tuhostí stolu lisu. Dále je deformace u stolu lisu v porovnání s beranem ovlivněna uložením dílů, kde stůl lisu je oboustranně „vetknut“ (šroubový spoj s pery) se sloupy lisu zatímco beran je po sloupech veden a má dvě „podpory“ (pístnice hydraulických válců) umístěné nad nástrojem. Z grafu viz Obrázek 3-40 je patrné určité „narovnání“ stolu lisu vlivem teplotního rozdílu na horní a spodní ploše dílu, které působí opačně vůči deformaci způsobené lisovací silou. Tento jev se stejným způsobem objevuje i u beranu lisu, ovšem u beranu je deformace vlivem statického zatížení velmi malá a opačná deformace vlivem teplotního rozdílu převládne a výsledná deformace je větší. Na základě těchto zjištění lze definovat přístupy (metody), jak navrhovat rám lisu s vyšší přesností.

1) Navrhnout stůl a beran lisu velmi tuhý, díky čemuž by deformace od statického zatížení byla velmi nízká. Dále je nutné, aby prostup tepla do rámu lisu byl velmi nízký a nezpůsoboval tak teplotní deformace, s čímž souvisí vyšší tloušťka izolace, popřípadě doplnění chlazení do rámu. Tento přístup vyžaduje vyšší materiálové náklady na rám lisu a izolaci. Dále také zvýšené provozní náklady na chlazení rámu lisu.

2) Další možností je navrhnout stůl (popřípadě beran) lisu s takovou tuhostí, že deformace od statického zatížení bude do určité míry eliminována teplotním průhybem způsobeným rozdílem teplot na dílu. Výhodou tohoto přístupu jsou nižší materiálové náklady na rám a izolaci. Tento přístup ovšem vyžaduje dobrou znalost zatížení a teplotního pole na lisu. Numerická analýza pro optimalizaci tuhosti rámu a tloušťky izolace je v tomto případě náročnější. Hodnota teplot na rámu též nemůže být příliš vysoká, aby nedocházelo k příliš velkým tepelným ztrátám do okolí. Tak, jak je beran lisu navržen, odpovídá spíše prvnímu přístupu, přičemž méně tuhý stůl lisu více odpovídá tomuto přístupu. V případě reálného stroje je třeba k celkové přesnosti připočítat i výrobní a montážní nepřesnosti.

3) V některých případech není z různých důvodů (rozměry, technologie atd.) možné vyrobit rám natolik tuhý, tak jak by byl požadován. Proto se využívají různé metody eliminace pružnosti rámu. Například u válcovacích stolic se běžně používají bombírované válce pro dosažení dostateční přesnosti. Tento přístup je využitelný i v případě traverzy (stolu) lisu. Na základě tohoto přístupu lze vyrobit např.: horní plochu stolu „bombírovanou“ dle předpokládané hlavní ohybové křivky. Tento přístup může přinést značné materiální úspory. Obecné vysvětlení tohoto principu viz Obrázek 3-42. Nevýhodou může být vyšší výrobní cena zakřivené plochy stolu.

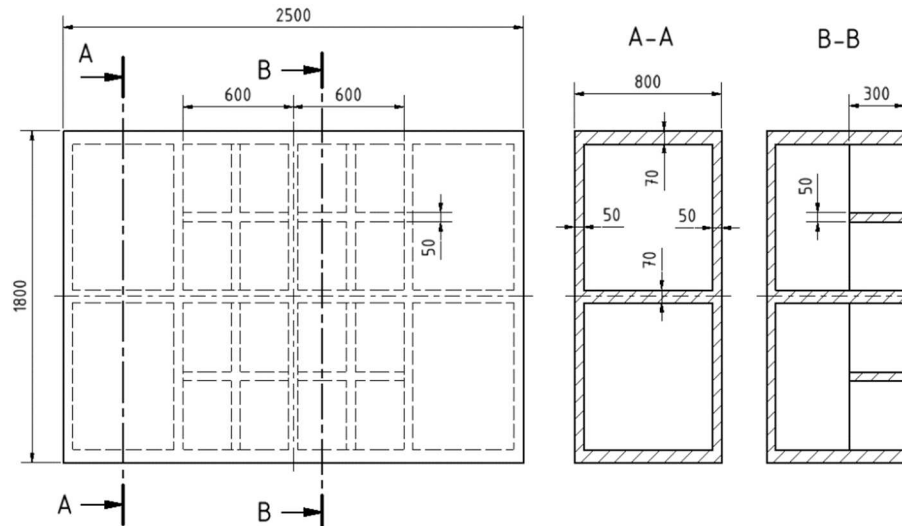
Pro poslední dva zmíněné přístupy je nutné mít velmi kvalitní MKP model a přesně znát zatěžování lisu.



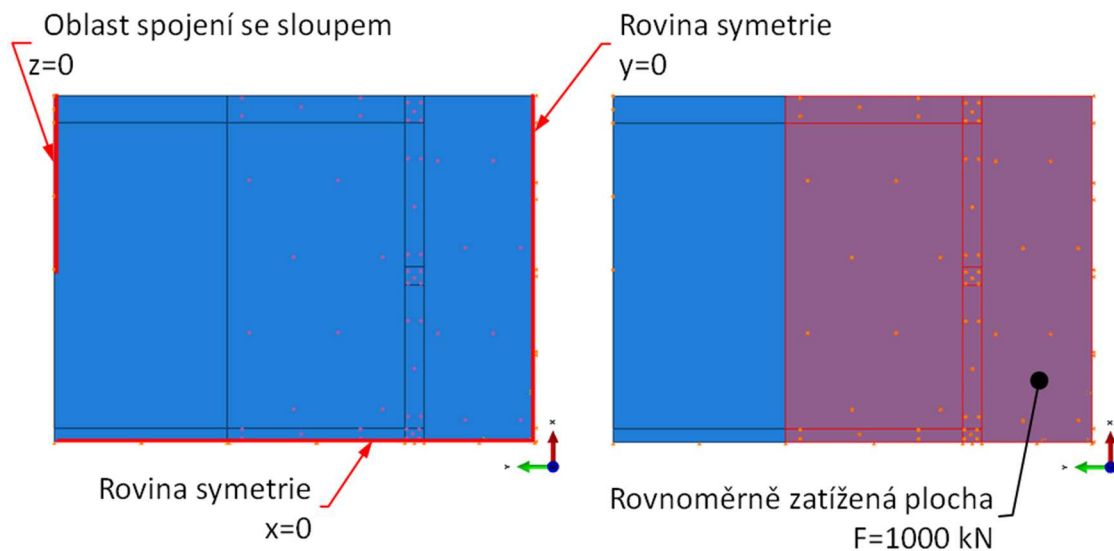
Obrázek 3-42: Rovný I profil a bombírovaný I profil [25]

### 3.5.11 Analýza metod pro zvýšení přesnosti na modelu stolu

Pro ilustraci možných přístupů k návrhu byl navržen upravený model stolu. U tohoto modelu byla pevně stanovena geometrie, rozměry stolu viz Obrázek 3-43. Byla modelována 1/4 stolu, která byla centricky zatěžována. Obrázek 3-44 popisuje okrajové podmínky aplikované na modelu stolu lisu.



Obrázek 3-43: Model stolu lisu pro samostatnou analýzu



Obrázek 3-44: Půdorysný pohled na 1/4 lisu - okrajové podmínky

#### Přehled řešených analýz

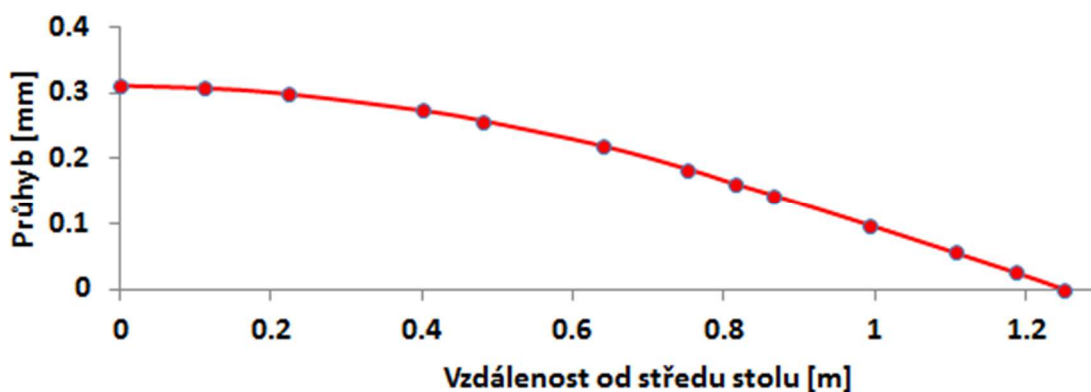
1. Stůl lisu je zatížen silou 4000 kN. Stůl není teplotně ovlivněn.
2. Stůl lisu je zatížen silou 4000 kN. Na stole je nastaven teplotní rozdíl 12 °C mezi horní a spodní plochou. Teplotní rozdíl je idealizován a byl stanoven iterativní metodou pro zajištění co nejnižší hodnoty rovinnosti.
3. Stůl lisu je zatížen silou 4000 kN. Rám lisu není teplotně ovlivněn. Geometrie stolu lisu je modifikována dle ohybové křivky z prvního výpočtu (dle hlavní osy ohybu).

Získaná přesnost je velmi závislá na zatěžování rámu, jeho velikosti a centricitě. Křivka pro povrch stolu pro metodu se zakřiveným povrchem byla získána výpočtem 1, křivka viz Obrázek 3-45. Teoreticky je možné se zakřiveným povrchem dosáhnout absolutně rovinného povrchu, a to za předpokladu, že povrch bude zakřiven ve 3D dle výsledků ve všech výpočtových uzlech. Získané hodnoty výsledků viz Tabulka 17.

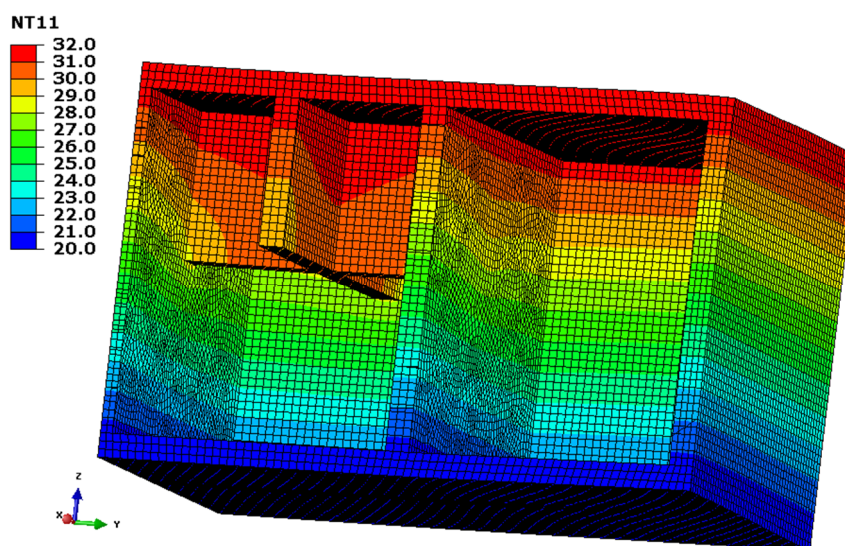
Tabulka 17: Rovinnosti zkoumané plochy

	Výpočet 1	Výpočet 2	Výpočet 3
Rovinnost [mm]	0.343	0.151	0.037

Z výsledků je zřejmé, že použitím teplotní metody (výpočet 2) a metody se zakřivením povrchu (výpočet 3) lze dosáhnout velmi dobrých výsledků. Idealizované teplotní pole ve výpočtu 2 viz Obrázek 3-46. K těmto výsledkům by bylo nutné přičíst vyšší nerovnoměrnost teplotního pole na rámu lisu. U všech řešení platí, že jsou dále ovlivněné výrobními a montážními nepřesnostmi.



Obrázek 3-45: Průhyb stolu lisu z výpočtu 1 – Křivka použita pro „bombírování“ horní plochy stolu ve výpočtu 3.



Obrázek 3-46: Teplotní pole stolu z druhé analýzy stolu lisu [°C]

Pro porovnání jednotlivých přístupů ke koncipování návrhu konstrukce rámu stroje je provedeno vyhodnocení viz Tabulka 18. Z porovnávací tabulky je patrné, že pro dosažení nejlepších výsledků při stejné materiálové náročnosti je třeba vyvinout značné úsilí v oblasti simulací, měření nebo výroby.

Tabulka 18: Porovnání jednotlivých přístupů při návrhu

	1	2	3
Výpočetní náročnost	Normální - 2	Náročná - 4	Zvýšená - 3
Výroba	Normální - 2	Normální - 2	Náročná - 4
Jistota vstupních parametrů	Normální - 2	Vysoká - 4	Vysoká - 4
Dosažitelná teoretická přesnost	Normální - 2	Zvýšená - 3	Vysoká - 4

Stupnice vyhodnocení: 1 - Snadná, 2 - Normální, 3 - Zvýšená, 4 - Vysoká

### 3.6 Experimentální měření posuvů na lisu 4000 kN

Toto měření bylo provedeno za účelem ověření výsledků výpočtového modelu lisu 4000 kN. Měření bylo provedeno na skutečném stroji (viz Obrázek 3-48) měřícím zařízením Leica Laser Tracker LTD800. Měřící zařízení viz Obrázek 3-47. V tomto případě bylo zvoleno bodové měření příkládáním měřící koule s reflektorem. Přesnost měřícího zařízení je 10  $\mu\text{m}$  +5  $\mu\text{m}/\text{m}$ . Pro účely validace výpočtového modelu byl model upraven tak, aby geometrie měřeného a výpočtového modelu byla totožná.

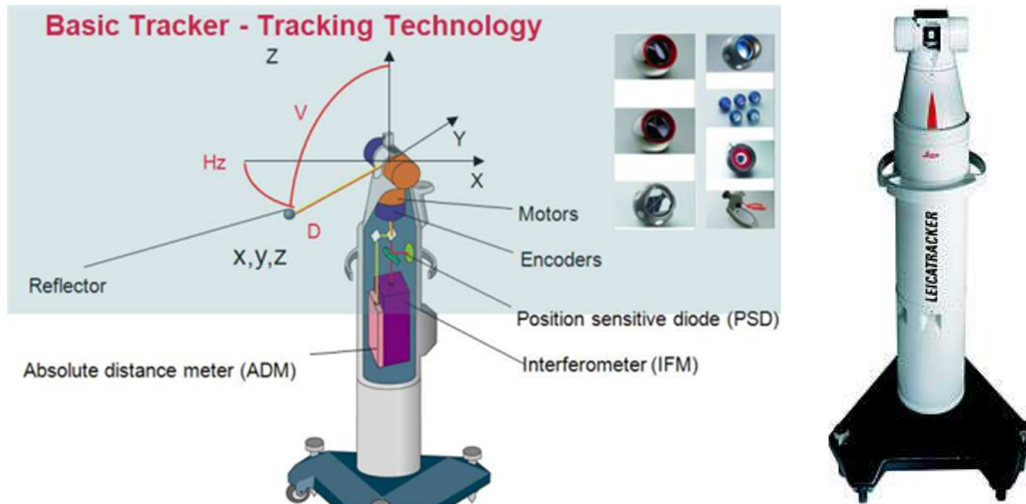
Upínací deska byla pro účely měření orýsována rastrem bodů a na tyto body byla poté příkládána měřící koule. Měřený lis a detail orýsování upínací desky viz Obrázek 3-48. O měření upínacích desek u lisů pojednávají například normy: ISO 6899, JIS B6403, IS 14877. Měřen byl spodní stůl, kde je vyšší hodnota deformace (posuvů) a výsledky měření nejsou tolik zatíženy výrobními a montážními tolerancemi, jako je to v případě beranu, kde jsou vypočtené celkové posuvy na upínací desce menší.

První měření bylo provedeno na spodní upínací desce v nezatíženém stavu, bez upnutého nástroje. Tímto měřením byly zjištěny výrobní a montážní odchylky v jednotlivých měřených bodech celé plochy upínací desky.

Pro druhé měření posuvů vlivem lisovací síly byla do lisu umístěna forma. Forma byla umístěna do osy lisu tak, aby byl lis centricky zatížen. Forma byla uzavřená symetricky na dorazy (nebyl do ní umístěn polotovar, který by způsobil přidavné boční síly). Měřeny byly body, ke kterým byl umožněn přístup okolo formy, tzn., že body pod formou nejsou v tomto měření zahrnuty.

Předpokládané výrobní tolerance, které byly měřením ověřeny, je nutné pro ověření posuvů upínací desky „odfiltrvat“. Byla tedy navržena metoda, která tyto nepřesnosti eliminuje. Podstatou této metody je, že posuv bodů v ose „z“ z druhého měření je vyhodnocován vůči referenční ploše, která byla vytvořena z bodů prvního měření. Plocha byla vytvořena proložením naměřenými body. Příklady hodnot posunutí ve vybraných uzlech a rovinnost upínací desky u validačního modelu viz Tabulka 19.





Obrázek 3-47: Měřicí systém Leica Laser Tracker LTD800 [27], [28]

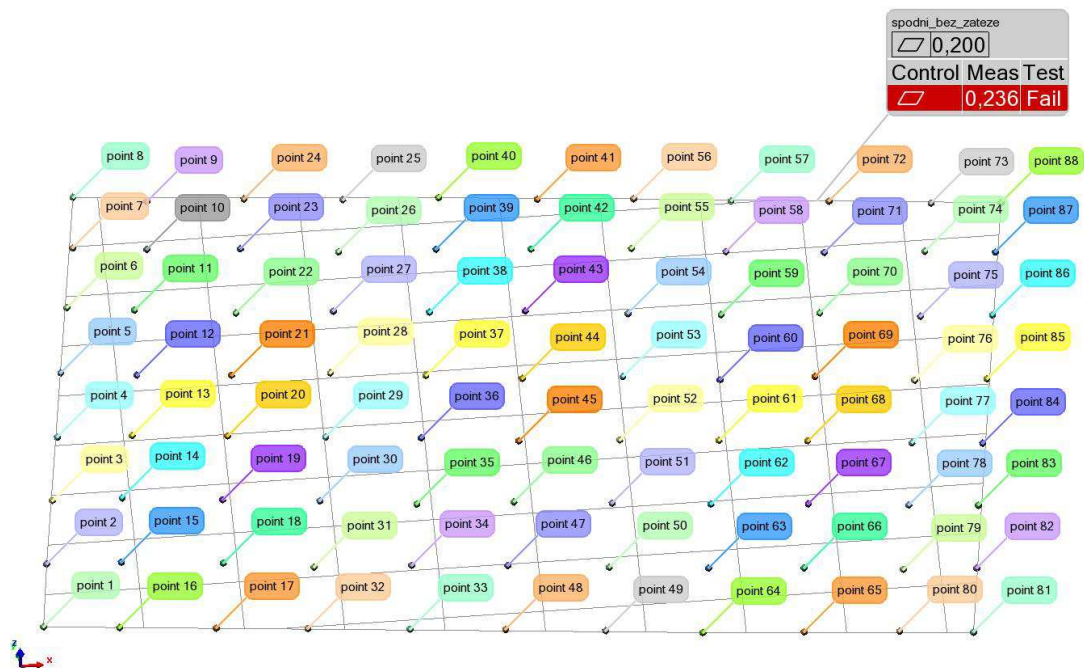


Obrázek 3-48: Lis 4000 kN použitý pro experimentální ověření posuvů a detail orýsování upínací desky

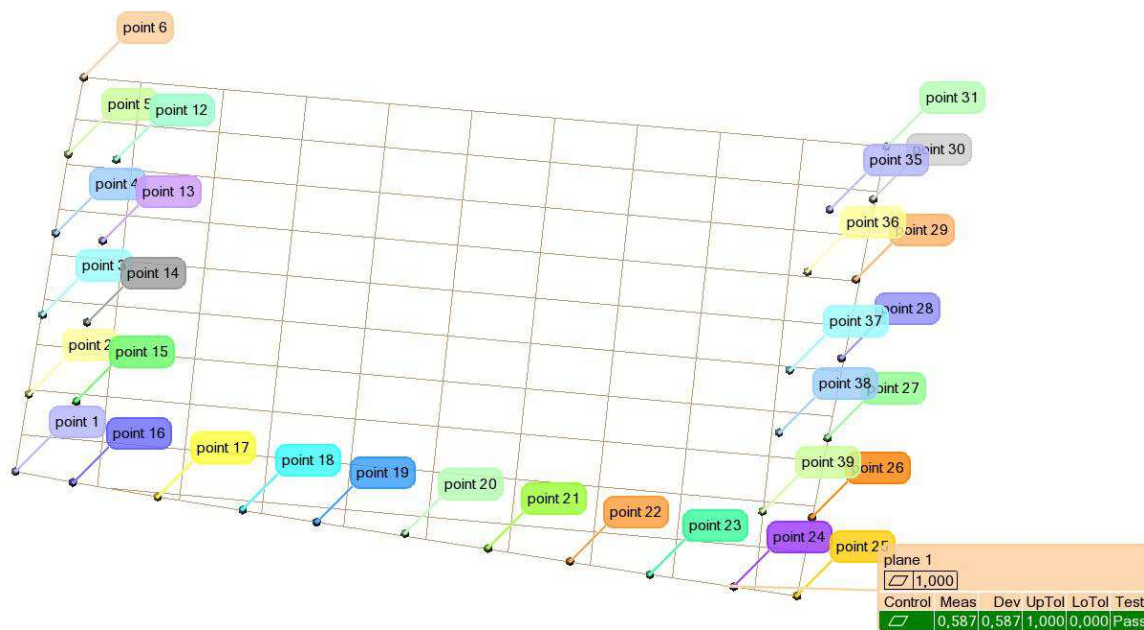
Tabulka 19: Hodnoty posuvů uzlů na validačním výpočtovém modelu

	<b>Uzel</b>	<b>Posuvy spodní desky při zatížení 4000kN + gravitace [mm]</b>
	1	-6,823
	2	-6,552
	3	-6,777
	4	-6,500
<b>Rovinnost [mm]</b>	<b>0,32</b>	

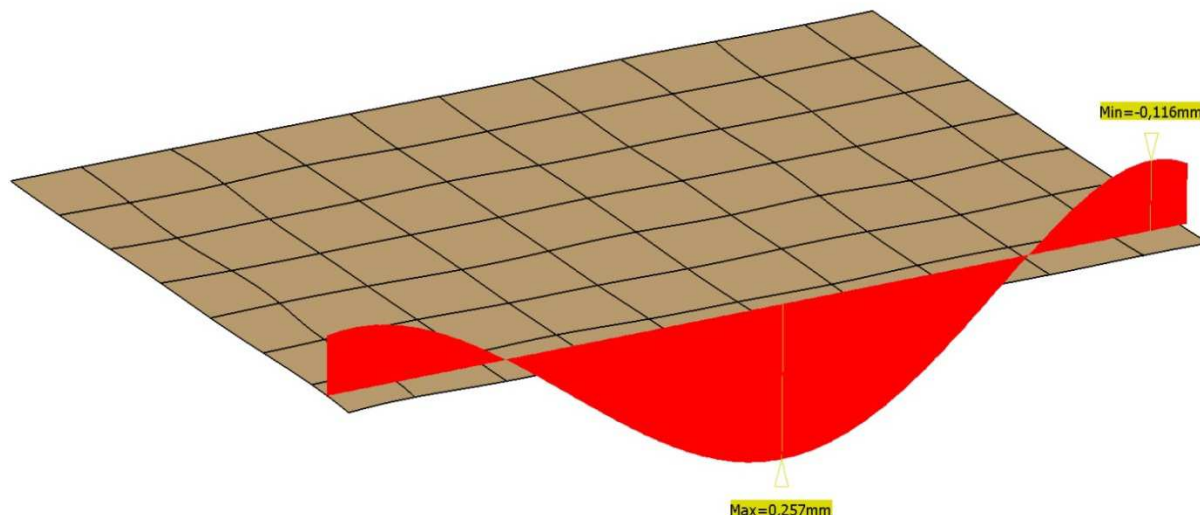
Obrázek 3-49 a Obrázek 3-50 zobrazují výstup z programu PolyWorks, který umožňuje grafické zobrazení naměřených bodů a následné vyhodnocení. Zde byla vyhodnocována rovinnost upínací desky. Hodnota rovinnosti je vyhodnocována vůči rovině, kterou program stanoví metodou nejmenších čtverců vzhledem k naměřeným bodům. Rovina proložená body z prvního měření a vůči ní vyhodnocované body z druhého měření viz Obrázek 3-51. Naměřené a vypočtené hodnoty rovinnosti a průhybu na měřeném pásu bodů viz Tabulka 20 a Tabulka 21.



Obrázek 3-49: Naměřený rastr bodů na spodní upínací desce v prvním měření bez zatížení a upínací desky



Obrázek 3-50: Naměřený rastr bodů ve druhém měření s upnutým nástrojem a lisovací silou 4000 kN



Obrázek 3-51: Vyhodnocení druhého měření vůči referenční ploše definované body z měření bez zatížení

Tabulka 20: Rovinnosti

	Rovinnost [mm]
Výpočtový model validační - zatížení 4000 kN + gravitace	<b>0,32</b>
První měření (vyhodnocení v programu PolyWorks, Obrázek 3-49) - upínací deska bez zatížení - výrobní a montážní nepřesnosti	0,236
Druhé měření (vyhodnocení v programu PolyWorks, Obrázek 3-50) - upínací desky se zatížením (rovinnost vyhodnocená z plochy okolo formy, do hodnocení jsou zahrnuty výrobní a montážní nepřesnosti)	0,587
Vyhodnocení měření - rovinnost s použitím referenční plochy z prvního měření (Obrázek 3-51) bez doplnění z MKP modelu pod nástrojem	0,37
Vyhodnocení měření - rovinnost s použitím referenční plochy z prvního měření (Obrázek 3-51) s doplněním hodnot z MKP modelu pod nástrojem	<b>0,42</b>

Tabulka 21: Průhyby na měřeném pásu bodů

	Průhyb na měřeném pásu bodů [mm]
Výpočtový model validační - zatížení 4000 kN + gravitace	<b>0,28</b>
Hodnota průhybu stanovená vůči referenční ploše	<b>0,37</b>

### 3.6.1 Závěry z měření

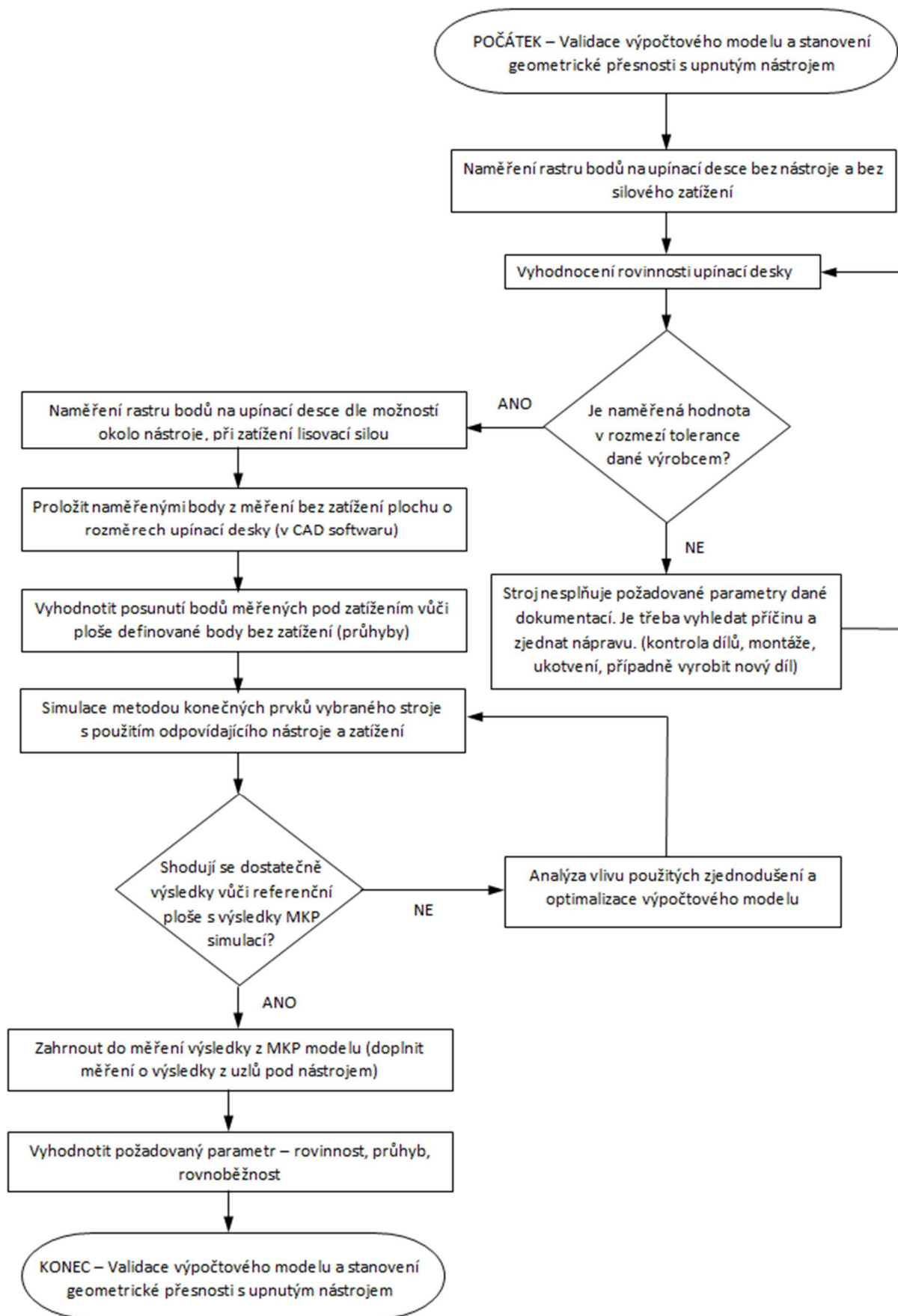
Bylo potvrzeno, že hodnoty výrobních a montážních tolerancí mají u takto rozměrného lisu zásadní vliv na vyhodnocení výsledků v zatíženém stavu. Za předpokladu, že se upínací deska deformuje pod nástrojem stejně jako ve výpočtovém modelu, tak by byla hodnota rovinnosti o 0,05mm vyšší, a to 0,42mm. Z porovnání vypočtené (0,32mm) a doplněné hodnoty rovinnosti o vypočtené uzly pod formou (0,42mm) a z porovnání hodnoty

vypočteného (0,28mm) a měřeného (0,37mm) průhybu na měřeném pásu bodů plyne, že hodnoty průhybů jsou o ca 30% vyšší než vypočtené. Při návrhu stroje je tedy nutné toto zohlednit. Vliv na vyšší tuhost výpočtového modelu má použité zjednodušení ve formě pevné vazby mezi sloupy lisu a spodním stolem, které je oproti spoji perem a šrouby tužší. Přidáním dalších kontaktů a náhrad šroubových spojů je možné výpočet zpřesnit. Tato úprava výpočtového modelu má ovšem za důsledek prodloužení výpočtového času.

### 3.6.2 Návrh metodiky a doplnění normy pro měření lisů

Na základě zvyšujících se požadavků zákazníků je požadováno měření lisu s upnutým zatíženým nástrojem a následné vyhodnocení – rovinnosti, rovnoběžnosti a průhybů (deformací) způsobených zatížením. Toto měření, respektive jeho metodiku a vyhodnocení, v současné době normy neobsahují. Navržená metodika z těchto norem vychází a doplňuje jejich „nedostatky“ – odstranění výrobních nepřesností z měření pro analýzu průhybů (deformací), doplnění měření o vypočtené hodnoty v nepřístupném prostoru pod nástrojem. Metodika umožňuje komplexní vyhodnocení přesnosti/deformací celé plochy upínací desky při měření s upnutým konvenčním nástrojem. Návrh těchto změn (doplnění) normy respektuje požadavky zákazníků a možnosti výpočtových a měřících metod používaných v současné době. Metodika pro určení geometrické přesnosti upínací desky lisu při zatížení s nástrojem je popsána vývojovým diagramem. Vývojový diagram viz Obrázek 3-52.

Měřící metody a postupy jsou též velmi žádoucí pro ověření a praktickou rekonfiguraci při použití „nekonvenčních“ metod při návrhu rámu stroje (teplotní metoda, metoda s předpokládaným zakřivením povrchu, aktivní regulace přesnosti se silovým členem viz kap. 4.1). Pro tyto případy by bylo vhodné doplnit navrženou metodiku měření vzhledem k těmto metodám a konkrétním případům. Toto ovšem přesahuje rámec této práce.



Obrázek 3-52: Vývojový diagram

## 4 Shrnutí

### 4.1 Zobecnění jednotlivých fyzikálních metod a způsobů dosažení požadované/vyšší přesnosti u lisů

- Metoda změny tuhosti – Základní metoda dosahování tuhosti přidáváním materiálu, změnou geometrie a volbou typu materiálu, či změnou uložení.
- Teplotní metoda - Pracuje s tepelným ovlivněním rámu stroje
  - vlivem okolí – vlivem přestupu či vedení tepla do součástí dojde ke změně/zlepšení provozních vlastností a pracovní přesnosti
  - nucená - rám nebo část stroje je úmyslně vyhřívána (chlazena) za účelem dosažení vyšší přesnosti
- Metoda s použitím předpokládané deformace – Výpočet ohybové křivky u strojní součásti a následné upravení povrchu pro dosažení vyšší přesnosti (známé zejména u bombírovaných válců válcovacích stolic)
- Metoda s využitím silového členu
  - Silový člen je použit pro aktivní regulaci nežádoucích statických posuvů rámu lisů. Zdrojem síly může být např.: hydraulický válec, lineární pohon, mechanismus atd.
  - Silový člen je použit pro aktivní regulaci kinematické přesnosti (přesnosti pohybu) výstupního členu lisu. Tyto členy mohou být dále děleny na:
    - Aktivně řízené - příkladem může být hydraulické vyrovnávání pohybu traverzy s jedním centrálně umístěným lisovacím válcem a dvěma postranními válci, které traverzu současně dorovnávají.
    - Se silou vyvolanou deformací vyrovnávacího členu – příkladem může být mechanismus se zkruťnými tyčemi, jehož dalším vlivem je utlumení vibrací a rázů na dráze zdvihu nástroje.

#### 4.1.1 Možnosti a omezení jednotlivých metod

##### Metoda změny tuhosti

- Standardně používaný přístup při návrhu strojů
- Vysoká materiálová náročnost pro dosažení vysokých přesností
- Výsledná přesnost je daná při návrhu stroje a následná korekce je vysoce problematická (doplnění výztuh, navařování plechu atd.)

##### Teplotní metoda

- Možnost řízené regulace deformací
- Použitelné zejména u horkých procesů s velkým tepelným zdrojem (kde je část stroje vyhřívána vlivem technologického procesu)

- V případě záměrného vyhřívání/chlazení (nuceně) nesmí teploty ovlivnit technologii a obsluhující personál
- Použitelnost pouze u rozměrných lisů nad 1m šířky
- Ovlivnitelnost přesnosti je cca 0,1 mm na 1 m délky
- Dlouhá odezva – náběh na ustálený stav lisu pro zahájení výroby
- Vysoká energetická náročnost – Je vhodné hledat způsoby využití odpadního tepla z jiných procesů pro vyhřívání, či využít teplo odvedené chlazením na jiné potřeby
- Možnost dodatečného doplnění na stávající stroj např. při renovacích

#### **Metoda s použitím předpokládané deformace**

- Vysoká náročnost na opracování
- Možnost dosažení velmi vysoké přesnosti
- Snížený rozsah použitelnosti lisu – Rozměry nástrojů a potřebné síly musejí být obdobné jako ve výpočtu, jinak dochází ke snížení přesnosti lisu
- Možnost dodatečného obrobení u stávající stroj např. při generálních opravách či renovacích

#### **Metoda s využitím silového členu**

- Možnost aktivní regulace s okamžitou odezvou
- Nižší energetická účinnost
- V koncepci lisu musí být počítáno s větší zástavbou vlivem silového členu a jeho pohonů
- Možnost dodatečného doplnění na stávající stroj např. při renovacích

## **4.2 Zobecnění procesních metod pro dosažení požadované/vyšší přesnosti u lisů**

Jednotlivé stupně „evoluce“ procesů využívaných při řešení výpočtové části návrhu lisu lze rozdělit na čtyři základní stupně (typy). Mezi jednotlivými stupni není ostrá hranice a mohou se vzájemně prolínat, každý vyšší stupeň obsahuje prvky a metody předchozího a ty dále rozvíjí. Čím je evoluce procesů vyšší, tím vyšší je propracovanost báze shromážděných dat a provázanost mezi jednotlivými konstrukčními prvky. S vyšším stupněm se zvyšuje pravděpodobnost nalezení přesnějšího a ekonomicky výhodnějšího řešení a je kladen vyšší nárok na následné měření, vyhodnocení, vytváření souvislostí a archivování dat.

1. Stupeň „Základní“ – Obvykle je řešena jen jedna varianta intuitivně zvoleného návrhu lisu. Tato varianta je výpočetně řešena a mohou u ní být provedeny geometrické optimalizační analýzy. Při návrhu chybí báze dat znalostí jednotlivých zjednodušení, vhodných prvků a přesnosti vypočtených dat na výpočtovém modelu.
2. Stupeň „Rozšířený“ – U konstrukčního návrhu lisu je prováděno výpočtové vyhodnocení vybraných kombinací konstrukčních prvků, strojních částí a technických řešení, avšak chybí jejich vztahy a provázanost.
3. Stupeň „Pokročilý“ – Je budována báze znalostí na základě výpočtů a vyhodnocení jednotlivých konstrukčních prvků a strojních částí uváděných do vzájemného vztahu.

Souvislosti (vzájemné ovlivnění) mezi jednotlivými prvky poté umožňují eliminaci nevhodných řešení a nalezení řešení optimálního. Výpočtové modely jsou ověřovány měřeními.

4. Stupeň „Integrovaný“ – Je vybudovaná báze znalostí výpočtových metod a konstrukčních provedení ve vazbě na jejich dosažitelnou přesnost, a ta je doplněná o použití sofistikovaných méně konvenčních metod (teplotní metoda, metoda s využitím silového členu, metoda s použitím předpokládané deformace). Pro návrh lisu a tvorbu výpočtového modelu stejně jako pro následné měření jsou zpracovány metodiky.

Tabulka 22 popisuje požadované vstupy a výstupy s použitím jednotlivých stupňů evoluce procesů pro dosažení požadované přesnosti.

Tabulka 22: Vstupy a výstupy u jednotlivých stupňů integrace procesů

	Stupeň 1	Stupeň 2	Stupeň 3	Stupeň 4
Náročnost přípravy CAD modelu pro výpočet jednoho lisu [hodin]	2-25	50-80	150 a více	-
Náročnost tvorby MKP modelu pro výpočet jednoho lisu [hodin]	2-15	30-60	100 a více	-
Počet vyráběných kusů / Sériovost výroby [ks]	1-3	2-10	10 a více	20 a více
Požadavek na vyspělý MKP řešič (Nelineární úlohy, sdílení tepla...)	Není	Ano	Ano	Ano
Požadavky na měření a pokročilé metody ověření	Žádné / nízké	Nízké	Ano	Ano
Potenciál nalezení „sub-optimálního“ řešení	Nízký / nezaručený	Střední / nezaručený	Vysoký	Vysoký
Dosažitelná přesnost a shoda s výsledkem	Proměnná / Nejistá	Střední / Nejistá	Vysoká	Vysoká
Možnost dodatečného ovlivnění přesnosti v praxi	Ne	Ne	Nízká	Ano
Úroveň báze znalostí	Žádná	Počátek budování	Budovaná a doplňovaná	Obsáhlá báze doplněná o nekonvenční metody

### 4.3 Doporučení a možnosti uplatnění výsledků práce v praxi

- Souhrn výsledků jednotlivých kapitol vytváří bázi dat a postupů, se kterými lze efektivně řešit návrh stroje dle požadovaných parametrů. Výsledky práce by měly usnadnit rozhodování při návrhu koncepce lisu vzhledem k požadované přesnosti.
- Z výsledků výpočtové analýzy jednotlivých konstrukčních prvků v morfologické matici stroje (viz Tabulka 7) plyne vliv na přesnost jednotlivých strojních prvků a koncepcí rámu stroje. Tyto výsledky dávají přehled o tom, jakou koncepci je možné použít pro



požadovanou přesnost. Koncepce a prvky, které splňují přesnost, je poté nutné podrobit technickoekonomickému zhodnocení a vybrat výslednou variantu.

- V případě, že obvyklé konstrukční prvky či koncepce stroje neumožňují dosažení požadované přesnosti v přijatelném ekonomickém rámci (velikost rámu, cena vedení atd.), je vhodné aplikovat některou z méně konvenčních metod zobecněných v kap. 4.1.
- Pro výrobce lisů je výhodné vytvořit si „standardizované“ validované výpočtové modely (Se znalostí vhodné velikosti a typu elementů, se znalostí možností a vlivů použitých zjednodušení a náhrad strojních částí atd.). S použitím kvalitně vytvořeného výpočtového modelu je pak možné snadněji eliminovat nevhodné konstrukční řešení a snížit množství dodatečných úprav v prototypové výrobě.
- Navrženou metodiku pro doplnění vypočtených hodnot z MKP výpočtu do měření je možné obecně použít tam, kde je měření požadováno, avšak není zcela umožněno. V návrhu metody měření a vyhodnocení je zásadně snížen vliv výrobních a montážních nepřesností. Tento způsob úpravy výsledků je též možné obecně využít.
- Při dosažení vyšší přesnosti u některé z částí lisu může být sníženo namáhání komponent, jako jsou např.: vedení stolů, vedení pístnic hydraulických válců, těsnění válců atd. Čímž je pozitivně ovlivněna životnost dílů a výsledná spolehlivost stroje.
- Vždy je nutné ověřit, zda finanční investování do složitějších simulací má dostatečný potenciál pro ekonomickou návratnost.

## Závěr

Práce zohledňuje aktuální požadavky firem, které vyrábějí a provozují lisy popisované v této práci. Nároky na přesnost výrobků se s vývojem nových moderních produktů stále zvyšují. Zvýšená přesnost výrobku zvyšuje požadavky na přesnost stroje, a ta je hlavní řešenou oblastí v této práci. Všechny cíle práce stanovené v úvodní části byly plněny v etapách, popsanych v jednotlivých kapitolách práce.

V rešeršní části práce je čtenář uveden do oblasti tvářecích strojů, která se po obecném rozboru zaměřuje na oblast hydraulických lisů. V této části je provedena rešerše výrobců hydraulických lisů a je uvedena teorie hydraulických pohonů a technologických možností těchto lisů. Dále je uvedena teorie týkající se přesnosti lisů a jsou popsány postupy a normy pro měření přesnosti lisů. Teoretická část se dále zabývá teorií související s dosažením tuhosti a přesnosti stroje. Vzhledem k velkému množství různých typů lisů bylo vybráno zaměření na lisy používané v automobilovém průmyslu. U těchto lisů je popsána obvyklá technologie výroby, materiály vyráběných dílů a používané typy nástrojů.

Praktická část disertační práce je po úvodu věnována výpočetním analýzám na třech silově odstupňovaných lisech 30 kN, 1000 kN a 4000 kN s odlišnou konstrukcí a zatěžovacími vlivy.

U lisy 30 kN je provedena geometrická sub-optimalizace rámu stroje, u které je detailně popsán její postup. Tento postup je vhodný pro konstruktéra/vývojáře, který má k dispozici základní typy řešičů, obvykle implementovaných do „levných“ CAD systémů. Dále je u tohoto typu lisy navržena aktivní regulace deformací od lisovacího zatížení.

Část týkající se lisy 1000 kN vyhodnocuje vybrané strojní prvky a koncepce stroje na základě vytvořené morfologické matice. Jednotlivé strojní části a koncepce stroje jsou posuzovány hlavně z hlediska jejich vlivu na dosažitelnou přesnost. Pro odpovídající nastavení výpočtu lisy bylo provedeno experimentální měření síly nutné na stlačení polotovaru.

V další části jsou provedeny výpočty lisy 4000 kN, u kterého je vyhodnocováno teplotní ovlivnění stroje a možnosti i metody jeho řešení. Možnosti navržených metod pro dosažení vyšší přesnosti jsou dále prezentovány na zjednodušeném modelu stolu. Vypočítané deformace upínacích desek lisy byly ověřeny měřením s požitím 3D laserového měřicího systému. Byla též vytvořena metodika, se kterou je možné odfiltrování výrobních nepřesností z měření pro ověření deformací pod zatížením a dále doplnění naměřených hodnot o vypočítané hodnoty na místech, které jsou pro měření nepřístupná.

V závěrečné části je provedeno zobecnění jednotlivých fyzikálních metod, které je možné používat pro dosažení vyšší přesnosti, a jsou též uvedeny jejich možnosti a omezení. Dále je provedeno zobecnění a třídění procesních metod (stupňů) a určení jejich požadovaných vstupů a možnosti dosažených výstupů.

Navržené metody a postupy by měly pomoci výrobcům tvářecích strojů dosáhnout požadovaných parametrů strojů. Cílem využití metodik je zajištění dostatečné přesnosti/tuhosti stroje při vynaložení nízkých nákladů. Vzhledem k tomu, že se jedná o relativně obecně aplikované výstupy, tak nejsou výsledky /algoritmy limitovány pouze na hydraulické lisy, ale lze je použít v celé řadě obdobných výrobních strojů. V práci jsou

uvedeny výhody a nevýhody jednotlivých typů simulací. Výsledky práce vytvářejí bázi dat s vlivem na přesnost stroje, výpočtovou analýzu a experimentální ověření měřením.

### **Shrnutí přínosů práce**

- Byl vytvořen souhrn teorie úzce související s přesností lisu.
- Bylo provedeno shrnutí konstrukčních řešení lisů v dané oblasti pro lis 1000 kN.
- Byly popsány možnosti pro řešení výpočtových MKP analýz v oblasti lisů.
- Byly navrženy nekonvenční (fyzikální) metody pro dosažení přesnosti v oblast lisů, se kterými je možné dosáhnout zvýšené přesnosti. K těmto metodám jsou uvedeny jejich možnosti nasazení, výhody a nevýhody.
- Byl proveden návrh a třídění procesních metod pro vytvoření báze dat s vlivem na přesnost. (Byly uvedeny postupy, vstupy, výstupy a náročnost pro vytvoření báze dat.)
- Navržené vyšší stupně procesních metod napomáhají udržet a rozvíjet know-how ve společnosti a zvyšují konkurenceschopnost.
- Byl navržen a proveden experiment pro získání potřebné lisovací síly tvářeného materiálu. Pro tento experiment byly navrženy přípravky zohledňující možné vlivy v reálných nástrojích.
- Byl navržen a proveden experiment pro měření rovinnosti a průhybů upínacích desek lisu.
- Byla navržena metodika pro měření upínacích desek s upnutým nástrojem s následným odstraněním výrobních a montážních nepřesností pro vyhodnocení skutečných deformací. Součástí této metodiky je i doplnění hodnot pro neměřitelná místa z validovaného MKP modelu.

### **Podněty pro budoucí výzkum a směřování dalších kroků**

Přirozeným následujícím postupem by měla být aplikace popsaných metod a postupů v praxi, která detailně prověří jejich technickou a ekonomickou stránku uplatnitelnosti. Výrobce lisů či obdobně pracujících zařízení může tyto metody na základě vyrobených strojů či prototypů dále rozvíjet a upravovat pro své účely.

Z hlediska univerzitních možností je možné další kroky směřovat k vývoji modulárních testovacích standů (zjednodušené stavebnicové zmenšeniny strojů), na kterých by bylo možné provádět experimentální měření a ověření jednotlivých metod a postupů.

Dalším možným směrem vývoje v oblasti lisů ve vztahu k jejich přesnosti je aplikace „nekonvenčních“ materiálů. Jedná se zejména o kompozitní materiály, ze kterých je možné vytvářet části rámu, celé rámy nebo například výplně konvenčních skříňových rámu. V současné době též probíhá velké množství výzkumů zabývajících se těmito materiály a jejich možnou aplikací v různých oborech.

Do budoucna lze předpokládat, že s rozvojem výpočetních technologií dojde k výraznému zvýšení přesnosti výsledků při současném snížení nároků na kvalifikaci a erudici konstruktérů a výpočtářů. A tím budou snáze dostupné výsledky k výraznému zvýšení přesnosti a spolehlivosti strojů a zařízení.

## Soupis bibliografických citací

- [1] ČECHURA, M, HLAVÁČ, J a STANĚK, J. Konstrukce tvářecích strojů. Plzeň: ZČU, 2014. ISBN 978-80-261-0513-8.
- [2] STANĚK, Jiří. *Základy stavby výrobních strojů: tvářecí stroje*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2001. 120 s. ISBN 80-7082-738-6.
- [3] ČECHURA, Milan a STANĚK, Jiří. *Tvářecí stroje: hydraulické lisy*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. 141 s. ISBN 80-7082-480-8.
- [4] ČSN ISO 6899. *Přejímací podmínky mechanických lisů s vyložení. Zkoušky přesnosti*. Praha: Český normalizační institut, 1992.
- [5] IS 14877-1 (2000). *Hydraulic Presses – Straight Sided Column/C-Frame Type, Part 1: Test Chart for Geometrical Accuracy*. New Delhi: Bureau of Indian Standards, 2000.
- [6] JIS B6403-1994. *Hydraulic presses – Testing of the accuracy*. Tokyo: Japanese Standards Association, 1994.
- [7] HLAVÁČ, Jan. *Porovnání vlastností předepjatých a nepředepjatých rámců tvářecích strojů* [disertační práce]. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006.
- [8] VAVŘÍK, I., BLECHA, P. a HAMPL, J. *Výrobní stroje a zařízení*. místo neznámé: VUT v Brně, 2002. 1. vydání.
- [9] MAREŠ, Radim. *Kapitoly z termomechaniky* [CD-ROM]. Plzeň: Západočeská univerzita, 2008. ISBN 978-80-7043-706-3.
- [10] HYNEK, M., MAX, A., GRACH, M., MULLER, E. KA 03 - Pohledové díly - Pohledové díly. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012.
- [11] HYNEK, M., MAX, A., GRACH, M., MULLER, E. KA 02 Akustické díly - Akustické díly. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012.
- [12] VALUE 4industry. *Prezentace firmy*. <http://www.naretec.cz/>. [Online] 2018. [http://www.naretec.cz/docs/VALUE\\_Group\\_EN\\_2017.pdf](http://www.naretec.cz/docs/VALUE_Group_EN_2017.pdf).
- [13] HYNEK, M., MAX, A., GRACH, M., MULLER, E. KA 02 - Akustické díly - Lisovací nástroje. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012.
- [14] HYNEK, M., MAX, A., GRACH, M., MULLER, E. KA 02 - Akustické díly - Lisovací nástroje do automatizované linky. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012.
- [15] HYNEK, M., MAX, A., GRACH, M., MULLER, E. KA 02 - Akustické díly - 01 - Lisovací nástroj. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2012.
- [16] SCHULLER. *Metal forming handbook*. Berlin: Springer-Verlag, ©1998. xx, 563 s. ISBN 3-540-61185-1.
- [17] BEJAN, Adrian; KRAUS, Allan D. *Heat transfer handbook*. John Wiley & Sons, 2003.
- [18] BERTHELOT, Jean-Marie. *Composite materials: mechanical behavior and structural analysis*. Springer Science & Business Media, 2012.

- [19] Brandenburger - Thermal Insulation. Brandenburger. [Online] [Citace: 25. 06 2018.] <https://www.brandenburger-isoliertechnik.com/en/products/heat-protection-materials/pressure-resistant-insulation-materials/s-4000r/>.
- [20] DRASTÍK, František a kol. *Strojnické tabulky pro konstrukci i dílnu. 2.*, dopl. vyd. Ostrava: Montanex, 1999. 722<sup>s</sup>. ISBN 80-85780-95-X.
- [21] HOSNEDL, Stanislav a KRÁTKÝ, Jaroslav. *Příručka strojního inženýra: obecné strojní části. 1, Spoje, otočná uložení, hřídelové spojky, akumulátory mechanické energie.* Vyd 1. Praha: Computer Press, 1999. 313<sup>s</sup>. Edice strojaře. ISBN 80-7226-055-3.
- [22] JIRÁSKO, Jakub. *Mechanismus pro nastavování formy vulkanizačního lisu.* Plzeň, 2012. Bakalářská práce (Bc.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní.
- [23] JIRÁSKO, Jakub. *Návrh koncepce vulkanizačního lisu VL75".* Plzeň, 2014. Diplomová práce (Ing.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní.
- [24] JIRÁSKO, J., KOTTNER, R. COMPUTATIONAL MODEL FOR HEAT TRANSFER IN A TYRE CURING PRESS. In *ENGINEERING MECHANICS 2016*. DOLEJSKOVA 5, PRAGUE 8, 182 00: ACAD SCI CZECH REPUBLIC, 2016. s. 262-265. ISBN: 978-80-87012-59-8, ISSN: 1805-8248.
- [25] JIRÁSKO, J., MAX, A., KOTTNER, R. A COUPLED TEMPERATURE-DISPLACEMENT NUMERICAL ANALYSIS OF HYDRAULIC PRESS WORKSPACE. In *Proceedings of the ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2016)*. New York, NY 10016 - 5990: ASME, 2016. s. V04BT05A043. ISBN: 978-0-7918-5063-3.
- [26] JIRÁSKO, J., MAX, A. The effect of cooling circuits in a press frame on the resulting accuracy. In *DEStech Transactions on Materials Science and Engineering*. 439 DUKE STREET, LANCASTER, PA 17602-4967: DEStech Publication, Inc., 2018., ISSN: 2572-889X.
- [27] Leica Industrial Measurement Systems Launches Next Generation LTD800 Laser Tracker. *Metrologyworld.com* [online]. 2018 [cit. 2018-06-01]. Dostupné z: <https://www.metrologyworld.com/doc/leica-industrial-measurement-systems-launches-0001>
- [28] *Katalogy a dokumentace k měřicímu systému Leica Laser Tracker LTD800.* B.m.: Leica Geosystems AG, 2006

## Seznam publikovaných prací

### **Seznam vlastních prací vztahujících se k tématu disertace:**

- [1] JIRÁSKO, J., MAX, A., KOTTNER, R. A COUPLED TEMPERATURE-DISPLACEMENT NUMERICAL ANALYSIS OF HYDRAULIC PRESS WORKSPACE. In *Proceedings of the ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2016)*. New York, NY 10016 - 5990: ASME, 2016. s. V04BT05A043. ISBN: 978-0-7918-5063-3
- [2] JIRÁSKO, J., MAX, A., BEZDĚKOVÁ, J. Static numerical analysis of a hydraulic curing press. In *ENGINEERING MECHANICS 2017*. DOLEJSKOVA 5, PRAGUE 8, 182 00, CZECH REPUBLIC: ACAD SCI CZECH REPUBLIC, INST THERMOMECHANICS, 2017. s. 422-425. ISBN: 978-80-214-5497-2, ISSN: 1805-8248
- [3] KECKSTEIN, T., JIRÁSKO, J., KOTTNER, R. FINITE ELEMENT ANALYSIS OF A CURING PRESS WITH FOCUS ON TIGHTNESS OF THE VULCANIZING CHAMBER. In *Proceedings of the ASME 2016 International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE 2016)*. New York, NY 10016: ASME, 2016. s. V009T12A086. ISBN: 978-0-7918-5063-3
- [4] JIRÁSKO, J., KOTTNER, R. COMPUTATIONAL MODEL FOR HEAT TRANSFER IN A TYRE CURING PRESS. In *ENGINEERING MECHANICS 2016*. DOLEJSKOVA 5, PRAGUE 8, 182 00: ACAD SCI CZECH REPUBLIC, 2016. s. 262-265. ISBN: 978-80-87012-59-8 , ISSN: 1805-8248
- [5] JIRÁSKO, J., HYNEK, M., KECKSTEIN, T. RENOVATION OF A PRESS FOR EDUCATIONAL AND EXPERIMENTAL PURPOSES. In *INTED2016 Proceedings*. IATED Academy, 2016. s. 5805-5810. ISBN: 978-84-608-5617-7, ISSN: 2340-1079
- [6] JIRÁSKO, J., MAX, A. The effect of cooling circuits in a press frame on the resulting accuracy. In *DEStech Transactions on Materials Science and Engineering*. 439 DUKE STREET, LANCASTER, PA 17602-4967: DEStech Publication, Inc., 2018., ISSN: 2572-889X

### **Souhrnné výzkumné zprávy:**

- [1] HYNEK, M., VOTÁPEK, P., JIRÁSKO, J., PUŠMAN, Š. *Výzkum a vývoj dílů a technologií pro automobilové komponenty na bázi karbonem vyztužených plastických hmot a obnovitelných materiálů - souhrnná výzkumná zpráva 2015*. NARETEC s.r.o., 2015.
- [2] ČECHURA, M., HLAVÁČ, J., HYNEK, M., JIRÁSKO, J., KECKSTEIN, T., KUBEC, V., KUBEC KRÓNEROVÁ, E., VOTÁPEK, P. *Souhrnná výzkumná zpráva - TS Plzeň a.s. - 2015*. TS Plzeň a. s., 2015.
- [3] VOTÁPEK, P., HYNEK, M., GRACH, M., BEZDĚKOVÁ, J., PUŠMAN, Š., JIRÁSKO, J. *Výzkum a vývoj komponent, nástrojů a technologií - jejich návrh, optimalizace a testování-Souhrnná výzkumná zpráva za rok 2015*. NARETEC s.r.o., 2015.
- [4] ČECHURA, M., DEKASTELLO, J., HLAVÁČ, J., JIRÁSKO, J., KECKSTEIN, T., KUBEC KRÓNEROVÁ, E., ZAHÁLKOVÁ, M. *TH02010708 Průběžná zpráva 2017*. Technologická agentura České Republiky, 2017.

**Užitné vzory, průmyslové vzory a patenty**

- [1] HYNEK, M., JIRÁSKO, J., MAX, A., KECKSTEIN, T. *Pojízdný rám vulkanizačního lisu*. Praha, 2015.
- [2] HYNEK, M., GRACH, M., PUŠMAN, Š., MAX, A., JIRÁSKO, J. *Headstock cover for a lathe*. Alexandria, Virginia, USA, 2016.
- [3] HYNEK, M., JIRÁSKO, J., VOTÁPEK, P. *Linear guideway*. Alexandria, Virginia, USA, 2017.
- [4] KECKSTEIN, T., HYNEK, M., GRACH, M., MÜLLER, E., JIRÁSKO, J. *Chuck guard for a lathe*. Alexandria, Virginia, USA, 2016.
- [5] HYNEK, M., JIRÁSKO, J., VOTÁPEK, P., KLEPÁČEK, J. *Skládací přejezdový můstek*. Praha, 2016.
- [6] HYNEK, M., PUŠMAN, Š., VOTÁPEK, P., JIRÁSKO, J. *Kryt sklíčidla soustruhu*. Praha, 2016.

**Seznam prací nevztahujících se k tématu disertace:**

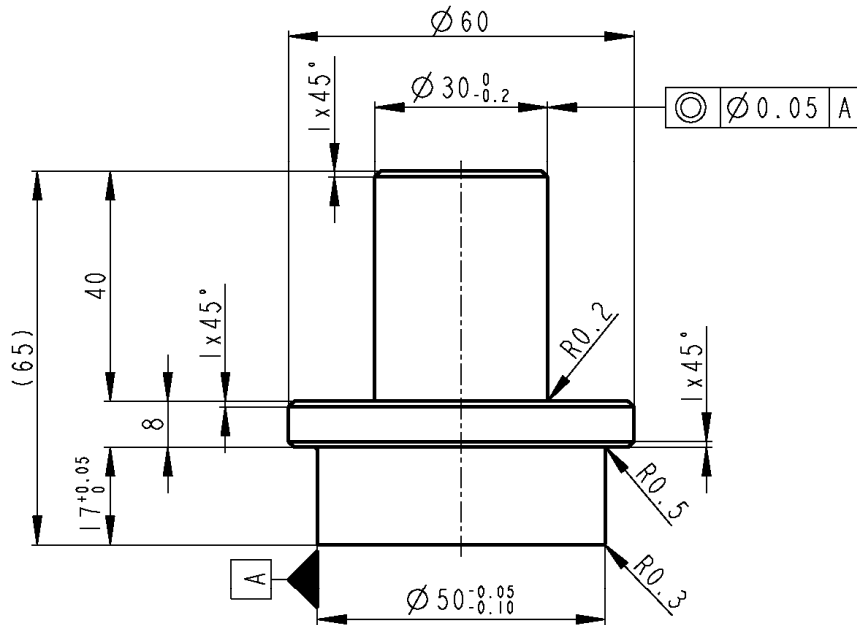
- [1] JIRÁSKO, J., MAX, A., HYNEK, M. Student Projects and e-Learning Study Materials. In *Proceedings of the 12th International Conference on e-Learning*. Reading: Academic Conferences and Publishing International Limited, 2017. s. 103-108. ISBN: 978-1-911218-35-7, ISSN: 2048-8882
- [2] JIRÁSKO, J., RAAB, Z., KLEPÁČEK, J. E-learning study materials focused on projects from industry. In *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. Elsevier, 2015. s. 722-729., ISSN: 1877-0428
- [3] JIRÁSKO, J., KECKSTEIN, T., PUŠMAN, Š. Advanced E-learning Study Materials and Vision for Future Development. In *Innovation Vision 2020: From Regional Development Sustainability to Global Economic Growth*. Norristown: IBIMA Publishing, 2015. s. 2043-2051. ISBN: 978-0-9860419-4-5
- [4] JIRÁSKO, J., FORMÁNEK, J. Student project focused on the design of a small urban electric car. In *EDULEARN17 Proceedings*. Valencia: IATED Academy, 2018. s. 3686-3691. ISBN: 978-84-697-3777-4, ISSN: 2340-1117
- [5] JIRÁSKO, J., PUŠMAN, Š. Comprehensive E-learning study materials in the field of mechanical engineering. In *INTED2015 Proceedings*. IATED Academy, 2015. s. 3185-3191. ISBN: 978-84-606-5763-7, ISSN: 2340-1079
- [6] FORMÁNEK, J., JIRÁSKO, J. ENGINEERING DESIGN PROJECT OF A GRIPPER FOR ROBOTS MANUFACTURED BY A 3D PRINTER. In *INTED2018 Proceedings*. Valencia: IATED Academy, 2018. s. 1308-1312. ISBN: 978-84-697-9480-7, ISSN: 2340-1079
- [7] JIRÁSKO, J., MAX, A., KECKSTEIN, T. Knowledge Based Design of Mechanical Engineering Products. In *Vision 2020: Sustainable Economic development, Innovation Management, and Global Growth*. 34 E GERMANTOWN PIKE, NORRISTOWN, PA 19401: INT BUSINESS INFORMATION MANAGEMENT ASSOC-IBIMA, 2018. s. 2069-2075. ISBN: 978-0-9860419-9-0

## **PŘÍLOHA č. 1**

**Výkresová dokumentace přípravků pro experimentální měření tkaniny**



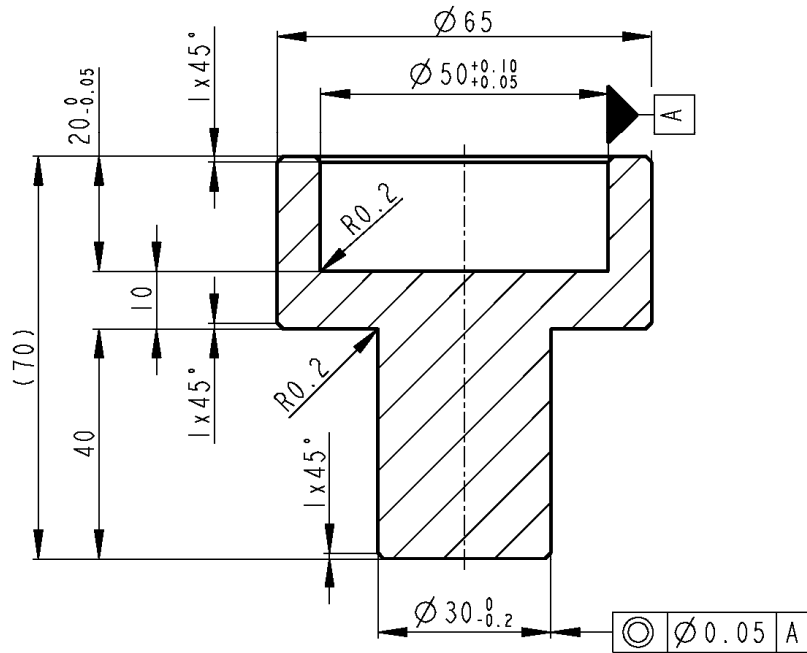
3.2/ ( ✓ )



MNOZSTVI: 1 ks

	KR70 - 70	EN 10060	C45	----	0.658	----		0
Pocet kusu Quantity	Název - rozmer Title - size	Polotovár Blank	Material konecny/výchozí End material/Material	T.odp.	C.hmot. Weight	Hr.hmot. Raw weight	C. výkr. sestavy Drawing asm. No.	Poz. Pos.
Kreslil/DWN.	Datum	Jmeno/Name	Techno-log/ist	Datum	Name			
Prezk./CHK			Prezk./CHK					
Schval./APP			Schval./APP					
ZAPADOCESKA UNIVERZITA v Plzni Vsechna prava vyhrazena/ALL rights reserved				index/No.		Schvalil/Appro.		popis zmeny/change
				Poznámka/Note:		Datum		Podpis/Name
Methode 1 ISO 128	TOLERANCE/ TOLEROVANI ISO 80015 ISO 2768mK	Soubor-model/PART-file Soubor-vykres/DRW-file		PECHOVACI TYC	Meritko SCALE	C. sestavy / Assembly No.		
Název / Title				PECHOVACI TYC	1:1	Typ/Type		----
				ETISLD VYKRESU /DRAWING NO.				Format SIZE
				00004				
				list/sheet 1				pocet listu/ no.sheets 1
								4

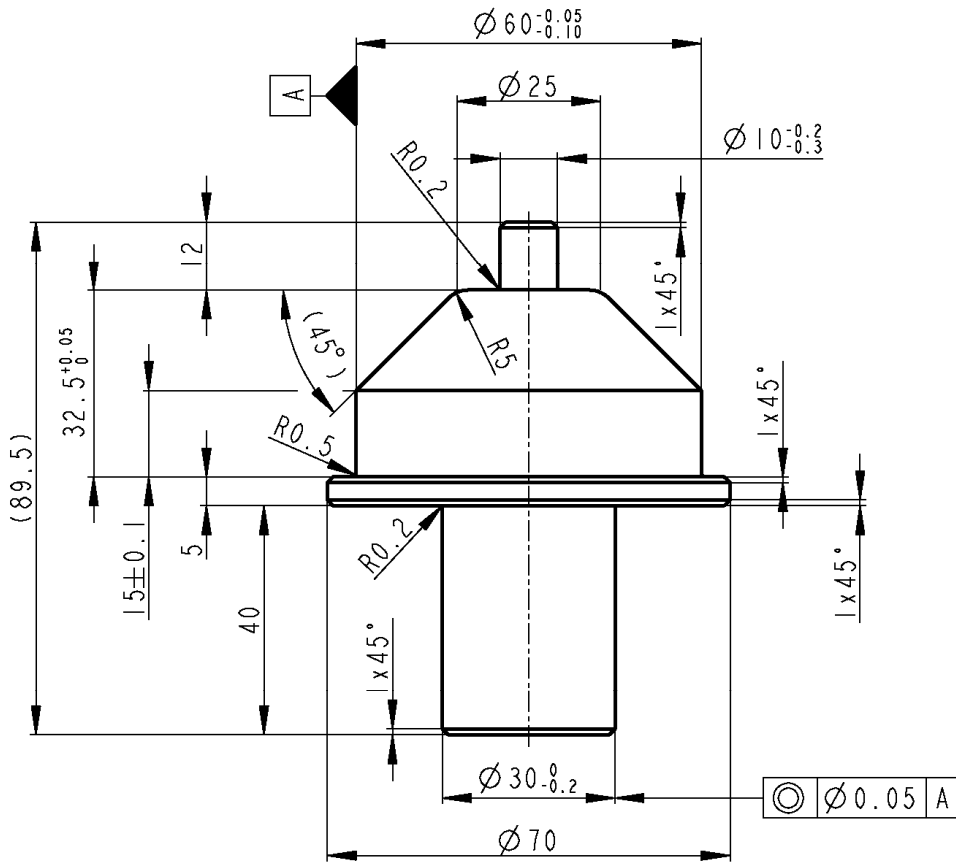
3.2/ ( ✓ )



MNOZSTVI: 1ks

	KR70 - 75	EN 10060	C45	----	0.691	----		0
Pocet kusu Quantity	Název - rozmer Title - size	Polotovár Blank	Material konecny/výchozí End material/Material	T.odp.	C.hmot. Weight	Hr.hmot. Raw weight	C. výkr. sestavy Drawing asm. No.	Poz. Pos.
Kreslil/DWN.	Datum	Jmeno/Name	Techno-Log/ist	Datum	Name			
Prezk./CHK			Prezk./CHK					
Schval./APP			Schval./APP					
ZAPADOCESKA UNIVERZITA v Plzni			index/No.		Schvalil/Appr.	popis zmeny/change	Datum	Podpis/Name
Vsechna prava vyhrazena/ALL rights reserved			Poznámka/Note:					
Methode 1 ISO 128	TOLERANCE/ TOLEROVANI ISO 80015 ISO 2768mK	Soubor-model/PART-file Soubor-vykres/DRW-file	PECHOVACI_HRNEK	Meritko SCALE	1:1	C.sestavy / Assembly No.		
Název / Title			PECHOVACI_HRNEK	ETSLD VYKRESU /DRAWING NO.		00003	Format SIZE	----
				list/sheet 1	pocet listu/ no.sheets 1		4	

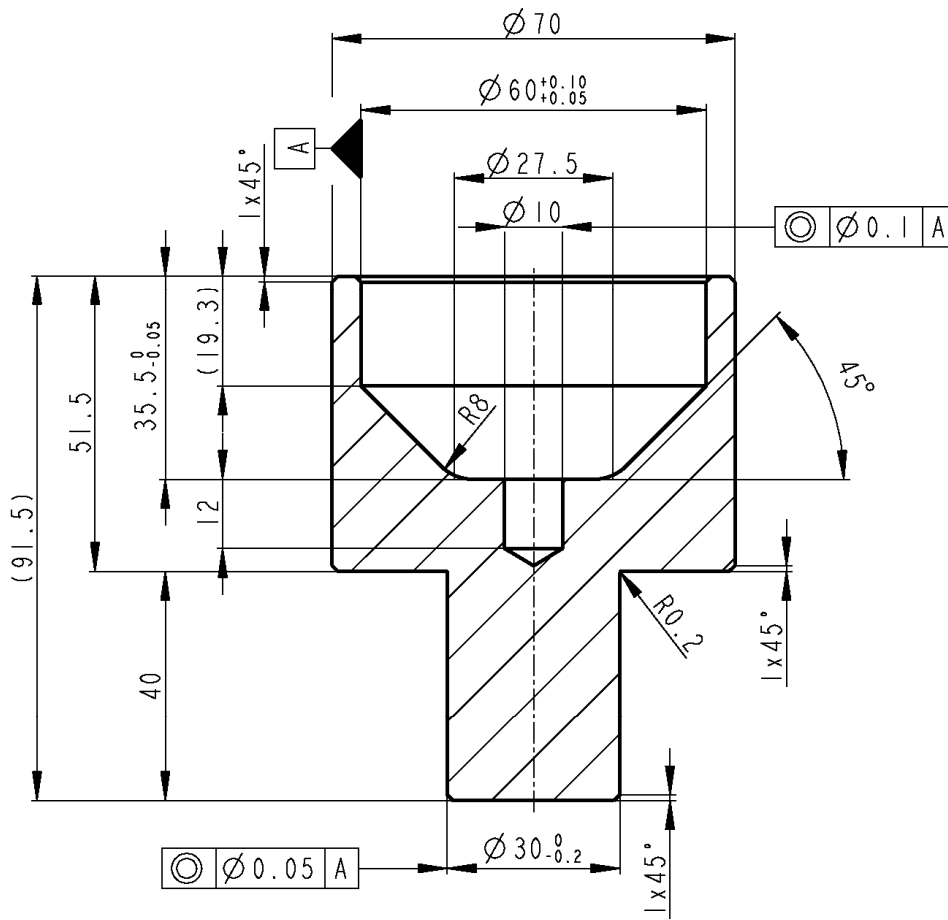
3.2 / ( ✓ )



MNOZSTVI: 1 ks

	KR75 - 94	EN 10060	C45	----	0.915	----		0
Pocet kusu Quantity	Název - rozmer Title - size	Polotovár Blank	Material konecny/výchoz í End material/Material	T.odp.	C.hmot. Weight	Hr.hmot. Raw weight	C. výkr. sestavy Drawing asm. No.	Poz. Pos.
Kreslil /DWN.	Datum 27-Jun-18	Jmeno/Name Jirasko	Techno- log/ist	Datum	Name			
Prezk. /CHK			Prezk. /CHK					
Schval. /APP			Schval. /APP					
ZAPADOCESKA UNIVERZITA v Plzni Vsechna prava vyhrazena/ALL rights reserved				index/No. Schvalil/Appr. popis zmeny/change Datum Podpis/Name Poznamka/Note:				
Methode 1 ISO 128	TOLERANCE/ TOLEROVANI ISO 80015 ISO 2768mK	Soubor-model/PART-file Soubor-vykres/DRW-file		DIL_1 DIL_1	Meritko SCALE <b>1:1</b>	C.sestavy / Assembly No. Typ/Type	----	
Název / Title <b>KUZEL VNEJSI</b>				ETISLD VYKRESU /DRAWING NO. <b>00001</b>			Format SIZE 4	
				List/sheet 1			pocet listu/ no.sheets 1	

3.2 / ( ✓ )



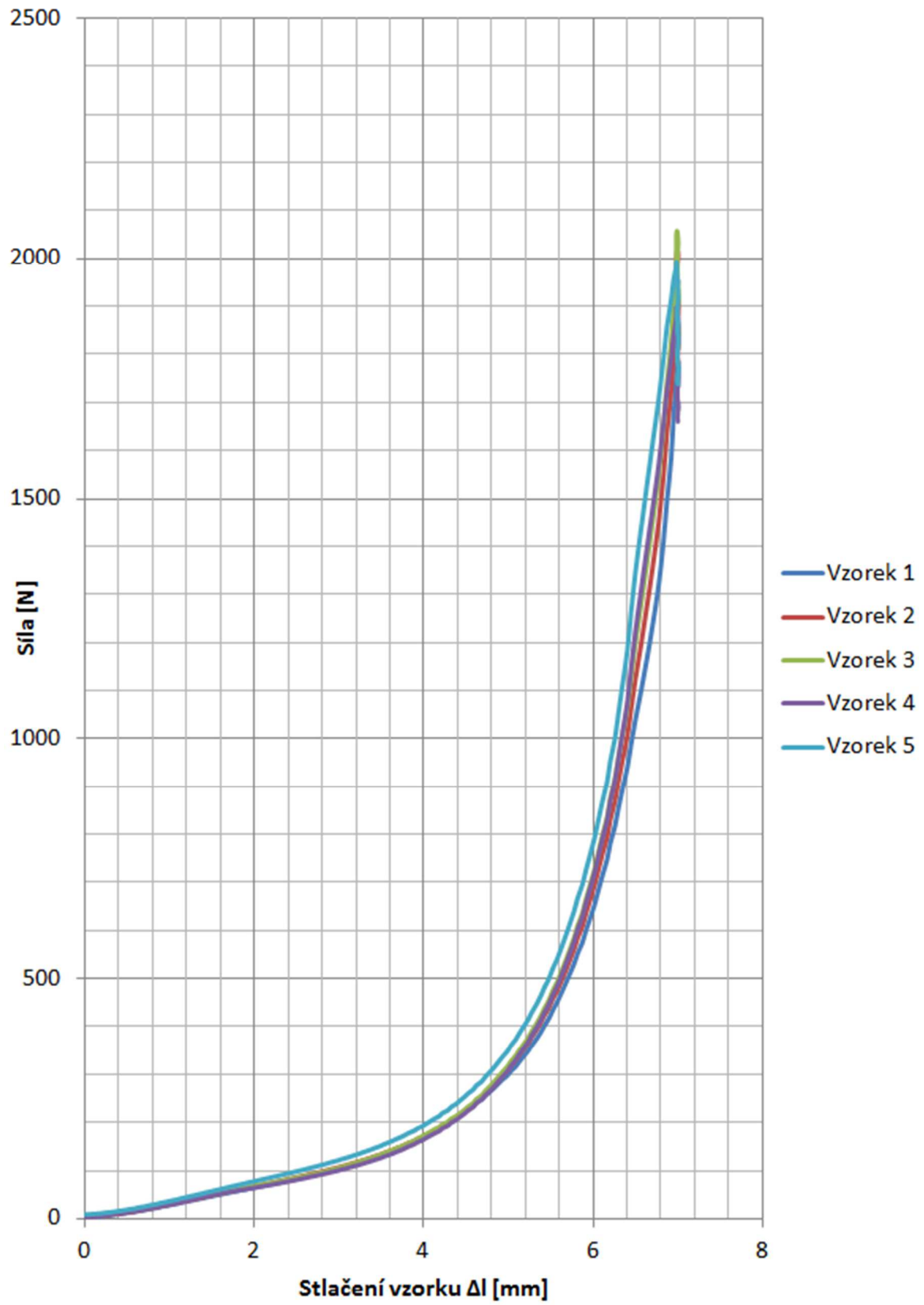
MNOZSTVI: 1ks

	KR75 - 96	EN 10060	C45	----	1.160	----		0	
Pocet kusu Quantity	Název - rozmer Title - size	Polotovár Blank	Material konecny/výchozí End material/Material	T.odp.	C.hmot. Weight	Hr.hmot. Raw weight	C. výkr. sestavy Drawing asm. No.	Poz. Pos.	
Kreslil /DWN.	Datum	Jmeno/Name	Techno-Log/ist	Datum	Name				
Prezk./CHK			Prezk./CHK						
Schval./APP			Schval./APP						
ZAPADOCESKA UNIVERZITA v Plzni				index/No.		Schvalil/Appr.		popsis zmeny/change	
Vsechna prava vyhrazena/ALL rights reserved				Poznamka/Note:		Datum		Podpis/Name	
Methode 1 ISO 128	TOLERANCE / TOLEROVANI ISO 80015 ISO 2768mK	Soubor-model/PART-file Soubor-vykres/DRW-file		DIL_2	Meritko SCALE	C. sestavy / Assembly No.			
Název / Title				DIL_2	<b>1:1</b>	Typ/Type		----	
<b>VNITRNI KUZEL</b>				ETISLD VYKRESU /DRAWING NO.				Format SIZE	
				<b>00002</b>				1	
				list/sheet 1		pocet listu/ no.sheets 1			

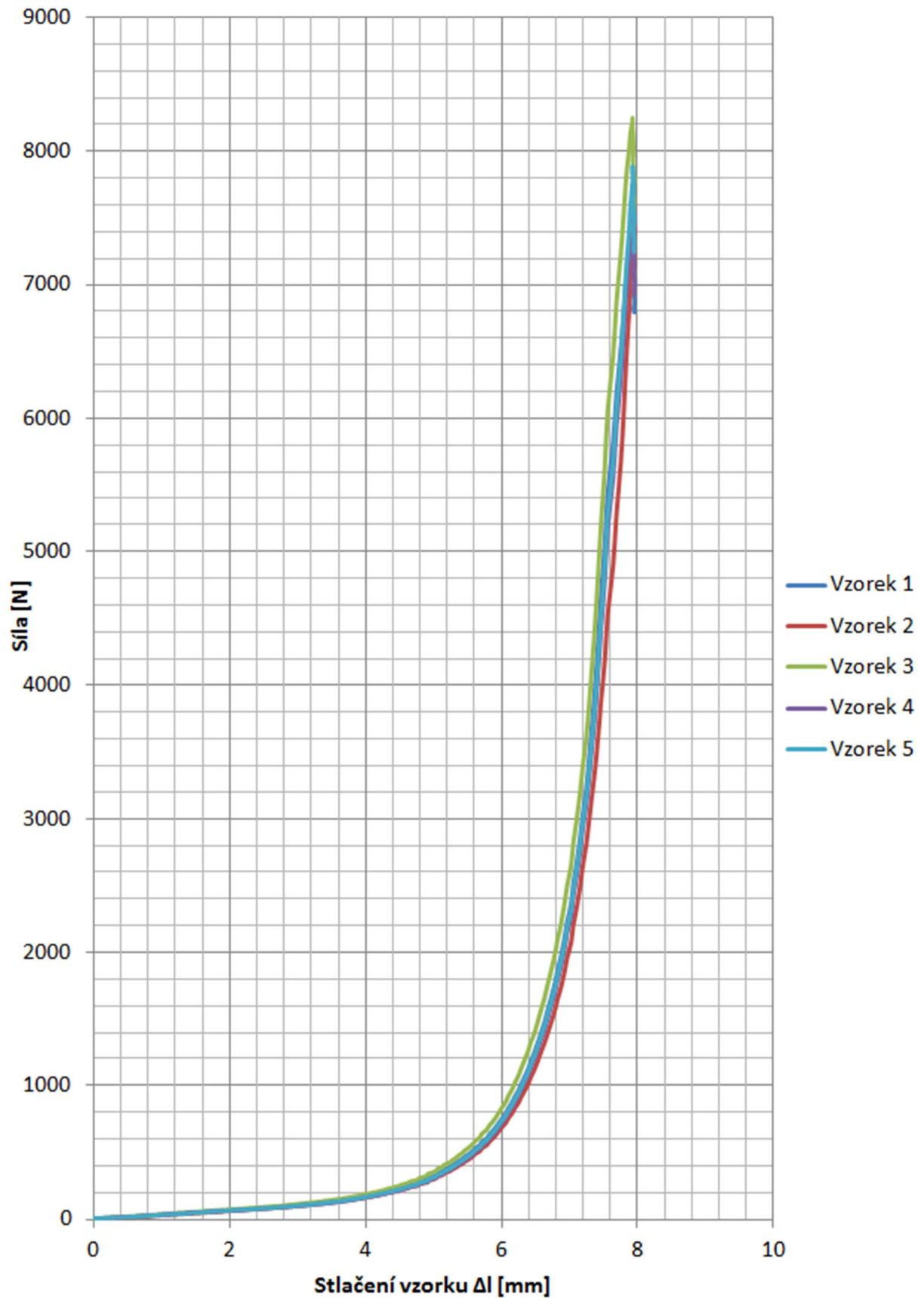
## **PŘÍLOHA č. 2**

### **Přehled výsledků experimentálního měření tkaniny**

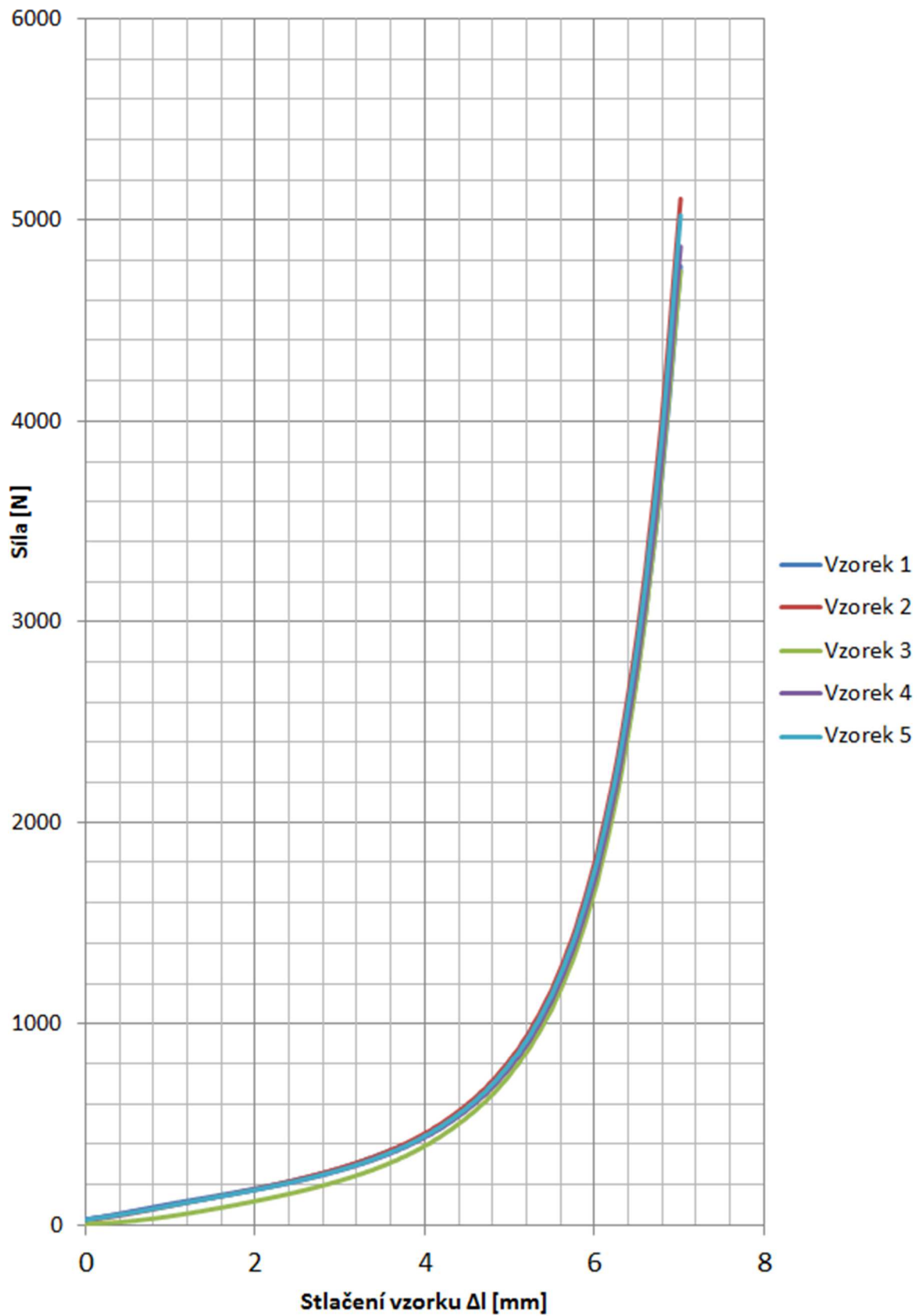
## Záznam zkoušky tlakem, vzorek vyhřátý na 200 °C



**Záznam zkoušky tlakem, vzorek vyhřátý na 200 °C, stlačení na 2 mm**

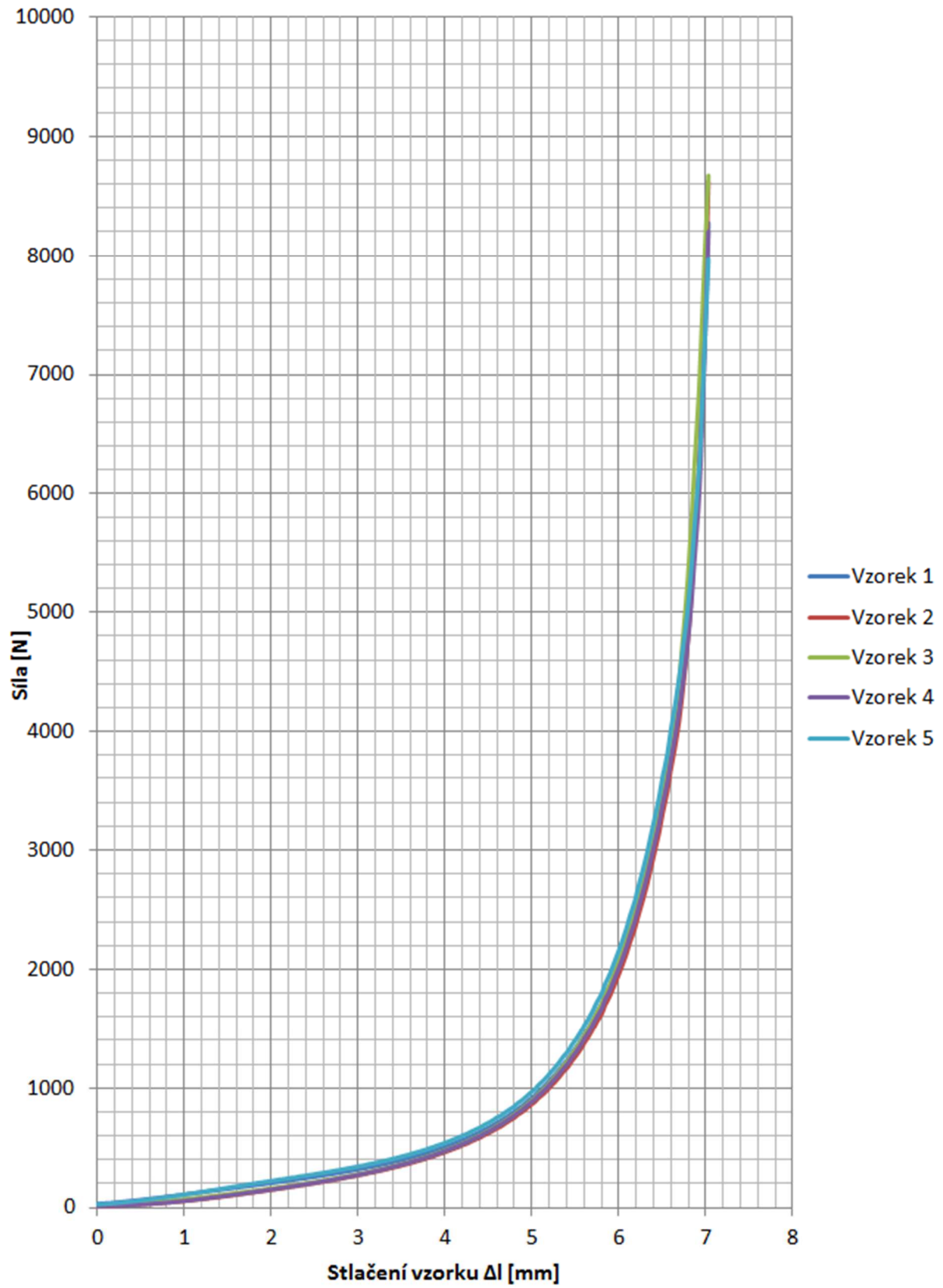


## Záznam zkoušky tlakem, vzorek netemperovaný

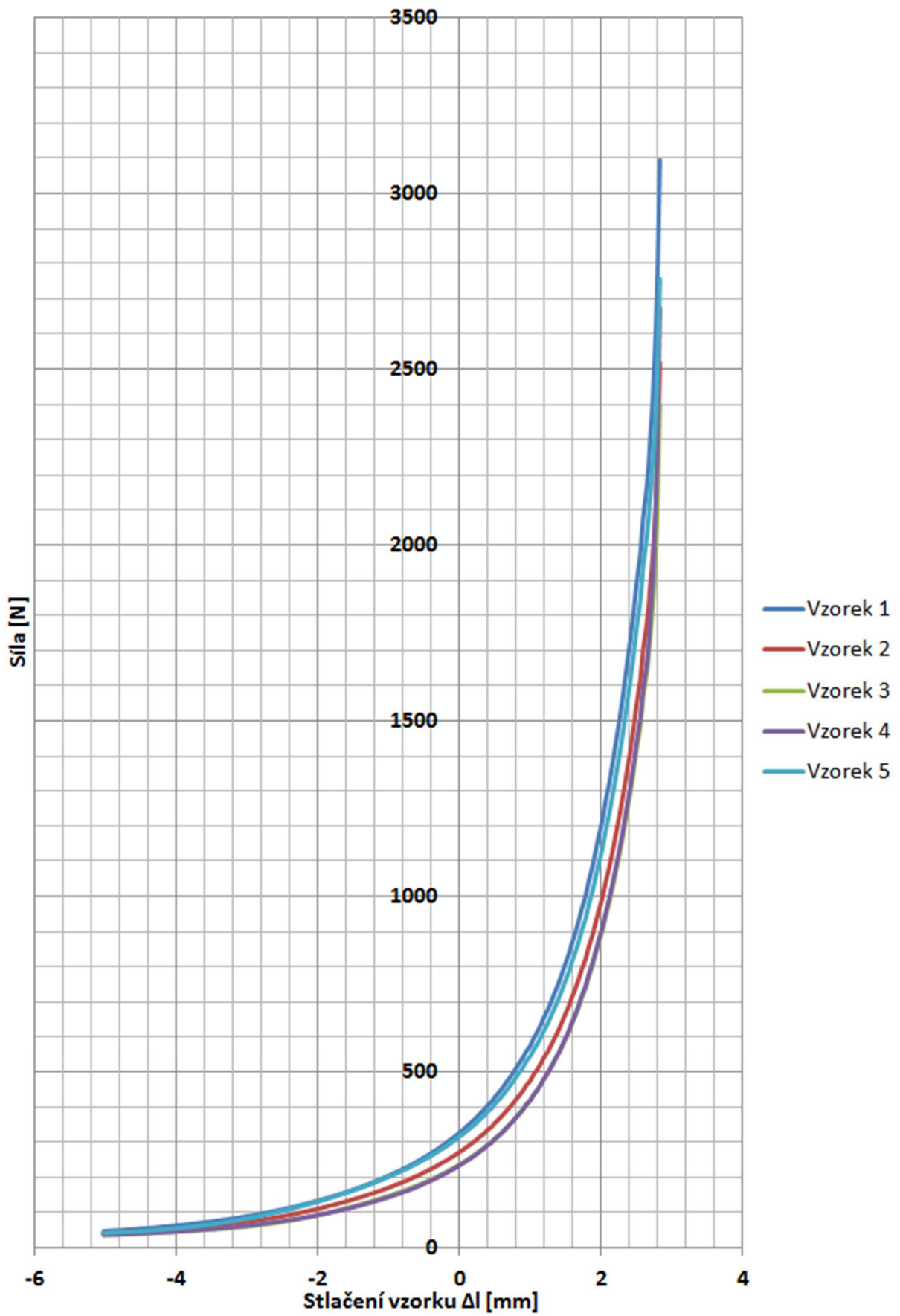




## Záznam zkoušky pětchováním, vzorek netemperovaný



## Záznam zkoušky ve tvarovém nástroji, vzorek vyhřátý na 200 °C



## Záznam zkoušky ve tvarovém nástroji, vzorek netemperovaný

