

# DISERTAČNÍ PRÁCE

k získání akademického titulu doktor  
v doktorském studijním programu: P2301 Strojní inženýrství  
studijním oboru: Stavba strojů a zařízení

## INOVACE KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ TVÁŘECÍCH STROJŮ SE ZAMĚŘENÍM NA VYUŽITÍ MODERNÍCH VÝROBNÍCH TECHNOLOGIÍ

*Autor:*

Ing. Karel Ráž

*Školitel:*

Doc. Ing. Jiří Staněk, CSc.

## PROHLÁŠENÍ

Předkládám k posouzení disertační práci, jejíž téma je Inovace konstrukčních řešení tvářecích strojů se zaměřením na využití moderních výrobních technologií.

Tato práce je koncipována dle požadavků Studijního a zkušebního řádu ZČU Plzeň, tj. obsahuje zejména vlastní výsledky výzkumu v rámci tvorby disertační práce, včetně původních a uveřejněných výsledků.

Prohlašuji, že jsem tuto písemnou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

Plzeň dne: 30.8.2013

.....

podpis

## PODĚKOVÁNÍ

Při této příležitosti bych chtěl poděkovat všem, kteří mě v mém úsilí podporovali a podporují, zejména svému školiteli Doc. Ing. Jiřímu Staňkovi, CSc. a pracovníkům výzkumného centra CVTS a Regionálního technologického institutu Doc. Ing. Milanu Čechurovi, CSc. a Ing. Václavu Kubcovi, Ph.D..

## UPOZORNĚNÍ

Podle zákona o právu autorském č. 35/1965 Sb. (175/1996 Sb. ČR), § 17, zákona o vysokých školách č. 111/1998 Sb. je využití a společenské uplatnění výsledků práce, včetně uváděných vědeckých a výrobně-technických poznatků, nebo jakékoliv nakládání s nimi možné pouze na základě autorské smlouvy za souhlasu autora, autorů citovaných prací a Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni.

## ANOTACE

V současné době jsou tvářecí stroje využívány v mnoha oblastech těžkého průmyslu, a to zejména při výrobě dílů uplatňujících se v oblasti energetiky, chemického průmyslu, lodního průmyslu a vojenství. Většina moderních strojírenských produktů je alespoň částečně složena z tvářených dílů. Proto je nutno se věnovat konstrukci a vývoji těchto strojů.

Otázce inovace tvářecích strojů je zaměřená hlavní část práce. Základním krokem je vtipování specifické technologie a její zhodnocení s ohledem na tvářecí stroj. Jako tato specifická moderní technologie je v práci uvažována výroba velkých kroužků. Vlastní práce pak uvažování této technologie implementuje do procesu návrhu stroje.

Výsledkem práce jako celku je snaha o zvýšení technické úrovně a užitných vlastností tvářecích strojů. K tomuto zvýšení technické úrovně slouží v práci uvedené podklady pro komplexní návrh tvářecího stroje pro specifickou technologii kování velkých kroužků. Tyto podklady jsou zpracovány ve formě doporučení, vzorců a virtuálních modelů.

## ANNOTATION

Currently, the forming machines are used in many areas of heavy industry, especially in power engineering, chemical industry, shipping industry and in the military area. Most of the modern products are partially composed of formed parts. Therefore, it is necessary to deal with the design and development of these machines.

The main part of this work is focused on innovation of forming machines. The basic step is identification of specific technology and its evaluation with regard to the forming machine. As a specific modern technology production of large rings is chosen. Then is consideration of this technology implemented into the design process of machine.

Result of the work is an effort to improve the technical level of forming machines. This increasing of technical level uses documentation for complex design of new forming machine. This documentation is processed in form of recommendations, formulas and virtual models.

**OBSAH**

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE</b> .....	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>DĚLENÍ TVÁŘECÍCH STROJŮ</b> .....	<b>8</b>
3.1.	PŘEHLED ZÁKLADNÍCH TYPŮ TVÁŘECÍCH STROJŮ .....	9
3.1.1.	<i>Mechanické lisy</i> .....	9
3.1.2.	<i>Hydraulické lisy</i> .....	9
3.1.3.	<i>Buchary</i> .....	10
<b>4</b>	<b>POPIS VOLNÉHO KOVÁNÍ</b> .....	<b>11</b>
<b>5</b>	<b>VYBRANÉ TECHNOLOGIE KOVÁNÍ VELKÝCH VOLNÝCH VÝKOVKŮ</b> .....	<b>12</b>
5.1.	PROSAZOVANÉ VELKÉ KLIKOVÉ HŘÍDELE .....	12
5.2.	KOVÁNÍ VELKÝCH KROUŽKŮ.....	12
5.3.	KOVÁNÍ VELKÝCH DEN TLAKOVÝCH NÁDOB .....	12
<b>6</b>	<b>VÝBĚR TECHNOLOGIE VHODNÉ K INOVACI</b> .....	<b>13</b>
<b>7</b>	<b>SPECIFIKA TECHNOLOGIE KOVÁNÍ KROUŽKŮ REAKTOROVÝCH NÁDOB</b> .....	<b>14</b>
<b>8</b>	<b>POŽADAVKY NA TVÁŘECÍ STROJ ZOHLEDŇUJÍCÍ SPECIFIKA TECHNOLOGIE KOVÁNÍ VELKÝCH KROUŽKŮ PRO REAKTOROVÉ NÁDOBY</b> .....	<b>19</b>
8.1.	ZÁKLADNÍ (OBECNÉ) POŽADAVKY KLADENÉ NA STROJ VE VZTAHU K DANÉ TECHNOLOGII .....	19
8.2.	STANOVENÍ MINIMÁLNÍ SÍLY KOVACÍHO ZAŘÍZENÍ .....	19
8.2.1.	<i>Stanovení minimálních parametrů ingotu</i> .....	19
8.2.2.	<i>Analytický výpočet tvářecí síly na hydraulickém lisu</i> .....	21
8.2.3.	<i>Stanovení potřebné energie bucharu</i> .....	22
<b>9</b>	<b>REŠERŠE VHODNÝCH STROJŮ</b> .....	<b>24</b>
9.1.	BUCHARY .....	25
9.2.	HYDRAULICKÉ LISY .....	27
9.3.	SHRNUTÍ REŠERŠE- SPECIFIKA VELKÝCH TVÁŘECÍCH STROJŮ .....	30
<b>10</b>	<b>VOLBA FUNKČNÍHO PRINCIPU LISU VHODNÉHO PRO KOVÁNÍ REAKTOROVÝCH NÁDOB</b> .....	<b>32</b>
10.1.	ROZBOR KONSTRUKCE POHONU.....	32
10.2.	ROZBOR KONSTRUKCE TRAVERZ .....	35
10.3.	ROZBOR KONSTRUKCE SLOUPŮ.....	38
10.4.	VÝSLEDKY ZÍSKANÉ Z MORFOLOGICKÉ MATICE .....	50
10.4.1.	<i>Varianta A (červená)</i> .....	50
10.4.2.	<i>Varianta B (modrá)</i> .....	50
10.4.3.	<i>Varianta C (zelená)</i> .....	50

10.5.	POROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH VARIANT A VÝBĚR NEJVHODNĚJŠÍHO ŘEŠENÍ .....	51
<b>11</b>	<b>NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO VÝROBU VELKÝCH KROUŽKŮ .....</b>	<b>53</b>
11.1.	MOŽNÉ VARIANTY ZAŘÍZENÍ PRO VÝROBU VELKÝCH KROUŽKŮ .....	53
11.1.1.	Zařízení pro kování kroužků mimo vlastní lis- varianta 1 .....	53
11.1.2.	Zařízení pro kování kroužků mimo vlastní lis- varianta 2 .....	54
11.1.3.	Zařízení pro doválcování kroužků mimo vlastní lis .....	54
11.2.	VÝPOČTY TÝKAJÍCÍ SE VÝROBY KROUŽKŮ.....	55
11.2.1.	Výpočet deformace kroužku vlivem vlastní hmotnosti.....	55
11.2.2.	Výpočet namáhání spodní traverzy při kování kroužku na trnu.....	56
11.2.3.	Stanovení sil při tváření na hydraulickém lisu.....	58
11.2.4.	Výběr vhodného zařízení pro výrobu kroužků mimo pracovní prostor lisu .....	60
11.3.	SHRNUTÍ POŽADAVKŮ KLADENÝCH NA TVÁŘECÍ STROJ PRO VÝROBU VELKÝCH KROUŽKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ ROZBORU TECHNOLOGIE .....	66
<b>12</b>	<b>VLIV OSTATNÍCH FAKTORŮ NA NUTNOU ENERGIÍ PRO STROJ - POKLES TUHOSTI V HYDRAULICKÉM SYSTÉMU VLIVEM DRUHU KAPALINY .....</b>	<b>67</b>
12.1.	JEDNOTLIVÉ VLIVY PŮSOBÍCÍ NA TUHOST HYDRAULICKÉHO SYSTÉMU .....	67
12.2.	ZHODNOCENÍ JEDNOTLIVÝCH VLIVŮ S OHLEDEM NA STROJ .....	68
12.3.	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ ZTRÁTOVÉ ANALÝZY POHONU HYDRAULICKÉHO LISU .....	69
<b>13</b>	<b>VIZUALIZACE NÁVRHU STROJE PRO KOVÁNÍ VELKÝCH KROUŽKŮ .....</b>	<b>71</b>
<b>14</b>	<b>DOPORUČENÍ PRO NÁVRH STROJE NA KOVÁNÍ KROUŽKŮ .....</b>	<b>72</b>
14.1.	OBECNÉ ZÁSADY PRO KONSTRUKCI TVÁŘECÍCH STROJŮ.....	72
14.2.	URČENÍ PRACOVNÍ SÍLY A ZÁKLADNÍCH ROZMĚRŮ STROJE.....	72
14.3.	VOLBA PRACOVNÍHO TLAKU KAPALINY .....	74
14.4.	VOLBA KONSTRUKČNÍ VARIANTY LISU .....	74
14.5.	VÝPOČET PRACOVNÍCH HYDRAULICKÝCH VÁLCŮ A PLUNŽRŮ.....	74
14.6.	STANOVENÍ SKUTEČNÉ PRACOVNÍ A ZPĚTNÉ SÍLY.....	75
14.7.	STANOVENÍ ROZMĚRŮ TRAVERZ A SLOUPŮ.....	75
14.8.	URČENÍ POTŘEBNÝCH PŘEDEPNUTÍ KOTEV .....	76
14.9.	NÁVRH VEDENÍ POHYBLIVÉ TRAVERZY .....	76
14.10.	NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO DOKONČENÍ KROUŽKŮ MIMO VLASTNÍ LIS .....	76
14.11.	OSTATNÍ DOPORUČENÍ PRO NÁVRH LISU .....	76
<b>15</b>	<b>SPLNĚNÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE.....</b>	<b>77</b>
<b>16</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>79</b>
<b>17</b>	<b>VYJÁDRĚNÍ NOSITELE A ŘEŠITELŮ PROJEKTŮ .....</b>	<b>80</b>
<b>18</b>	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>81</b>

## 1 Úvod

Tak, jak jde historicky stále kupředu úroveň poznání lidské společnosti, dochází ke stálému zdokonalování technických systémů a tím se zvyšují požadavky na kvalitu výrobků. Moderní produkty musí vykazovat maximální spolehlivost, vysokou jakost, nízkou pořizovací cenu a optimální využití materiálu. Aby bylo dosaženo těchto cílů, musí se neustále vyvíjet i výrobní technologie a stroje.

Nezastupitelné místo mezi výrobními stroji mají stroje tvářecí. Tyto stroje jsou již historicky spjaty s lidskou činností, a i když funkční principy jsou u většiny strojů známy dlouho, stále se objevují cesty, jak tyto stroje zlepšovat. K návrhu moderního konkurenceschopného stroje musí být využito široké spektrum poznatků a zkušeností z daného oboru.

V současné době jsou tvářecí stroje využívány v mnoha oblastech těžkého průmyslu a to zejména při výrobě dílů pro oblast energetiky, chemického průmyslu, lodního průmyslu a vojenství. Většina moderních strojírenských produktů je alespoň částečně složena z tvářených dílů. Proto je nutno věnovat se konstrukci a vývoji těchto strojů. Produkce velkých volných výkovků je specifickou oblastí v kovářenském průmyslu. Ve světě je omezený počet firem, které jsou schopny výkovky největších rozměrů dodávat.

Pokud chceme na tvářecích strojích vyrábět efektivně a produkovat přesné a kvalitní výrobky, je nutné na tyto stroje klást různé požadavky a zajistit jejich splnění. Důležitými parametry tvářecího stroje jsou energetická náročnost jeho provozu a pořizovací cena. Zvláště důležitost prvního parametru v současné době při neustále rostoucích cenách energií stoupá. Se spotřebou energie úzce souvisí i správná volba tvářecího stroje. Druhým důležitým parametrem je nízká pořizovací cena. Ta je v přímém vztahu s výrobní cenou stroje, jeho hmotností a konstrukčním řešením.

Návrh těchto strojů má svá specifika. V současnosti je trendem oproštění se od stávajících klasických konstrukcí strojů, které byly v některých případech předimenzované. Cílem při návrhu je optimální využití materiálu a jeho úspora. Nesmí být ale v rámci výpočtů opomenut žádný ze zatěžovacích stavů, který může na stroji nastat.

Otázce inovace tvářecích strojů je zaměřená hlavní část práce, základním krokem je vytipování specifické technologie a její zhodnocení s ohledem na tvářecí stroj. Vlastní práce pak uvažování této technologie implementuje do procesu návrhu stroje. Výsledkem práce jako celku je snaha o zvýšení technické úrovně a užitných vlastností tvářecích strojů.

## 2 Cíle disertační práce

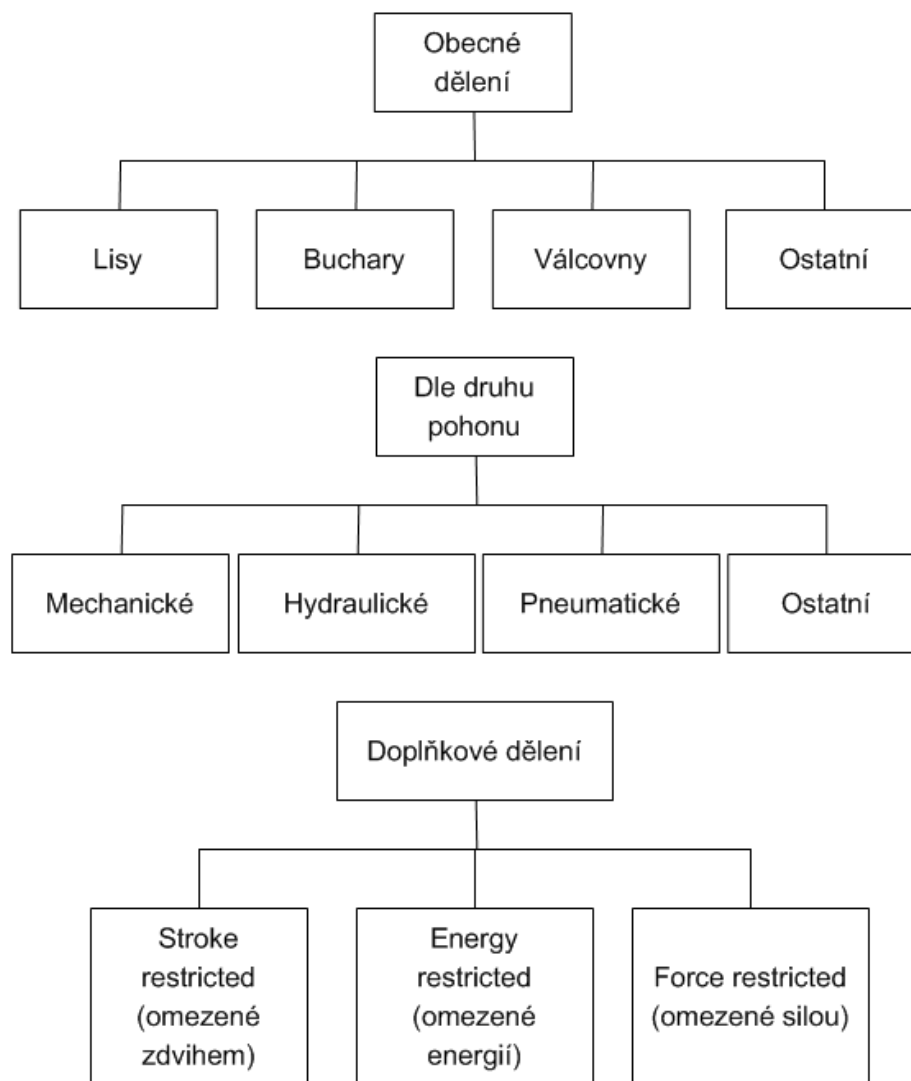
Ve své práci se konkrétně zaměřím na nově velmi aktuální technologii - kování velkých kroužků. Pro tuto technologii je nutno vytvořit nové konstrukční řešení tvářecího stroje. Aby byla předložená práce přínosem do problematiky tvářecích strojů, je nutné fundovaně stanovit tematické kroky a cíle práce.

Jednotlivé kroky zpracování disertační práce:

1. Provedení rozboru technologií zabývajících se kováním velkých volných výkovků a výběr technologie pro podrobné zpracování v disertační práci.
2. Analýza vybrané technologie a stanovení požadavků na konstrukční řešení stroje. Vytipování okrajových podmínek pro tvorbu nového stroje.
3. Provedení rešerše a rozboru současného stavu v oblasti konstrukce velkých tvářecích strojů.
4. Volba a rozbor funkčního principu stroje na základě morfologických matic a jejich zhodnocení.
5. Vliv vybraných faktorů z oblasti hydraulických lisů na energetickou spotřebu stroje.
6. Zpracování podkladů pro komplexní návrh stroje na danou technologii ve formě doporučení, vzorců a virtuálních modelů.
7. Zhodnocení vytyčených cílů disertační práce.

### 3 Dělení tvářecích strojů

V této kapitole je uvedeno krátké shrnutí základních typů tvářecích strojů, které jsou v současnosti používané. Toto dělení je obecně platné a vychází z literatury [Staněk 2001].



Obr. 3-1 Základní dělení tvářecích strojů

Dále je možno tvářecí stroje dělit podle druhu relativního pohybu výstupního členu (nástroje) do dvou základních skupin:

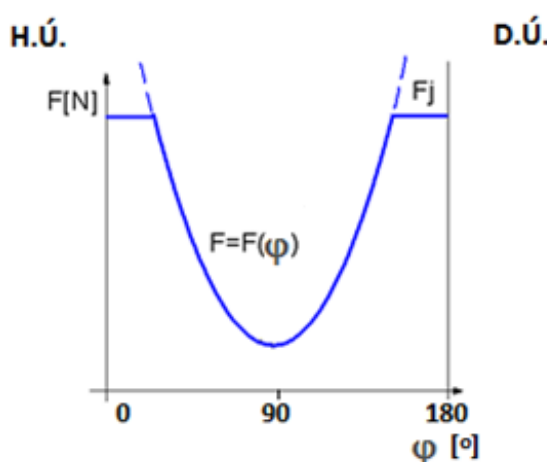
- Tvářecí stroje s přímočarým pohybem výstupního členu (např. pro kování, lisování, tažení drátů)
- Tvářecí stroje s nepřímým pohybem výstupního členu (např. pro válcování)



### 3.1. Přehled základních typů tvářecích strojů

#### 3.1.1. Mechanické lisy

Mechanický lis využívá systémů vaček, klikového, excentrového, kloubového, klínového mechanismu nebo rotujícího vřetene (vřetenový lis) pro vytvoření pracovního pohybu a pracovní síly. Pracovní síla je v závislosti na zdvihu proměnná. Rychlost výstupního členu mechanických lisů je v porovnání s hydraulickými lisy větší. Zejména pro nejčastěji používané klikové lisy platí, že jmenovitá síla působí v malém rozmezí neproměnného zdvihu a nejsou tedy vhodné pro volné kování. S úspěchem lze tyto lisy použít v automatizovaných provozech. Do této kategorie jsou zařazeny i vřetenové lisy, ale ty jsou z funkčního hlediska na pomezí mezi mechanickými lisy a buchary.

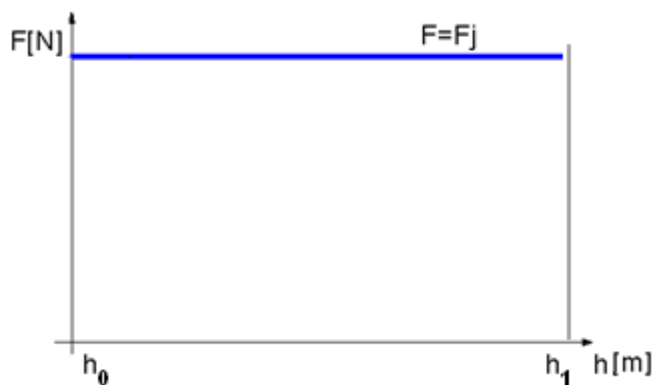


Obr. 3-2 Průběh síly v závislosti na poloze výstupního členu klikového lisu

#### 3.1.2. Hydraulické lisy

U hydraulických lisů je pracovní síla vyvozena tlakem kapaliny na čelo pístu (nebo plunžru) v hydraulickém válci.

- Jmenovitou sílu lze vyvodit v libovolném místě zdvihu lisu, což je zásadní rozdíl od mechanických lisů



Obr. 3-3 Průběh síly v závislosti na poloze výstupního členu hydraulického lisu v závislosti na zdvihu

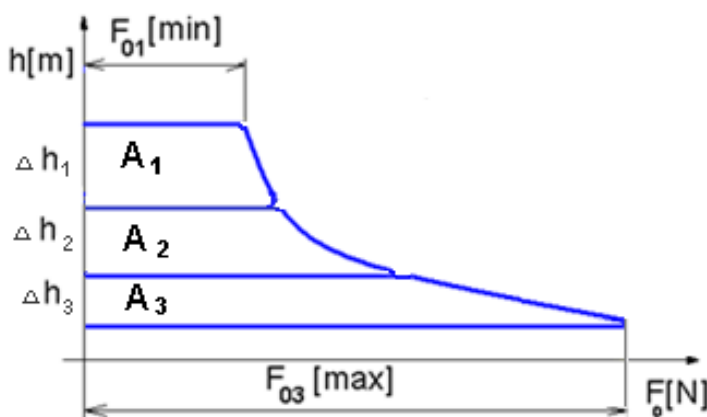
- Oproti mechanickým lisům mají lisy hydraulické nižší rychlost výstupního členu a nižší pracovní účinnost

### 3.1.3. Bucharý

Princip stroje je v tom, že pohybující se beran je vyzvednut do výšky  $h$  a následně spuštěn na kovaný kus, který je umístěn na šabotě. Pro hmotnosti těchto prvků platí, že hmotnost šaboty je 10x až 20x větší než beranu. Vzhledem k tomu, že je do základu stroje přenášeno velké množství energie, je nutno vytvořit základ se schopností absorpce rázové energie.

Zvláštní skupinu bucharů tvoří *bucharý protiběžné*.

U protiběžných bucharů se pohybuje jak horní beran, tak dolní beran a výkovek je umístěn v zápustce umístěné na spodním beranu. V jednom okamžiku dojde ke kontaktu výkovku s berany. Při správném návrhu není energie přenášena do základu, protože se většina přemění v deformační práci při rázu obou těles. Toto je způsobeno tím, že oba pohybující se berany mají stejnou hybnost. Toto zařízení může pracovat i v horizontální poloze a nevyžaduje tak objemný základ. Výhodou jsou menší vibrace přenášené do okolí.



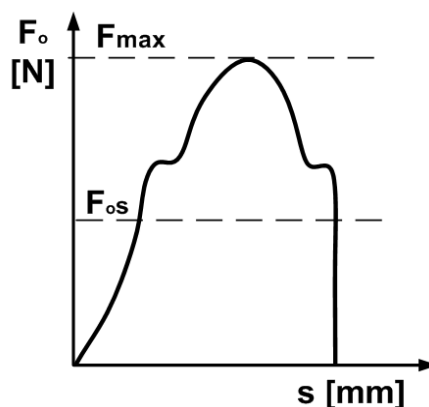
Obr. 3-4 Průběh tvářecí síly na bucharu při třech následných úderech o stejné energii

U bucharu pro práce při jednotlivých úderech platí, že práce  $A_1=A_2=A_3$ . Současně pro deformace při jednotlivých úderech platí  $\Delta h_1 > \Delta h_2 > \Delta h_3$ .

## 4 Popis volného kování

Pro volné kování se v praxi používají hydraulické lisы, případně buchary. V závislosti na tom je materiál tvářen rázy (buchary) nebo klidnou silou (hydraulické lisы).

Volně kovaný výkovek vzniká mezi dvěma kovářskými nástroji. Vrchní kovadlo je umístěno na beranu (nebo na pohyblivé traverze), spodní v šabotě bucharu nebo na stole lisu. Při této technologii se docíluje žádaného tvaru pomocí polohování výkovku mezi kovadly a sledu operací, při kterých dochází k prostorovým změnám tvaru výkovku.



Obr. 4-1 Tvářecí charakteristika pro pěchování (závislost odporové síly materiálu na zdvihu výstupního členu)

Hydraulické lisы pro volné kování jsou obvykle svislé lisы s horním nebo spodním pohonem. Lisы pro volné kování se stavějí do velikosti 240MN (existují i lisы s mnohem větší pracovní silou, ale ty jsou určeny výhradně pro zápustkové kování). Základními technickými parametry kovacího lisu pro volné kování jsou jmenovitá síla a s ní spojená maximální hmotnost kovaného ingotu, výkon lisu (daný počtem nebo celkovou hmotností daných výkovků za časovou jednotku), počet zdvihů za čas, velikost zdvihu a velikost pracovního prostoru (rozteče sloupů a světlost).

Volným kováním vznikají výkovky velkých a hmotných součástí, hřídelů, sloupů, lodních dílů, pěchované a děrované ingoty a kování na trnu i tlustostěnné nádoby a prstence. Proto je u lisů pro volné kování požadován velký čelní průchod. Vzhledem k aktuálně prováděné technologické operaci mohou být stroje značně excentricky namáhány. Kolmo na čelní průchod je stroj vybaven přesuvnými stoly s výměnou kovadel. Stroje bývají vybaveny manipulačním zařízením pro polohování při kování volně kovaných výkovků. Pro to jsou využity dva podstrovní jeřáby s řetězovým otáčecím zařízením, nebo pojezdový manipulátor. Lisы jsou vybaveny zařízením pro možnost rychlokování, aby výkovek během kování co nejméně chladl a byla tak v maximální míře zajištěna ekonomičnost výroby.

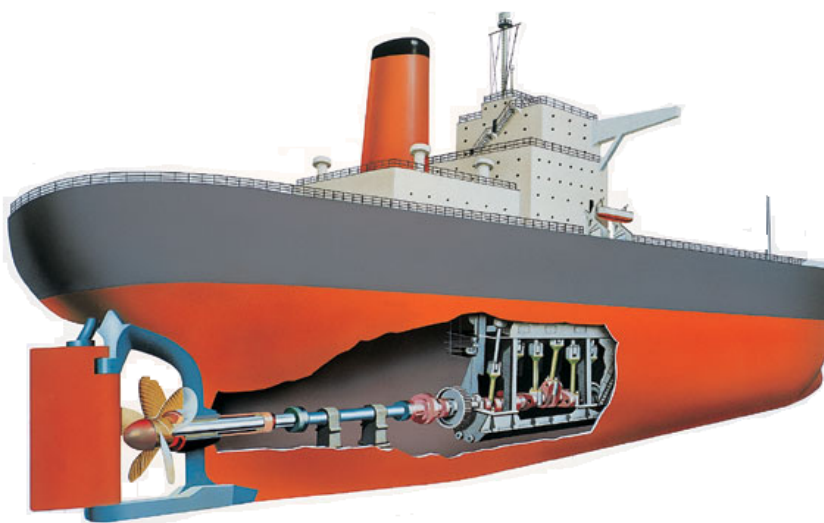
Technologie volného kování je typická pro hydraulické lisы. Vynutila si koncepci půdorysu lisu do úzkého obdélníka, a jeho dimenzování s ohledem na možnost značně excentrického zatížení. Rámy takovýchto lisů jsou nejčastěji sloupové konstrukce.

## 5 Vybrané technologie kování velkých volných výkovků

V současné době se velké výkovky vyžadují v různých odvětvích průmyslu. V následujícím textu je proveden jejich rozbor.

### 5.1. Prosazované velké klikové hřídele

Velké klikové hřídele se používají například v zaoceánských lodích, nebo v energetických zařízeních. Tyto klikové hřídele mohou mít délku více než 20 metrů s hmotností dosahující 400 tun. Tyto hřídele musí být velice pevné a kvalitně zpracované, protože se často otáčejí více jak 100 otáčkami za minutu.



Obr. 5-1 Příklad využití velkých prosazovaných klikových hřídelů [Kobelco 2010]

### 5.2. Kování velkých kroužků

V současnosti je celosvětově velký požadavek po těchto kroužcích a to zejména v jaderném průmyslu. Velké kroužky jsou využity jako části reaktorových nádob. Je snahou, aby na takovéto nádobě bylo co nejméně svarů. Velikost vykovaného kroužku je v přímé souvislosti s maximální velikostí použitého ingotu a silou lisu.

### 5.3. Kování velkých den tlakových nádob

[Greger&Petržela 2011]

S kováním velkých kroužků pro reaktorové nádoby úzce souvisí i kování jejich den. Ty se vyrábějí lisováním z kruhových desek. Polotovarem pro výlisky den jsou velké válcované desky, které pro dosažení daného rozměru mohou být i svařované z více kusů. Z těchto polotovaru je lisováním v zápustce a následným rozkováním úzkým kovádlem vytvořeno dno.

## 6 Výběr technologie vhodné k inovaci

Z kapitoly 5 Vybrané technologie kování velkých volných výkovků je nutno stanovit nejvhodnější technologii pro inovaci používaného tvářecího stroje. Při jejím výběru je nutno zvážit společenskou poptávku a trend poslední doby. Ten je dobře popsán v následujícím článku:

### **Důvody vysoké poptávky po výkovcích reaktorových nádob:**

[Čermák&Jílek 2009]

Očekává se zvýšený požadavek po výkovcích v jaderném průmyslu. Největší boom je v Spojených státech. Již v současnosti je v USA v provozu 104 jaderných elektráren, pokrývajících přibližně 20% spotřeby. V nedávné minulosti se objevily požadavky na výstavbu dalších 33 jaderných elektráren. Z hlediska návrhu kovacího lisu je důležité zmínit, že v jedné jaderné elektrárně poslední generace se vyskytuje přibližně 200 volně kovaných výkovků různé velikosti a váhy. Oproti minulosti nastává tendence přecházet více od svařenců k monolitům, protože ty pak vyžadují v celkovém měřítku méně svařovacích operací, a z toho plynoucích inspekcí během činnosti elektrárny. Společnosti provozující jaderné elektrárny stavějí větší reaktory, protože ty mají větší účinnost. V současnosti je mnoho menších kováren, které jsou schopny dodat výkovky do přibližně 180 tun ale je jen málo takových zařízení, které jsou schopny dodat výkovky přesahující tuto hmotnost. V tomto kontextu je třeba chápat, že zde již nezáleží pouze na samotném lisu, ale je nutno uvažovat celý výrobní závod, například zda je slévárna schopna vyrobit ingot požadované tonáže, či zda pece jsou schopny ingot pojmout. Současná konstrukce nejmodernější jaderné elektrárny třetí generace vyžaduje ocelové ingoty, vážící mezi 500 až 600 tunami. Dnes se neustále zvyšují maximální velikosti odlitků, které je lidstvo schopno vytvořit. Hlavně Čína deklaruje největší ingoty na světě. Druhou stranou mince je ale jejich kvalita.

Na základě tohoto byla vytipována výroba velkých kroužků reaktorových nádob jako technologie vhodná k inovaci. Tato výroba je pro kovářnu velmi lukrativní, protože o tyto díly je zájem.

Tvorba stroje pro výrobu velkých kroužků je výhodná v tom, že takto navržený stroj si zachová určitou míru univerzálnosti. Je možné, aby na takovémto stroji šlo vyrobit dna pro vlastní reaktorové nádoby i velké zalomené hřídele.

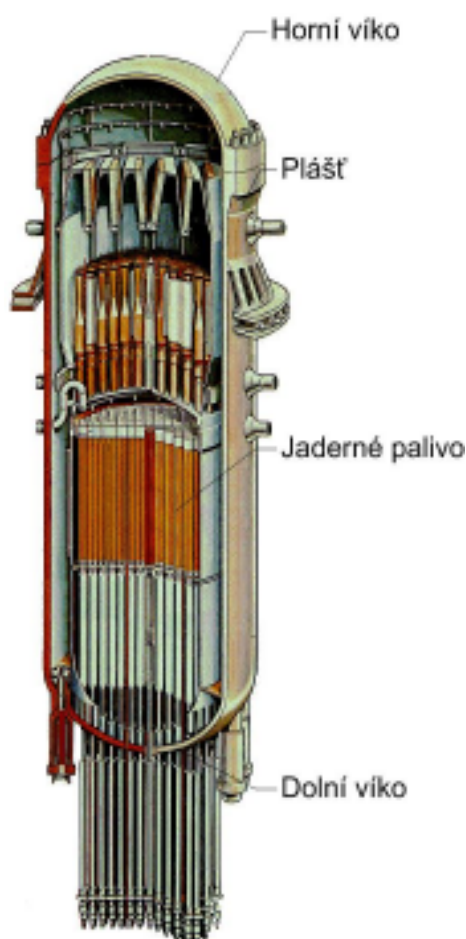
Takto navržený stroj bude mít velkou konkurenční výhodu v tom, že může vyrábět široké portfolio výrobků.

Protože předmětem mého zájmu jsou velké výkovky kroužků sloužící pro jaderné elektrárny, budu se v následující části zabývat jejich přesnější identifikací.

## 7 Specifika technologie kování kroužků reaktorových nádob

### Popis reaktorové nádoby:

Reaktorových nádob je několik základních druhů. Uvedený příklad platí pro tlakovou nádobu VVER 1000, stejného typu, jaká je např. v jaderné elektrárně Temelín. Nádoba je 11 metrů vysoká, je umístěna ve výšce 16 metrů a její vnější průměr je 4,585 m. To je důležitá hodnota z důvodu kování těchto nádob, respektive požadovaného minimálního průchodu mezi sloupy lisu. Použitý materiál je vysoce kvalitní nízkolegovaná chrom-nikl-molybden-vanadová ocel. Návrh nádoby je prováděn pro vnitřní přetlak 17,6 MPa při 350 °C. Vlastní provoz pak probíhá při tlaku 15,7 MPa za teplot 290-320 °C.



Obr. 7-1 Řez reaktorovou nádobou

Výroba tlakové nádoby reaktoru je prováděna volným kovááním s daným sledem technologických operací (pěchování, prodlužování, atd.) Technologie kování reaktorových nádob je velmi závislá na možnostech dané kovárny. Jsou tři základní parametry omezující výrobu reaktorových nádob.

**Parametry omezující výrobu reaktorových nádob:**

## 1) Maximální síla lisu

Maximální síla lisu musí umožnit napěchovat ingot na požadované rozměry, tak aby bylo dosaženo dostatečného stupně prokování.

## 2) Maximální hmotnost ingotu

Je vhodné používat maximální velikost ingotu, tak aby nádoba byla z co nejmenšího počtu kroužků. Tento menší počet je výhodný z hlediska odstranění svarů mezi kroužky. V současnosti je například v kovárnách Pilsen Steel s.r.o. maximální hmotnost ingotu 195t, což nedovoluje udělat nádobu z méně než 7 kroužků. I tak jsou jednotlivé kroužky vyráběny v provedení přesném, což v praxi znamená, že jsou přídavky menší než obvykle používané.

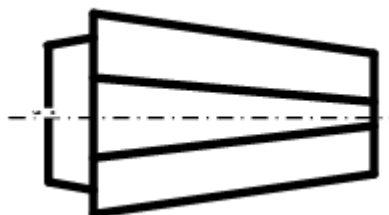
## 3) Manipulace

V souvislosti s maximální hmotností ingotu je nutno zajistit i potřebnou manipulaci s ním v prostrou lisu a to vhodnými manipulátory a jeřáby.

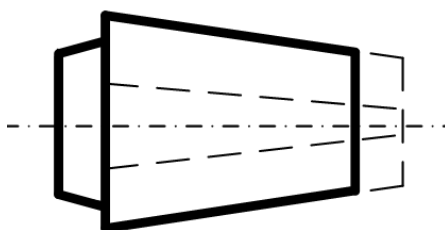
**Technologický postup kování kroužku**

Následující schémata popisují jednotlivé technologické kroky a ohřevy při kování kroužků.

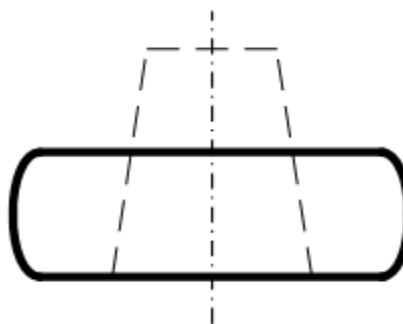
## 1) Na ingotu je vykován čep nutný pro manipulaci. (Ohřev 1)



## 2) Ukrojení špalku, tzn. odkrojení půdního odpadu. (Ohřev 2)

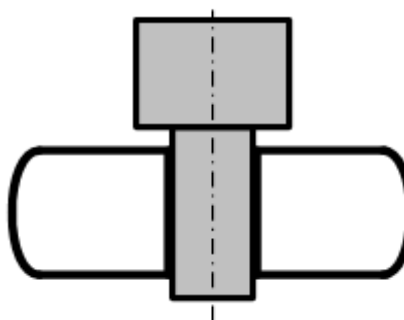


## 3) Napěchování ingotu na přibližnou výšku kroužku (Ohřev 3)

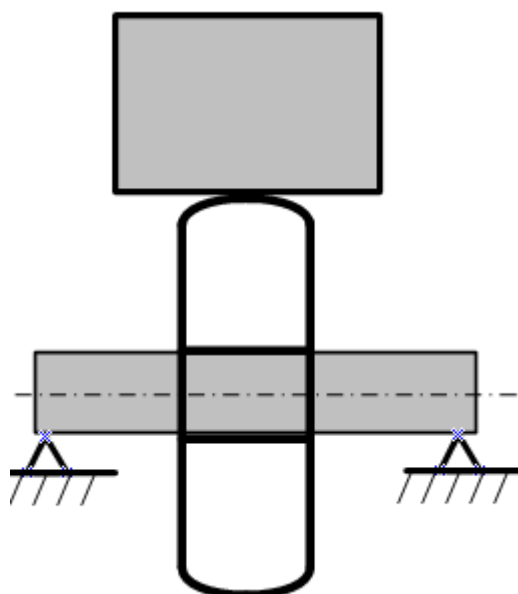


- 4) Pokud je nutné, aby bylo dosaženo většího stupně prokování, lze po pēchování zařadit operaci prodlužování a pak opět pēchování. Před následujícím děrováním je odstraněna hlava ingotu, která byla použita jako manipulační čep.

- 5) Proděrování ingotu (Ohřev 4)

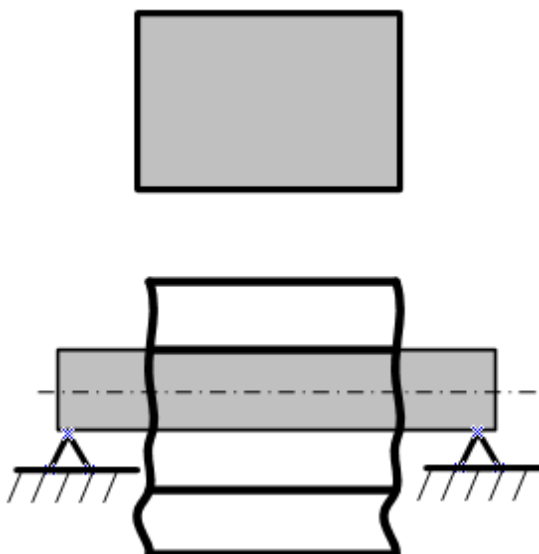


- 6) Začátek kování na trnu (Ohřev 5)

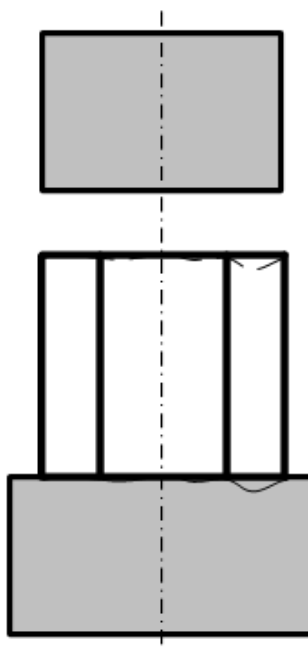


- 7) Prodlužování na trnu (Ohřev 6)





8) Srovnání čel kroužku (Ohřev 7)



9) Nakování kroužku na vnější rozměr (Ohřev 8)

10) Nakování kroužku na konečné rozměry (Ohřev 9)

### ***Shrnutí poznatků týkajících se technologie kování velkých kroužků***

- Samotný proces se skládá z několika operací kování a ohřevů. Kování probíhá při teplotách přibližně mezi 800 až 1180 °C.
- Pro určení nutné velikosti ingotu, kterou potřebujeme pro stanovení síly lisu, je nutno znát jaké budou přídavky při kování (tj. užitečná váha ingotu) a jaká bude váha částí odseknutých (od hlavy a pudy, tj. ztracená váha).
- Odseknutím od hlavy se ztratí přibližně 25% celkové váhy ingotu, od paty pak 5% celkové váhy ingotu.

- Při samotném kování jsou největší ztráty způsobené odpadáváním okují během pýchování, kdy dosahují přibližně 2% celkové hmotnosti ingotu.
- Při každé další operaci jsou ztráty způsobené odpadáváním okují přibližně 1% hmotnosti ingotu.
- Z výše uvedeného plyne, že díky technologickému postupu a ohřevům bude ztráta propalem rovna přibližně 10% hmotnosti ingotu.
- Při rozkovávání na trnu má tento trn průměr 1300mm. Je možno ale použít i větší průměr (1500mm). Při délce kroužku 2000mm je rozteč podpěr trnu přibližně 3000mm. Rozteč podpěr je důležitá z hlediska namáhání spodní traverzy.

## 8 Požadavky na tvářecí stroj zohledňující specifika technologie kování velkých kroužků pro reaktorové nádoby

### 8.1. Základní (obecné) požadavky kladené na stroj ve vztahu k dané technologii

- Průchody mezi sloupy

Průchod mezi sloupy musí být takový, aby kovaný kroužek na trnu měl dostatečnou vzdálenost od sloupů. Pro nádobu VVER 1000 je maximální kovaný průměr přibližně 5500mm. **Průchod** mezi sloupy by měl být alespoň **7000mm** (průměr kroužku plus potřebný manipulační prostor). Průchodem mezi sloupy je také omezen polotovar pro dna nádoby.

- Světlost stroje

Světlost lisu musí být dostatečná v závislosti na průměru kroužku. Pokud je jeho průměr 5500mm, **světlost** by měla být alespoň **6500mm** (průměr kroužku plus potřebný manipulační prostor).

- Síla stroje

Z důvodu snahy o minimalizaci počtu kroužků nádoby, je jedním z klíčových parametrů stroje jeho síla. Ta musí být dostačující k napěchování maximálního odlitelného ingotu. Je nutno stanovit ji pomocí následujících výpočtů.

### 8.2. Stanovení minimální síly kovacího zařízení

Aby bylo možno stanovit potřebnou sílu kovacího zařízení, je nutno nejprve přesně specifikovat ingot, který bude pěchován.

#### 8.2.1. Stanovení minimálních parametrů ingotu

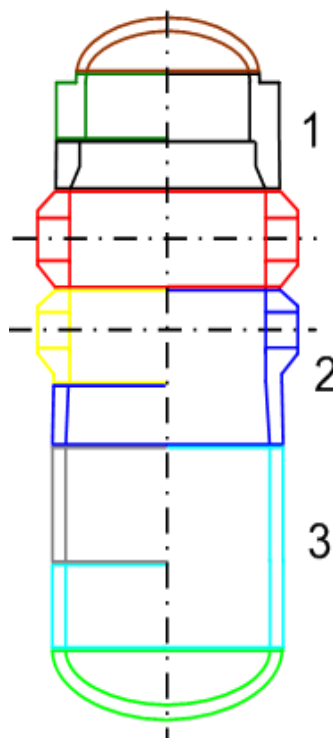
Z důvodu toho, aby byl minimalizován počet svarů na nádobě, je nutné využít maximální velikost ingotu. Zde ve výpočtu uvažujme ingot o hmotnosti 300t. Z něj je pak možno získat výkovky o hmotnosti přibližně 190t. Díky těmto parametrům lze modifikovat současnou konstrukci reaktorových nádob tak, že bude snížen počet svarů. Problémem svarů je to, že jsou to místa s koncentracemi napětí. V následující kapitole jsou popsány dvě možnosti jak modifikovat konstrukci nádoby s využitím moderního výrobního zařízení.

První varianta upravuje konstrukci s cílem minimalizovat celkový počet svarů. Druhá pak má za cíl odstranit svar, který se nachází v místech nádoby, kde je při provozu aktivní zóna reaktoru.

#### **Úprava stávající koncepce nádoby- varianta 1**

Tato varianta upravuje ve třech níže popsaných místech současnou konstrukci tlakové nádoby tak, aby byl na nádobě co nejmenší počet svarů.

1. Spojení opěrného nákržku a prstence víka v jeden kroužek o hmotnosti cca 188t (s nutnou drobnou úpravou geometrie).
2. Spojení dolního hrdlového prstence a opěrného prstence v jeden kroužek o hmotnosti 185t.
3. Spojení dolního hladkého a horního hladkého prstence v jeden kroužek o hmotnosti 170t.

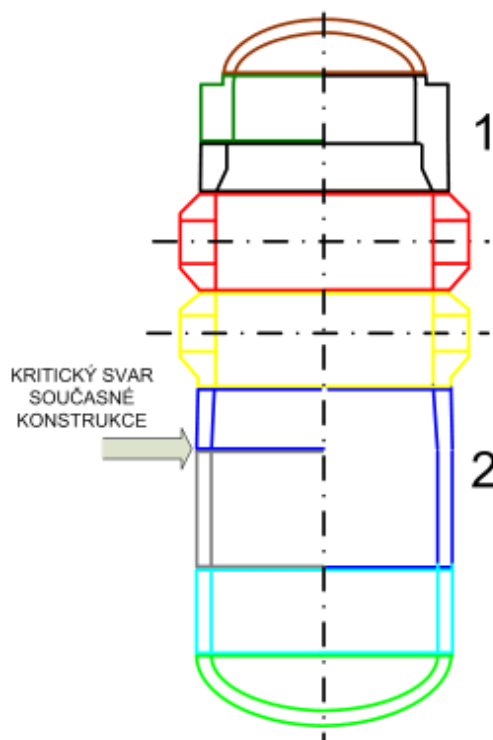


Obr. 8-1 Úprava konstrukce reaktorové nádoby - varianta 1 (vlevo původní varianta, vpravo upravená)

### Úprava stávající koncepce nádoby- varianta 2

Cílem této úpravy je odstranit kritický svar současné konstrukce, který je přímo v oblasti aktivní zóny reaktoru.

1. Spojení opěrného nákržku a prstence víka v jeden kroužek o hmotnosti cca 188t (s nutnou drobnou úpravou geometrie). (Pro tuto modifikaci je nutno mít ingot o hmotnosti 300t)
2. Spojení horního hladkého prstence a opěrného prstence v jeden kroužek o hmotnosti 165t. (Pokud by šlo pouze o modifikaci konstrukce za účelem odstranění kritického svaru (krok2), stačí pouze 250t ingot).



Obr. 8-2 Úprava konstrukce reaktorové nádoby - varianta 2 (vlevo původní varianta, vpravo upravená)

### Stanovení základních parametrů kovaného kroužku

Dále ve výpočtech uvažujeme pod pojmem kroužek jen nejtěžší kroužek u obou variant úpravy, tj. spojení dolního hrdlového prstence a opěrného prstence u varianty 1. Skutečná hmotnost vykovaného kroužku bude menší než hmotnost ingotu pro pýchování a to o propaly během každé operace.

**Na základě rozměrů reaktorové nádoby, technologických přídavků a hmotnosti výkovku kroužku lze stanovit jeho rozměry:**

**Vnitřní průměr 3770mm, vnější průměr 4800mm, výška 3440mm a hmotnost 186t. Pro takto velký kroužek bude dále navrženo zařízení pro jeho výrobu.**

#### 8.2.2. Analytický výpočet tvářecí síly na hydraulickém lisu

Maximální síla během technologického procesu nastane při první operaci pýchování ingotu.

Uvažujeme ingot, jehož hmotnost je 300 tun. Z něj s maximální výtěžností vyrobíme spojené kroužky pro reaktorovou nádobu dle výše zmíněného schématu na Obr. 8-1 Úprava konstrukce reaktorové nádoby - varianta 1.

Z ingotu je třeba odstranit jeho hlavu a patu, což znamená 25 % hmotnosti (hlava) a 5% hmotnosti (pata). Tyto části ingotu nejsou pro kování použitelné. Zvláště u hlavy jsou velké staženiny (lunkry).

Využitelná hmotnost ingotu pro pēchování je tedy:  $m_1 = 0,7 \cdot 300 = 210 \text{ t}$

Zbytek o hmotnosti 210t je nutno napēchovat. Lis tedy musí mít sílu, která lze určit např. na základě analytického výpočtu:

$$F = k_d \cdot S$$

$k_d$ ... pētvárný odpor

$S$ ... průmět dotykové plochy nástroje kolmé k ose tváření

Ingot si lze zjednodušeně představit jako válec průměru 2620mm a výšce 5000mm, po napēchování bude mít průměr 3300mm a výšku 3150mm.

pētvárný odpor obecně (dle Sieblova vztahu):

$$k_d = \sigma_p \left( 1 + \frac{\mu}{3} \cdot \frac{d}{h} \right)$$

$\sigma_p$ ... pētvárná pevnost závislá na teplotě

$\mu$ ... koeficient tření (0,3-0,5)

$d$ ... průměr

$h$ ... výška

po dosazení a výpočtu dle vzorce:    pro teplotu 1200 °C:  $k_d=23 \text{ MPa}$   
   pro teplotu 1100 °C:  $k_d=28 \text{ MPa}$   
   pro teplotu 1000 °C:  $k_d=35 \text{ MPa}$   
   pro teplotu 900 °C:  $k_d=57 \text{ MPa}$

Síla nutná pro napēchování ingotu při teplotě 1100 °C na průměr 3300mm a výšku 3150mm:

$$F = k_d \cdot S = 28 \cdot \frac{\pi \cdot 3300^2}{4} = 239,5 \text{ MN}$$

Z tohoto výpočtu stanovíme, že navržený lis by měl mít maximální pēchovací sílu 240 MN.

### 8.2.3. Stanovení potřebné energie bucharu

Z důvodu přehlednosti a možnosti vybrat i jiný stroj, došlo ke stanovení potřebné energie bucharu nutné k pēchování ingotu z normální oceli při 1100 °C.

Zjednodušený výpočet dle [Drastík 1972]:

$$A = p_{os} \cdot V \cdot \ln \frac{h_0}{h_1}$$

$p_{os}$ ... střední pētvárný odpor

$V$ ... objem

$h_0, h_1$ ... výšky před a po pēchování

Dle vzorců ve výše zmíněné literatuře byl stanoven střední přetvárný odpor v závislosti na střední poměrné rychlosti tváření a rozměrech před a po pēchování. Pēchování probíhá na několik úderů. Pro zde nastíněný výpočet byly použity hodnoty původní výšky ingotu  $h_0=5000\text{mm}$ , napēchované úderem na  $h_1=4800\text{mm}$ .

Po dosazení hodnot:

$$p_{os}=34 \text{ MPa}$$

$$V= 26,9 \text{ m}^3$$

je k napēchování ingotu z výšky 5000mm na 4800mm na jeden úder nutná energie  $A = 38200\text{kJ}$ .

## 9 Rešerše vhodných strojů

Prvním krokem při návrhu zařízení pro kování reaktorových nádob je důkladně provedená rešerše velkých tvářecích strojů. Z tohoto důvodu je nutno nashromáždit všechny potřebné informace.

V rešerši byly hledány tvářecí stroje, které jsou svými parametry nejbližší strojům uvedených v kapitolách Analytický výpočet tvářecí síly na hydraulickém lisu a Stanovení potřebné energie bucharu. Pokud nebylo možné u některé kategorie nalézt stroje s požadovanými parametry, jsou v rešerši uvedeny stroje těmito parametry nejbližší.

Zde publikovaná rešerše mapuje stav a hlavně koncepci v současnosti používaných velkých tvářecích strojů, které jsou svojí konstrukcí specifické.

Výstupem této rešerše je přehled o používaných koncepcích a principech velkých tvářecích strojů.

Pro analýzu byly použity následující zdroje:

- odborných znalostí a zkušeností pracovníků ZČU Plzeň
- archiv ZČU
- prospektová dokumentace výrobců velkých tvářecích strojů
- průzkum internetových stránek výrobců tvářecích strojů
- databáze výrobců výkovek schválených pojišťovnou Lloyd jako subdodavatele pro lodní průmysl

Zvolené základní parametry:

- lisovací síla (resp. energie úderu u bucharů)
- konstrukce rámu (rozměry pracovního prostoru, zdvih, počet válců)

Nevyplněné informace o jednotlivých strojích neuvedené v přehledu se nepodařilo získat. Rešerše je zaměřena na výrobce provozovatele těchto strojů. Uváděny jsou pouze nejsilnější stroje z daného výrobního programu.

V následujícím přehledu je pro krátkost uveden pouze výběr některých z nalezených strojů ze všech uvedených zdrojů.



## 9.1. Buchary

### **ANYANG FORGING PRESS MACHINERY INDUSTRY**

[Anyang 2011]

<b>Označení bucharu</b>	<b>C66-490</b>
Jmenovitá energie	490 kJ
pohon	hydraulický
maximální zdvih	2600mm
princip	mostový

Jedná se o největší buchar v nabídce výrobce, ale nemá dostatečnou energii pro napěchování ingotu.

### **LASCO**

[Lasco 2011]

<b>Označení bucharu</b>	<b>Lasco GH 4000</b>
Jmenovitá energie	400 kJ
pohon	hydraulický
maximální zdvih	725mm
princip	protiběžný

Výrobce uvádí, že je možno dodat buchary až do energie 400 kJ, ale to je pro napěchování ingotu málo.



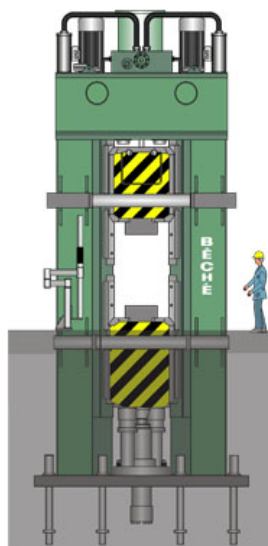
Obr. 9-1 Protiběžný buchar Lasco

**SCHULER**

Firma Schuler byla založena již v roce 1839 a má velké zkušenosti s výrobou velkého množství tvářecích strojů. V roce 2009 firma dodala největší protiběžný buchar na světě se jmenovitou energií 1400 kJ. Ten je schopný kovat výkovky o hmotnosti až 3 tuny. Tato velikost je ale pro požadovanou technologii nedostatečná.

[Schuler 2011] [Forging Magazine 2011]

<b>Označení bucharu</b>	<b>HG</b>
Jmenovitá energie	1400 kJ
pohon	hydraulický
maximální zdvih	1225mm
princip	protiběžný



Obr. 9-2 Protiběžný buchar Schuler

**BOLTEX**

[Boltex 2012]

Buchar Boltex je jedním z největších současných bucharů, přesto je pro danou technologii nedostatečný z hlediska velikosti.

<b>Označení bucharu</b>	<b>1400 kJ counterblow hammer</b>
Jmenovitá energie	1400 kJ
pohon	hydraulický
maximální zdvih	
princip	protiběžný



Obr. 9-3 Buchar Boltex

Firma Schuler a Boltex vyrábí nejsilnější buchary nalezené v rešerši, ale i ty jsou pro napěchování ingotu nedostatečné.

## 9.2. Hydraulické lisy

Rešerši v oblasti hydraulických lisů se podrobněji zabývají zprávy [Ráž 2011] a [Čechura&Kubec&Ráž 2009]. Zde je celkové shrnutí a krátký výtah týkající se největších vyráběných lisů.

### **TS PLZEŇ**

[TS Plzeň 2010]

TS Plzeň a.s. vyrábí hydraulické lisy již od roku 1872. Do roku 2005 vyrobila TS Plzeň a.s. přibližně 1 680 lisů a hydraulických zařízení určených pro zákazníky z nejrůznějších průmyslových odvětví v tuzemsku i v zahraničí. Jejich stroje jsou určeny pro těžké kovárenské provozy, lisovny mědi, hliníku, případně ocelí, stavebnictví i potravinářský průmysl. Vyrábí hydraulické kovací lisy ve variantách s horním nebo spodním pohonem.

<b>Označení lisu</b>	<b>CKV 12000</b>
lisovací síla	120 MN
pohon	horní
počet sloupů	4
počet pracovních válců	3
pracovní zdvih	3 m
rozměry mezi sloupy	6,5 m

**ŽDAS**

[Ždas 2010]

Výrobní program české firmy ŽDAS, a.s., je zaměřen na výrobu tvářecích strojů, kovacíh lisů, zařízení na zpracování šrotu, zařízení na zpracování válcovaných výrobků, odlitků, výkovků, ingotů a nástrojů, především pro automobilový průmysl. Lisy nemají nejvyšší silové parametry vhodné pro danou operaci.

<b>Označení lisu</b>	<b>CKVX 7500</b>
lisovací síla	75 MN
pohon	horní
počet sloupů	2
počet pracovních válců	
pracovní zdvih	3,1 m
rozměry mezi sloupy	4,2 m

**SMS MEER**

[SMS Meer 2010]

Spojením firmy SMS Schloemann-Siemag AG a metalurgického závodu divize Mannesmann Demag AG v roce 1999 ve firmu SMS Demag AG se vytvořil světový lídr v oblasti výstavby průmyslových zařízení pro zpracování oceli, hliníku a mědi, s kompletním procesním řetězcem táhnoucím se od zpracování surového železa po výrobu oceli, válcování a výrobu trubek až po zpracování a dokončovací linky pásů oceli za tepla a za studena.



Obr. 9-4 Lis SMS MEER, pohon třemi válci různého průměru

**NKMZ**

[NKMZ 2010]

Ukrajinský podnik NKMZ “Novokramatorsky Mashinostroitelny Zavod” vyrábí různé kovací stroje, které umožňují zákazníkům získat výkovky od 1 do 120 tun hmotnosti. Ingoty vyrábí z uhlíkové a legované oceli o hmotnosti až 170 tun. Historie výroby tohoto podniku sahá až do roku 1934. Do dnešní doby bylo vyrobeno 142 lisů různého provedení a velikostí.

NKMZ je také schopen vyrábět a dodávat automatizované kovací komplexy, které obsahují 100 MN hydraulický lis a kovací manipulátor vhodný pro kování menších dílů reaktorových nádob.

**Označení lisu**

lisovací síla	100 MN
pohon	horní
počet sloupů	4
počet pracovních válců	3
pracovní zdvih	3 m
rozměry mezi sloupy	1,8 x 4,8 m



Obr. 9-5 Lis NKMZ 100 MN

**URALMASH JSC**

[Uralmash JSC 2010]

Ural Heavy Machine Building Plant (Uralmashzavod nebo UZTM) byl uveden do provozu v roce 1933. Z tohoto důvodu může prokázat velké zkušenosti v navrhování a výrobě strojů a

zařízení, značný vědecko-technický potenciál, vysokou kvalifikaci zaměstnanců a spolupráci se zahraničními uznávanými společnostmi.

### **Označení lisu**

lisovací síla	150 MN
pohon	horní
počet sloupů	4
počet pracovních válců	3
pracovní zdvih	
rozměry mezi sloupy	

Dalšími výrobci velkých tvářecích strojů jsou například:

Muraro SPA- vyrábějící lisy od 20MN do 500MN, nejenom lisy hydraulické.

Dále pak ERIE Press Systems, United, Wepuko Pahnke Engineering a další.

### **9.3. Shrnutí rešerše- specifika velkých tvářecích strojů**

V rámci práce byl proveden průzkum jak v oblasti výrobců tvářecích strojů, tak v oblasti jejich provozovatelů. Vzhledem k rozsahu práce je zde uvedeno jen několik typických představitelů lisů a bucharů.

Získání informací o současném stavu vývoje tvářecích strojů ve světě brání nepřístupnost a neochota kontaktovaných výrobců v oblasti poskytování těchto informací a proto není jednoduché o všech strojích zjistit všechny nutné informace.

Výše uvedený soubor strojů byl podroben analýze, ze které by měla vyplynout doporučení pro další práce při stanovování vhodné koncepce pro návrhy nových strojů.

#### ***Z výše uvedeného lze s ohledem na konstrukci strojů konstatovat následující:***

Pro lisy platí, že převážně jsou použity rámy sloupové, a to do cca 80 MN jak dvousloupové, tak čtyřsloupové.

Pro síly nad 80 MN jsou rámy lisů většinou čtyřsloupové. Rozteče sloupů lisů CKV tvoří značně protáhlý obdélník a zdá se, že většina lisů je stavěna převážně pro kování výkovků typu hřídelí, a tomu odpovídá i jejich pracovní prostor.

U většiny starších řešení se používají sloupy nepředepnuté, vykované z jednoho kusu, u novějších se objevují sloupy skládané-předepnuté.

Pro buchary platí, že nejčastěji se jedná o protiběžné buchary poháněné hydraulicky. Konstrukce je většinou robustní, rám má dvě stojiny a jedná se o svařence ze silných plechů.

Nevyrábí se ale buchary s dostatečnou energií úderu a ani by nešlo takto velký ingot do jejich pracovního prostoru vložit, proto je nutno tuto technologii provést na hydraulickém lisu.

Z hlediska tvářecích strojů se tedy jako vhodné jeví hydraulické lisy. Ty disponují dostatečnou silou i průchody mezi sloupy. Tyto stroje jsou také v současnosti pro tuto technologii používány. Cílem následující práce je hledání možností inovace hydraulických lisů pro výrobu největších kroužků.

## 10 Volba funkčního principu lisu vhodného pro kování reaktorových nádob

Velký hydraulický lis lze rozdělit na tři základní konstrukční uzly:

- pohon
- konstrukce traverz
- konstrukce sloupů

Tyto uzly je nutno podrobně zanalyzovat a stanovit možnosti řešení z konstrukčního hlediska. K tomu je využito metod systémového navrhování technických produktů Engineering Design Science (EDS) [Hosnedl 2010]. Pro každý uzel jsou jednotlivé možnosti konstrukce přesně popsány. Při tomto popisu je brán ohled na specifika kování velkých kroužků reaktorových nádob. Pomocí morfologických matic jsou následně pro každý uzel vytvořeny tři konstrukční varianty. Tyto varianty jsou v závěru kapitoly 10 zhodnoceny a vybrána je optimální koncepce stroje.

Jednotlivé koncepce konstrukčních uzlů je nutno správně zhodnotit. K tomu slouží připojené analýzy a výpočty.

### 10.1. Rozbor konstrukce pohonu

V následující kapitole je proveden důkladný rozbor možností pohonu hydraulického lisu a jsou vybrány možnosti pro navrhovaný stroj.

Konstrukce pohonu lze realizovat několika způsoby, teoretické možnosti při jeho konstrukci jsou následující:

- Pro pohon a určení jednotlivých pracovních stupňů lisu slouží válce umístěné v jeho rámu. V praxi lze využít různý počet válců se stejným nebo různým průměrem. Jejich umístění však musí zajistit centrické působení vyvozené síly. Z výrobního hlediska mohou být válce řešeny jako výkovky nebo odlitky. Výhodnější je využít kované válce, protože mají větší pevnost. U menších strojů lze vyrobít válce jakou součást traverzy.
- Pohon stroje lze realizovat s horním nebo spodním pohonem. Každá z těchto variant má svá specifika v požadavcích na hloubku základu a výšku haly. Jako poháněcí médium stroje lze využít hydrauliky. Obecně by šla použít i pneumatika, ale u takto velkých lisů ztrácí význam kvůli vysoké pružnosti vzduchu.
- Pokud je nutno zvýšit vedení pohyblivé traverzy, je možno vytvořit vodící trn. Nevýhodou tohoto řešení je vysoké namáhání trnu při excentrickém zatížení.
- Pro vyvození zpětné síly je nutno vyřešit koncepci zpětných válců. Ty lze umístit na horní nebo spodní traverze. Výhodou umístění na horní traverze je snížení možnosti poškození válců při manipulaci s výkovkem. Nevýhodou ale je nutnost připojení tažných tyčí. Počet zpětných válců závisí na tíze zvedaných hmot. V praxi se využívají dva nebo čtyři válce.



V následující morfologické matici jsou znázorněny 3 varianty konstrukce pohonu lisu (zelená, červená a modrá).

princíp	hydraulika	pneumatika						
počet válců	1	2	3	4	5			
vodící trn	ano	ne						
válce stejného průměru	ano	ne						
počet pracovních stupňů	1	2	3	4	5	6	7	
koncepce pohonu	spodní	horní						
vkládání válců	ano	ne						
uchycení válců	za přírubu	opřeno o dno						
válec	kovaný	odlévaný						
umístění zp. válců	dole	nahore						
počet zpětných válců	2	4						

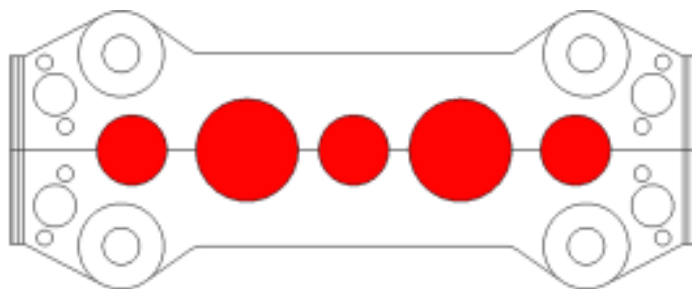
Obr. 10-1 Morfologická matice týkající se pohonu lisu

### Analýza možností pohonu hydraulického lisu a jeho inovace

Pohon lisu o síle pěchovací síle 240MN je realizován pracovní kapalinou o tlaku 42 MPa. Cílem nového řešení je navrhnout takové rozložení a velikost pěti pracovních válců, kdy jejich postupným zapojováním bude síla narůstat o stejnou hodnotu. Takto navržený stroj bude mít sedm pracovních stupňů.

Umístění zpětných válců je na boční straně horní traverzy. Ke každému zpětnému válci jsou přiřazeny dvě tažné tyče, zvedající pohyblivou traverzu. Vzhledem k hmotnosti pohyblivých částí lisu je vhodné použít čtyři zpětné válce. Ty zaručí stabilitu pohyblivé traverzy při zvedání a vyvedou požadovanou sílu.

Na následujícím obrázku je znázorněno rozložení válců. Dle dalšího schématu je patrné, jak jsou jednotlivé válce v různých stupních zapojovány.

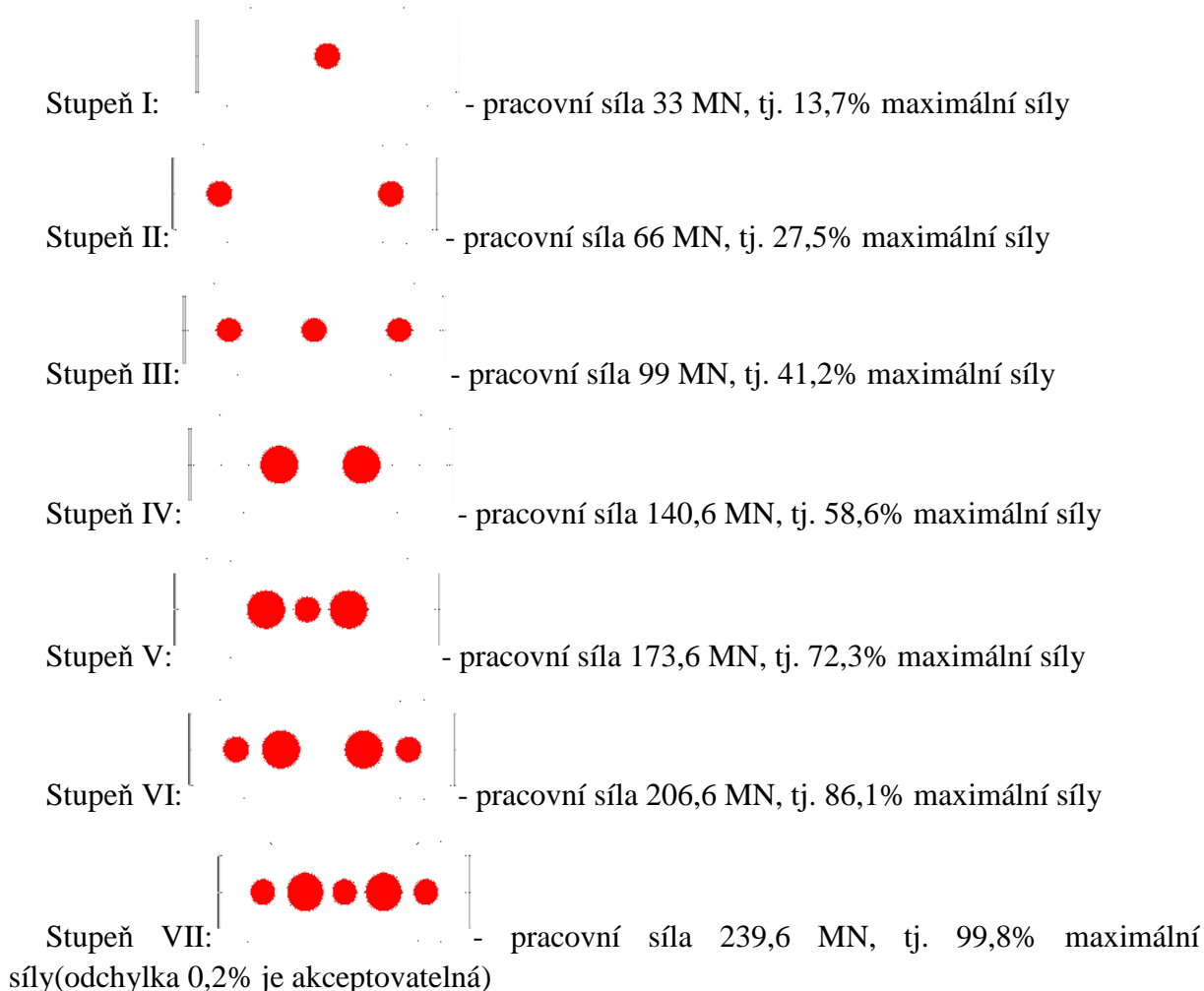


Obr. 10-2 Schéma rozložení válců u sedmi-stupňového pohonu - varianta 1

Stanovení průměru válců závisí na zvoleném pracovním tlaku a síle lisu. Při tlaku 42 MPa lze realizovat sedmi-stupňový pohon pomocí:

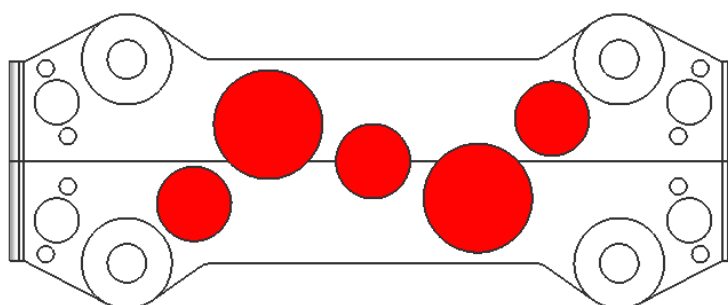
Válce menšího průměru:  $D=1000\text{mm}$

Válce většího průměru:  $D=1460\text{mm}$



Pokud by nebylo možné všech pět válců vyskládat v řadě, nebo pokud třeba vadí umístění zpětných válců, je možno je umístit vzájemně přesazené jak ukazuje následující obrázek. Oblast která je u této varianty nutná pro válce je kratší, než u předchozí. Toto řešení má ale hlavní problém v tom, že pro odlitek horní traverzy jsou třeba dvě modelová zařízení. Obě poloviny jsou totiž zrcadlově symetrické.

Podrobněji je tato problematika uvedena v literatuře [Čechura&Ráž 2011].



Obr. 10-3 Schéma rozložení válců u 7-stupňového pohonu - varianta 2

## 10.2. Rozbor konstrukce traverz

V této kapitole je proveden rozbor možností konstrukce traverz a jsou vybrány možnosti pro navrhovaný stroj.

Konstrukce traverz u velkých lisů má následující specifika a možnosti:

- Z výrobního hlediska lze traverzy vyrábět pouze jako odlitek. Tato výroba je omezena maximální hmotností odlitku, který je daná slévárna schopna dodat. Toto omezení se liší u každé slévárny. Důležitým parametrem při výrobě je možnost manipulace s traverzou z jednoho dílu. Pokud není možno vyrobit traverzu z jednoho kusu, je nutno vyrobit ji jako dělenou v příčném nebo podélném směru (vzhledem k ose stolu). Počet dílů traverzy je určen maximální hmotností jednotlivých odlitků.
- U dělené traverzy je nutno správně definovat předepnutí jednotlivých dílů, tak aby bylo zabráněno odlehnutí. Předepnutí spojení dílů traverzy se realizuje pomocí průchozích kotev. Na těch lze snadno nastavit požadovanou hodnotu předepnutí. Aby bylo dosaženo přenosu zatížení mezi jednotlivými díly, je nutno připojit tvarové elementy na dělící ploše, které mohou být vkládané nebo součástí traverzy.

<b>technologie výroby</b>	odlitek	svařenec			
<b>princip konstrukce</b>	dělené	nedělené			
<b>dělení</b>	horizontální	vertikální podél	vertikální napříč		
<b>počet dílů</b>	1	2	3	4	5
<b>realizace přenos zatížení</b>	vložená pera	pera součástí traverz			
<b>předepnutí dílu</b>	kotvy skrz	zděře	krátké šrouby		

Obr. 10-4 Morfologická matice týkající se konstrukce traverz

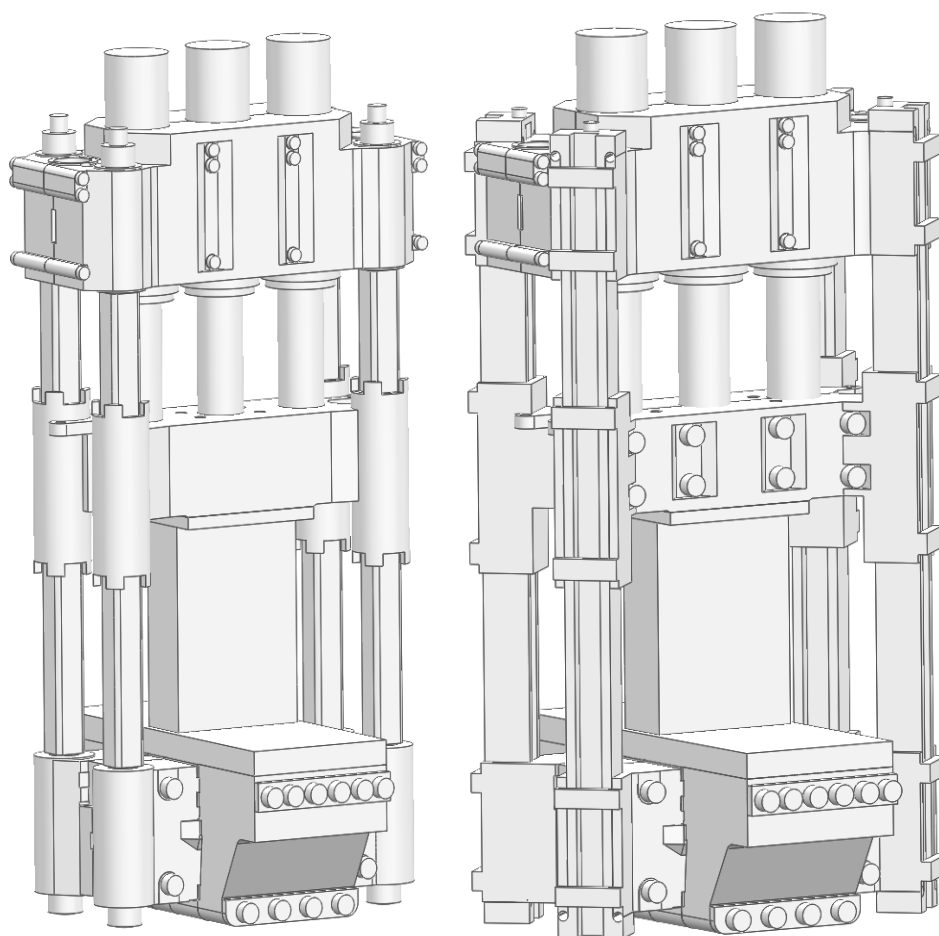
### Analyza dělené a nedělené konstrukce traverz

Pro analýzu vlivu typu traverz na chování a vlastnosti stroje byl vybrán jako reprezentační lis CKV 120/145. Tento menší lis je pro porovnání vybrán proto, že u něj lze vyrobit bez problémů pohyblivou traverzu z jednoho dílu. Pohyblivá traverza je nejlehčí traverza tohoto hydraulického lisu, horní i spodní traverza je vyrobena jako dělená. Tato pohyblivá traverza je na horní hranici vyrobitelnosti z hlediska hmotnosti v slévárně, jakou je třeba Pilsen Steel s.r.o. v Plzni.

Pohyblivá traverza, která byla navržena pro předepnutý rám stroje je nedělená.

Pro nepředepnutý rám stroje je dělená na dva díly v podélném směru traverzy (tj. kolmo na osu stolu). Spojení dílů dělené pohyblivé traverzy je pomocí osmi předepnutých šroubů. Zatížení se přenáší pomocí vloženého pera mezi obě poloviny traverzy. Toto pero zapadá do drážek v traverzách.

Analýza vlastností dělených a nedělených traverz je provedena na základě porovnání nedělené a dělené pohyblivé traverzy téhož lisu.



Obr. 10-5 Lis CKV 120/145 MN s nedělenou a dělenou pohyblivou traverzou

### ***Analýza tuhosti dělené a nedělené traverzy***

Tuhost lze chápat jako deformaci traverzy v závislosti na působící síle. Proto lze jako ekvivalent tuhosti vzít maximální průhyb traverzy ve svislém směru. Obě varianty traverz jsou namáhány stejným způsobem.

maximální průhyb nedělené traverzy: 1,3mm

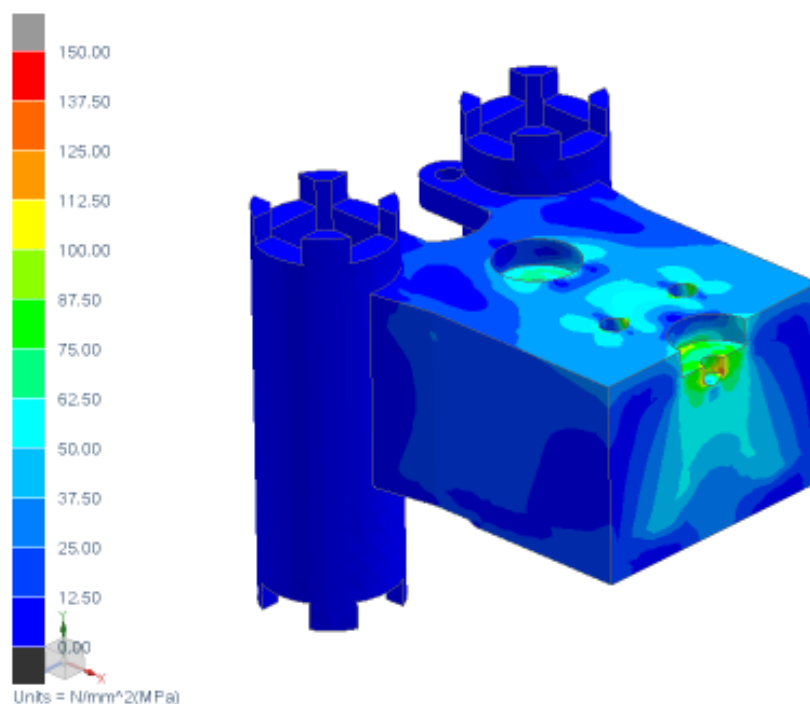
maximální průhyb dělené traverzy: 1,2 mm

Z uvedeného vyplývá, že z hlediska tuhosti jsou obě varianty srovnatelné.

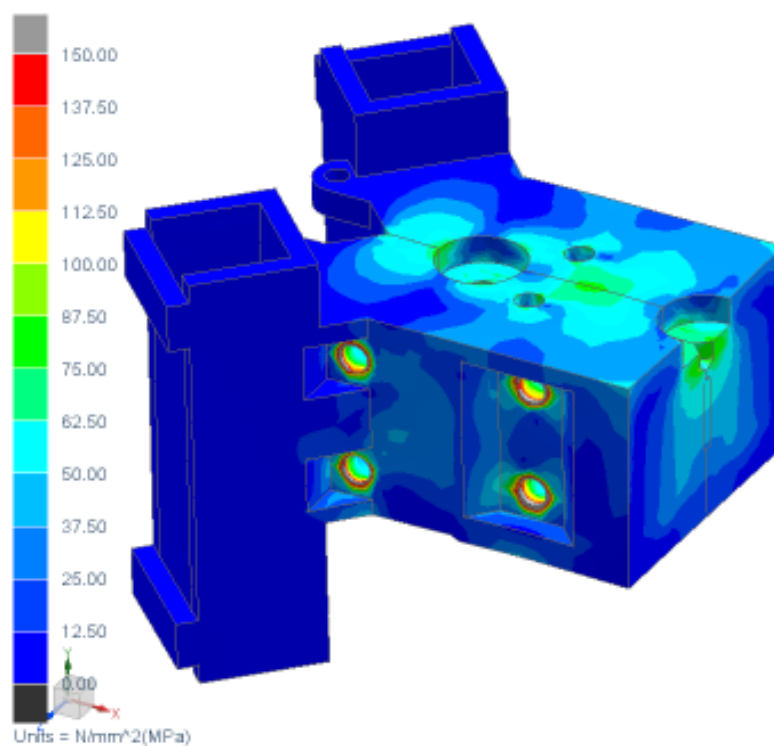
### ***Napěťová analýza různých typů traverz***

Z následujících obrázků Obr. 10-6 a Obr. 10-7, zobrazující napětí na různých typech pohyblivé traverzy, je patrné že nedělená traverza má lepší rozložení napětí. Nejsou u ní špičky v kontaktních oblastech, tak jak je tomu pod hlavami spojovacích šroubů dělené traverzy. Nedělená traverza je namáhána pouze pracovní silou při technologickém procesu. U dělené působí navíc namáhání od předepínací síly spojovacích šroubů. Lze tedy říci, že pokud je to z technologického hlediska možné, je lepší s ohledem na napětí dělat traverzy z jednoho kusu. To je však většinou u velkých lisů nemožné.

Stanovení okrajových podmínek pro simulace MKP vychází z publikované práce týkající se virtuálního modelování tvářecích strojů [Hlaváč&Ráž&Čechura 2011].



Obr. 10-6 Napětí Von Mises nedělené traverzy



Obr. 10-7 Napětí Von Mises dělené traverzy

## **Analýza hmotnosti traverz**

Dělená traverza je o 50t těžší než nedělená ze dvou primárních důvodů. Za prvé je nutno v dělicí rovině traverzy mít více materiálu než u nedělené, protože je zde drážka pro pero, která musí být dostatečně masivní. Druhým důvodem nárůstu hmotnosti je také vytvoření děr pro spojovací šrouby. Tyto díry jsou průchozí a lze si je představit jako díry, které procházejí silnou rozpěrnou trubkou, která je do modelu traverzy přidána.

hmotnost nedělené traverzy: 278t

hmotnost dělené traverzy: 328t

Budeme-li porovnávat hmotnost té části traverz, která je nejvíce namáhána ohybem od pracovní síly, pak tato středová oblast u nedělené traverzy má 163,5t u dělené traverzy 203,6t.

Z předchozích údajů lze říci, že hmotnost nedělené traverzy / hmotnost dělené traverzy je přibližně 1/1,2.

## **Zhodnocení porovnání dělené a nedělené traverzy**

Obě konstrukce lze hodnotit z několika hledisek. Z pohledu tuhosti jsou si obě rovnocenné, ale každá konstrukce má určitá specifika. Nedělená traverza je lehčí a vychází i napětově výhodněji, protože není namáhána spojovacími šrouby. Proto pokud je to tedy možné, je vhodné volit nedělenou variantu.

V praxi ale hraje velkou roli výrobní a montážní hledisko, které je úzce spjaté s možnostmi výrobního závodu. Hmotnostní omezení maximálního odlitku je dané dimenzováním pecí či jeřábů. Pokud hmotnost nedělené traverzy přesahuje toto omezení je nutno ji vyrobit jako dělenou.

## **10.3. Rozbor konstrukce sloupů**

Jako jednomu ze stěžejních dílů lisu, je sloupům věnována zvláštní kapitola, shrnující možnosti jejich návrhu a to, jak pomocí jejich konstrukce lze ovlivnit vlastnosti celého hydraulického lisu.

Při návrhu sloupů jsou následující možnosti a specifika jejich návrhu:

- V praxi se nejčastěji volí čtyř nebo dvousloupová konstrukce rámu.

*Volba mezi 2 sloupovou variantou a 4 sloupovou*

Vycházíme z návrhu, že maximální přípustné napětí ve sloupu je 40 MPa. Ze základního výpočtu vyjde předběžný průřez sloupů (u níže uvedeného příkladu výpočtu reprezentován průměrem sloupů). Uvažujeme zatížení maximální pčhovací silou. Nejprve spočteme průměr sloupu namáhaného pouze na tah s tím, že vliv ohybu budeme uvažovat jako 20%-ní zvětšení tahového zatížení:

$$d_{4sloup} = \sqrt{\frac{1,2 \cdot F}{\sigma_D \cdot \pi}}$$

⇒ Předběžný průměr jednoho sloupu 4 sloupové varianty:  $d_{4sloup}$  (v konečném výpočtu nutno důkladně zkontrolovat maximální napětí na malém průměru závitu).

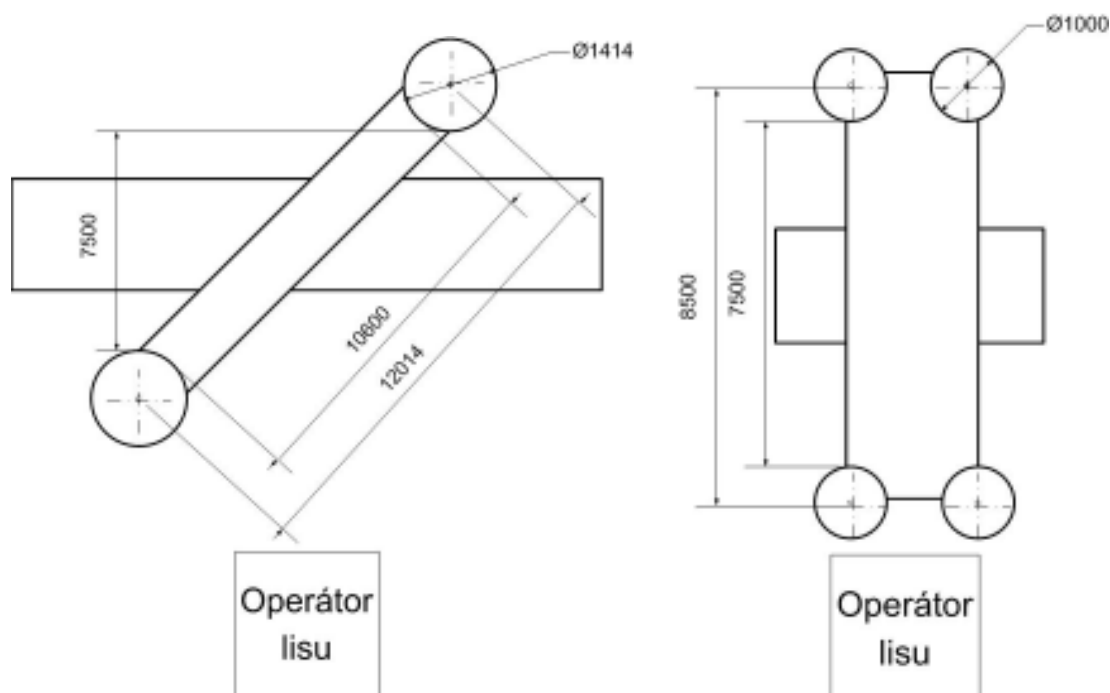
Průměr sloupu 2 sloupové varianty zjistíme z rovnosti ploch:

$$4 \cdot \frac{\pi \cdot d_{4sloup}^2}{4} = 2 \cdot \frac{\pi \cdot d_{2sloup}^2}{4}$$

$$d_{2sloup} = \sqrt{d_{4sloup}^2 \cdot 2}$$

Je patrné (z následujícího obrázku, uvedeného jako příklad), že **vhodnější je 4 sloupový rám**, protože konstrukce 2 sloupová by vedla na zvýšené ohybové namáhání traverz z důvodu nutnosti větší rozteče sloupů (přibližně o 41%) při zachování stejného průchodu mezi sloupy ve směru osy stolu u obou variant.

Hlavní výhodou čtyřsloupového rámu je jeho větší stabilita.



Obr. 10-8 Pohled na 2 a 4 sloupovou konstrukci lisu s příkladovými parametry

- Při návrhu sloupu je nutno vhodně zvolit jeho průřez, tak aby byla zajištěna maximální tuhost při minimální možné hmotnosti. Změnou průřezu lze ovlivnit tuhost sloupů v ohybu, ale také značně ztížit jejich výrobu. Volba průřezu souvisí přímo s vedením pohyblivé traverzy a vymežováním vůlí ve vedení. Jsou možné dvě koncepce sloupů a to předepnutá a nepředepnutá. Předepnuté sloupy jsou vhodnější pro dynamické namáhání. Nepředepnuté jsou výrobně méně náročné.
- Technologie výroby sloupů je úzce spjatá s jejich tvarem. Kované sloupy mají lepší materiálové vlastnosti, ale jejich výroba je náročnější. Lamelové skládané sloupy

jsou z výrobního hlediska jednodušší, ale jejich problémem je rozdílná tuhost dle směru zatěžování. Výhodou odlévaných sloupů je jejich relativně snadná výroba (pokud slévárna má dostatečně velké pece pro tepelné zpracování). Poslední možností výroby jsou svařované sloupy, u nichž musí být zamezeno vzniku trhlin ve svaru. V rámci výroby lze sloupy vyrobit jako duté (pokud to umožňuje jejich průřez). Vnitřní dutina je pak využita u předepnutých sloupů k umístění kotvy, u nepředepnutých jí lze přivést tlakovou kapalinu do horní části lisu. Následně je tlaková kapalina pomocí trubek přivedena do válců.

- Mezi sloupy a traverzami je nutno přenést zatížení. Způsob jeho přenosu je spjat s konstrukcí sloupů. U sloupů se závitem se použije vhodně dimenzovaná matice (např. kruhového průřezu). Pokud lze sloupy i s hlavou vložit do celého lisu, je možno sloupy vytvořit s hlavami z jednoho dílu (např. lamelové sloupy). Nepříznivým vlivem působícím na sloupy je přenesení ohybového namáhání přes hlavy sloupů. Toto ohybové namáhání vznikne z průhybu horní a spodní traverzy. Částečně lze toto namáhání omezit vložením elementů (válečky) mezi hlavy sloupů a traverzy. Záleží zde na správné orientaci válečků vzhledem k průhybu traverzy. Nejvhodnější (ale konstrukčně velmi obtížné) je mít osu válečků rovnoběžnou s boční stranou traverzy.

<b>počet sloupů</b>	2	3	4	5	6
<b>technologie výroby</b>	odlévané	kované	svařované	lamelové	
<b>průřez</b>	kruhový	čtvercový	X	H	jiný
<b>předepnutí</b>	loewy systém	celý sloup	v oblasti traverz		
<b>přenos pracovní síly</b>	matice	hlavy sloupů	vložené elementy		
<b>počet částí sloupů</b>	1	2	3	4	5
<b>vrtání sloupů</b>	ano	ne			
<b>přívod tlakové kapaliny</b>	trubky k válcům	vnitřkem sloupu		tlak. hadice k válcům	

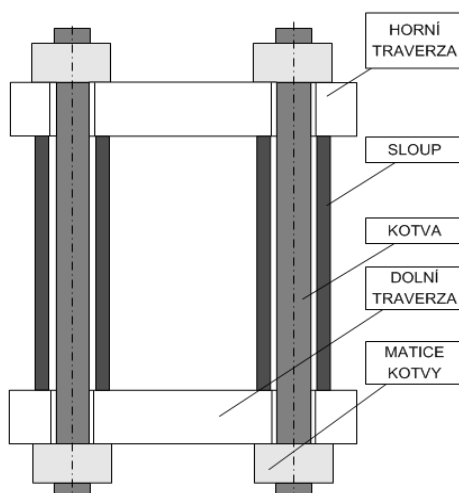
Obr. 10-9 Morfologická matice týkající se konstrukce sloupů

### **Analýza konstrukce sloupů**

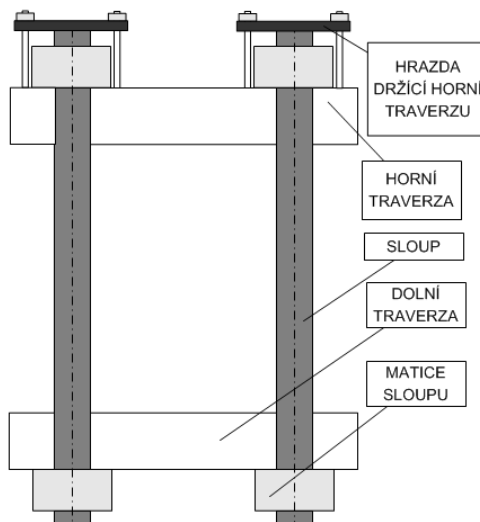
Aby bylo možno objektivně stanovit výhody a nevýhody jednotlivých koncepcí sloupů, je nutno provést jejich srovnání. Následující analýza vychází z citované literatury [Čechura&Ráž 2011]. Níže jsou komplexně porovnány následující koncepce, tak aby byla vybrána optimální varianta sloupů lisu pro kování velkých kroužků:

- předepnutý čtvercový sloup
- nepředepnutý kruhový sloup
- nepředepnutý sloup s průřezem "H"





Obr. 10-10 Schematické znázornění předepnutých sloupů



Obr. 10-11 Schematické znázornění nepředepnutých sloupů, známých jako systém Loewy

### Předepnuté sloupy

Předepnuté sloupy Obr. 10-10 mají vstupní tlakové napětí vzniklé předepnutím. Při zatěžování jsou sloupy odlehčovány a napětí se snižuje. Dále se k tlakovému napětí přidává ohyb a smyk. Tuhost sloupů ovlivňuje tuhost celého rámu, naklonění stroje a z toho plynoucí přesnost kování. Excentricita zatížení je přenášena částečně sloupy a případně vodícími trny nebo plunžry.

Předepnuté sloupy se skládají z předepínané kotvy a vlastního rozpěrného těla sloupu. Rozpěrné tělo sloupu bývá většinou kruhového nebo čtvercového průřezu, jehož vnitřním otvorem prochází kotva vyvozující předepnutí sloupu. Výhodou čtvercových sloupů je lepší možnost nastavování vůlí ve vedení pohyblivé traverzy během provozu lisu, a to především při běžném seřizování vlivem opotřebení kluzných ploch. Nevýhodou tohoto způsobu vedení je, že při různých směrech namáhání, zachycují ohybové zatížení s různou efektivitou.

Kruhové sloupy mají nevýhodu v obtížnějším vymezení vůle i v konstrukci vedení. Jejich výroba je však technologicky méně náročná a jejich tuhost při ohybovém zatěžování je ve všech směrech stejná.



Obr. 10-12 Předepnutý sloup

### Nepředepnuté sloupy

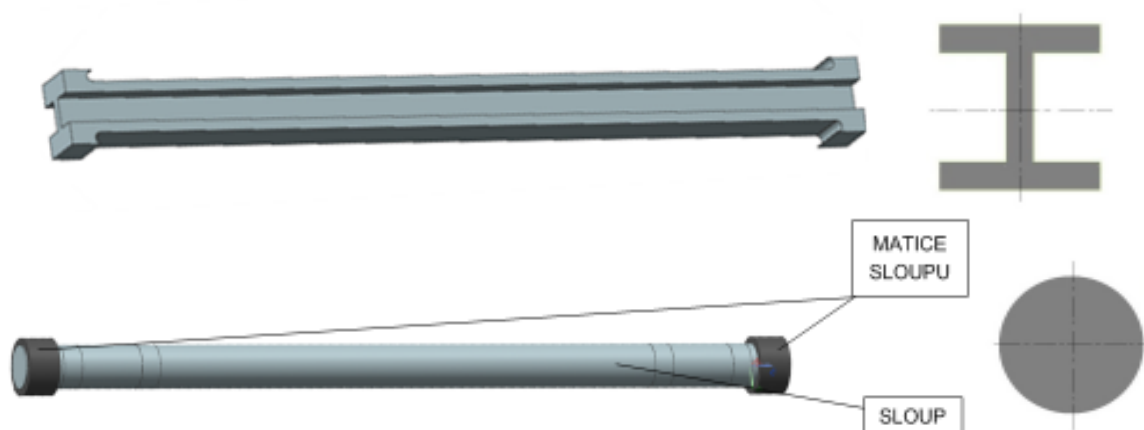
Nepředepnuté sloupy se v praxi provádí v několika konstrukčních řešeních. Běžně se používá klasického svěrného maticového spojení s traverzami, avšak také závěsného zachycení traverz dle Obr. 10-11. U obou uvedených způsobů řešení jsou však sloupy rozdílně namáhány.

Nepředepnuté sloupy Obr. 10-11 známé jako systém Loewy jsou namáhány pouze pracovní silou na tah a tlakovým zatížením od nesených hmot. Mezi další namáhání patří ohyb závislý na průhybu traverz a smyk vzniklý při excentrickém zatížení. Volba typu sloupů pro velké hydraulické lisy musí také zohledňovat výrobní a technologické možnosti při jejich zhotovování.

Pro porovnání byly zvoleny různé průřezy sloupů. Pro předběžnou predikci vlastností jednotlivých sloupů byly porovnány momenty setrvačnosti různých průřezů. Tyto průřezy byly zvoleny tak, aby měly stejnou plochu a tím sloupy stejnou hmotnost (H, X, kruh; hodnoty byly zjištěné výpočetním softwarem). Na základě tohoto byly pro virtuální simulaci vybrány varianty nepředepnutých sloupů s průřezy "H" a kruh. U "H" sloupů je to volba z důvodu jejich nejvyššího odporu proti ohybu, u kruhových sloupů z důvodu jejich výrobní dostupnosti. Kruhové sloupy jsou mimo jiné při návrhu uvažovány i proto, aby bylo patrné jaké výhody má koncepce "H" sloupů oproti v praxi často používaným kruhovým sloupům.

Tab. 1 Momenty setrvačnosti

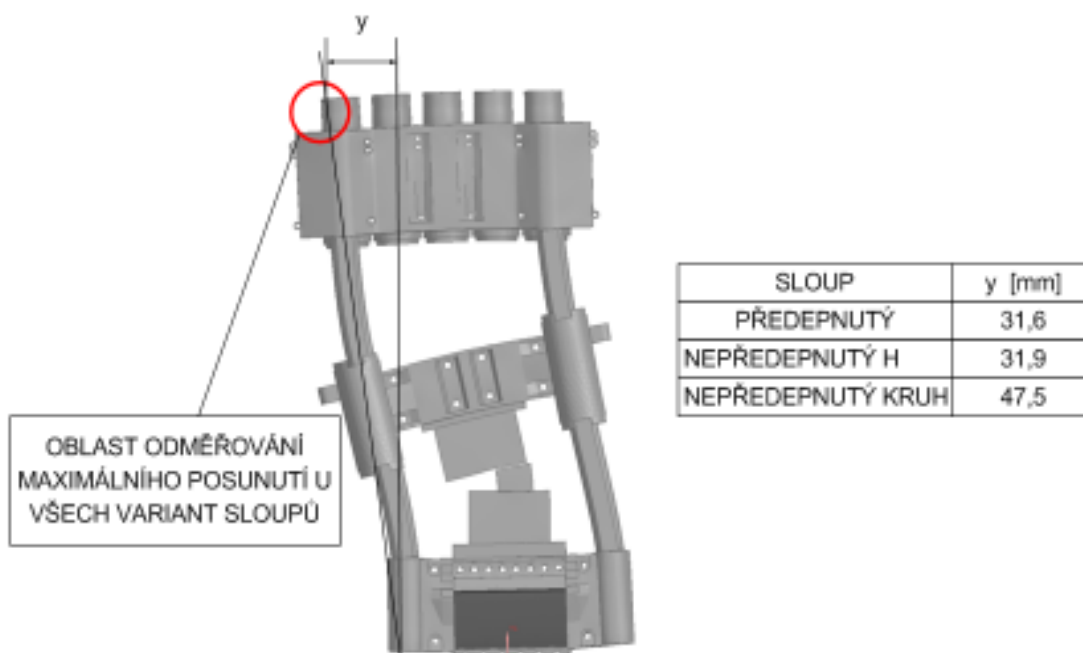
PROFIL	J [mm <sup>4</sup> ]
H	1,09E+11
X	8,97E+10
KRUH	4,9E+10



Obr. 10-13 Nepředeprnuté sloupy (H, kruh)

### Posunutí v podélném směru lisu s ohledem na použité sloupy

Vliv průřezu sloupů je patrný z naklopení lisu, což má vliv na jeho přesnost. Hlavním cílem zde bylo zjistit, který sloup je z hlediska chování při excentrickém zatížení nejvhodnější. Je přirozená snaha naklopení způsobené tímto zatížením minimalizovat, a proto bylo provedeno porovnání sloupů s různými průřezy a konstrukcemi.



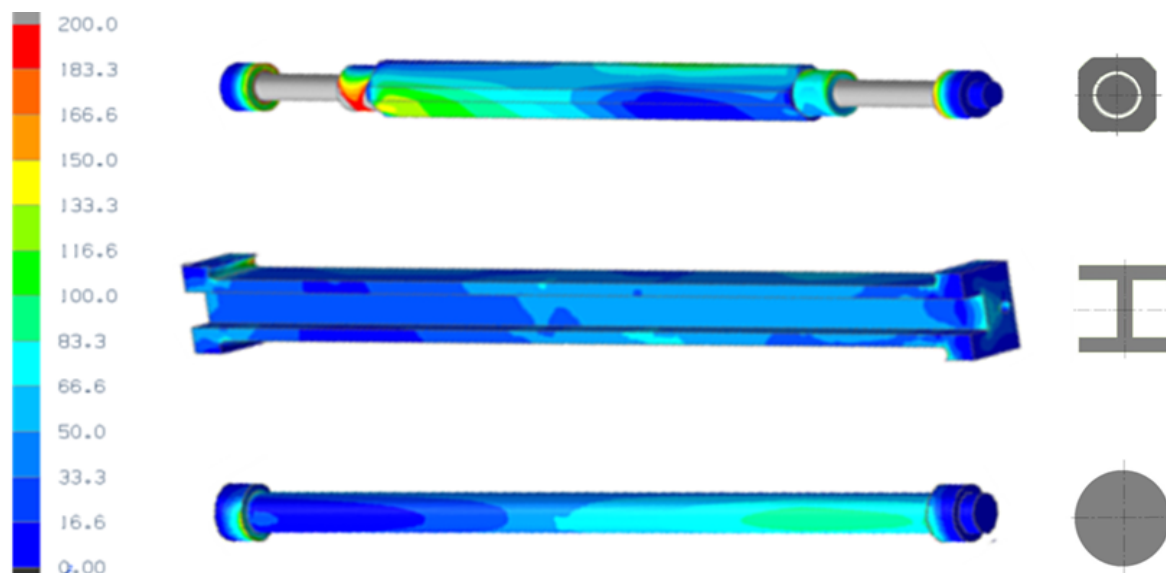
Obr. 10-14 Simulační model pro analýzu naklopení lisu

Výsledkem analýzy posunutí v podélném směru je zjištění, že hodnoty naklopení jsou pro předeprnutý sloup čtvercového průřezu 31,6mm a pro "H" sloup 31,9mm. Tyto dvě koncepce jsou z tohoto hlediska srovnatelné. Nepředeprnutý kruhový sloup má hodnotu posunutí větší (47,5mm), což je dáno jeho menší tuhostí.

### Rozložení napětí v jednotlivých částech lisu s ohledem na použité sloupy

Z hlediska maximálních napětí byl vliv tvaru sloupů porovnáván u sloupů a horních traverz, neboť u těchto částí se vliv předepnutí zřetelně projevuje.

#### Sloupy

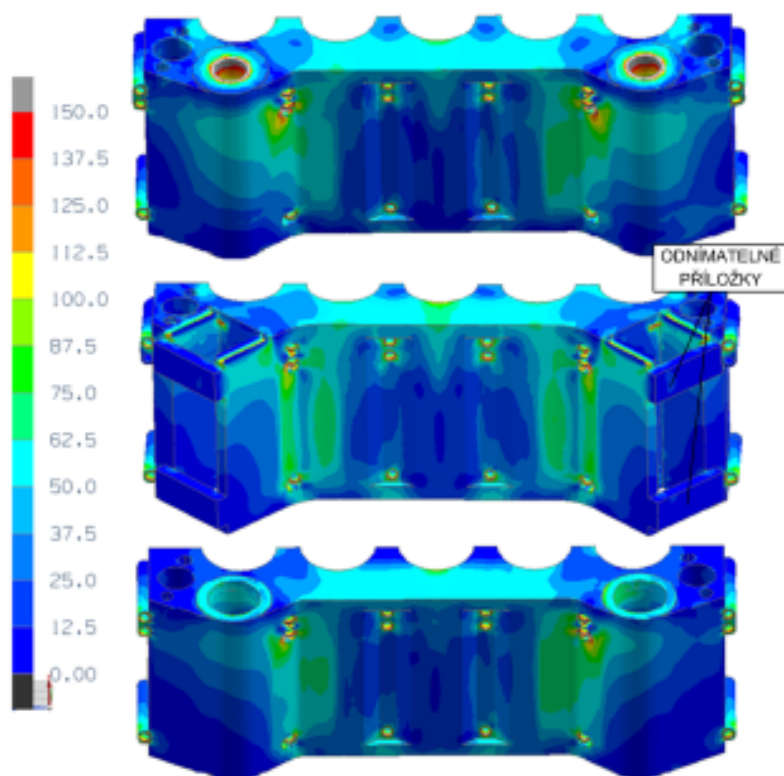


Obr. 10-15 Napětí Von-Mises pro jednotlivé varianty sloupů a) předepnuté b) "H" nepředepnuté c) kruhové nepředepnuté

Zásadní rozdíl je vidět mezi předepnutými a nepředepnutými sloupy. Tento rozdíl vzniká tím, že předepnuté sloupy jsou stlačeny předepínací silou. Kotvy předepnutých sloupů jsou velmi zatížené, a proto musí být vyrobené z kvalitních materiálů o vyšší pevnosti. Napětí na nich dosahuje až 300 MPa.

Jako nejvhodnější se pro navrhovaný lis jeví kruhové sloupy a sloupy s průřezem a "H".

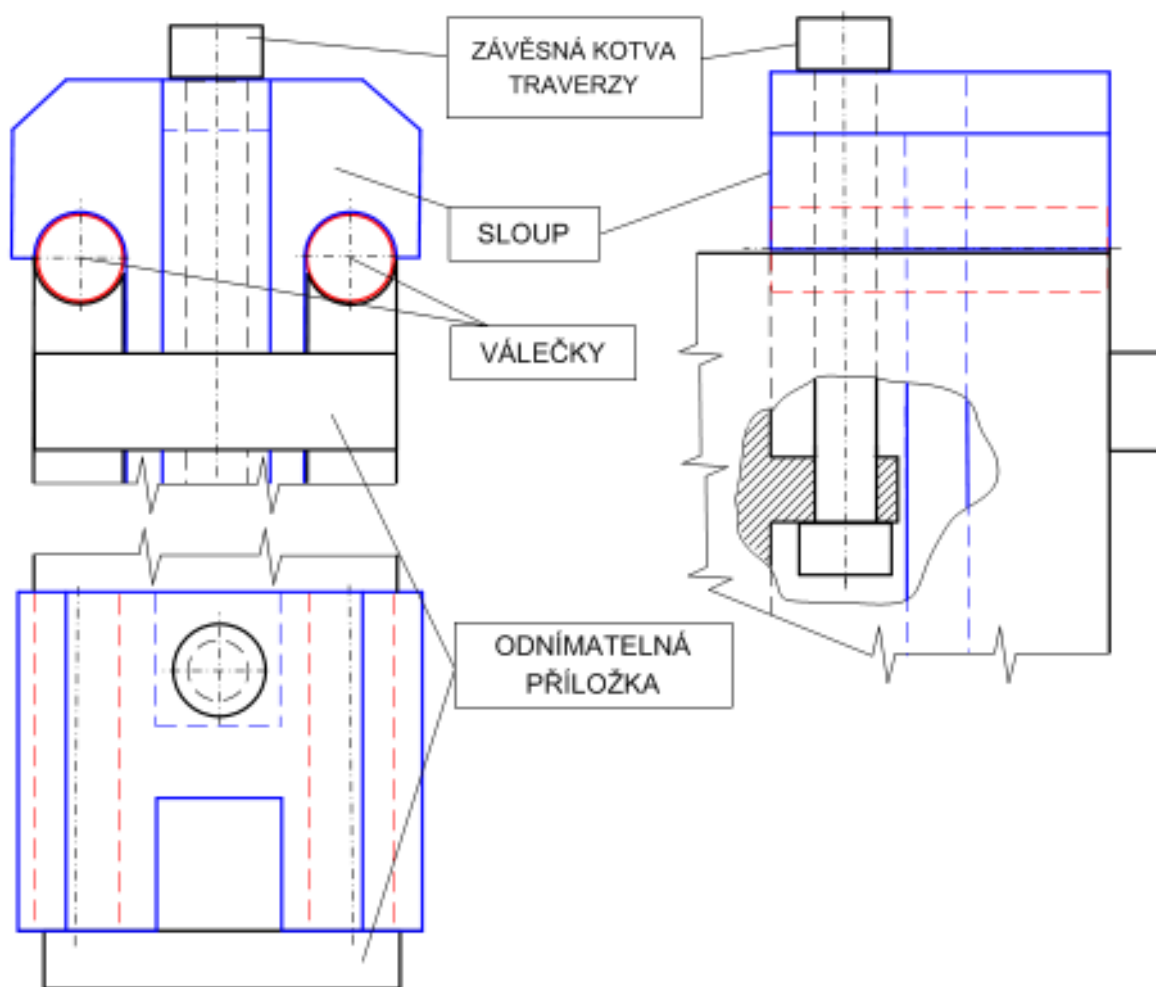
## Horní traverza



**Obr. 10-16** Napětí Von-Mises v horních traverzách pro jednotlivé varianty sloupů a) předepnuté b) "H" nepředepnuté c) kruhové nepředepnuté

Jak je z uvedených obrázků (pro horní traverzu) zřejmé, volba použitého sloupu silně ovlivní i namáhání traverz. Obecně se dá říci, že díky velké hodnotě předepnutí u předepnutých sloupů bývají v takové horní traverze větší napjatostní pole, než při použití sloupů nepředepnutých. U nepředepnutých sloupů se musíme někde vyrovnat s většími napjatostními špičkami ve stykových plochách mezi traverzou a sloupem a konstrukci navrhnout tak, aby bylo napětí co možno nejmenší.

Na následujícím Obr. 10-17 je znázorněno konstrukční řešení uložení sloupů v horní a spodní traverze. Toto řešení umožňuje částečné natočení během průhybu traverz při zatížení pracovní silou.

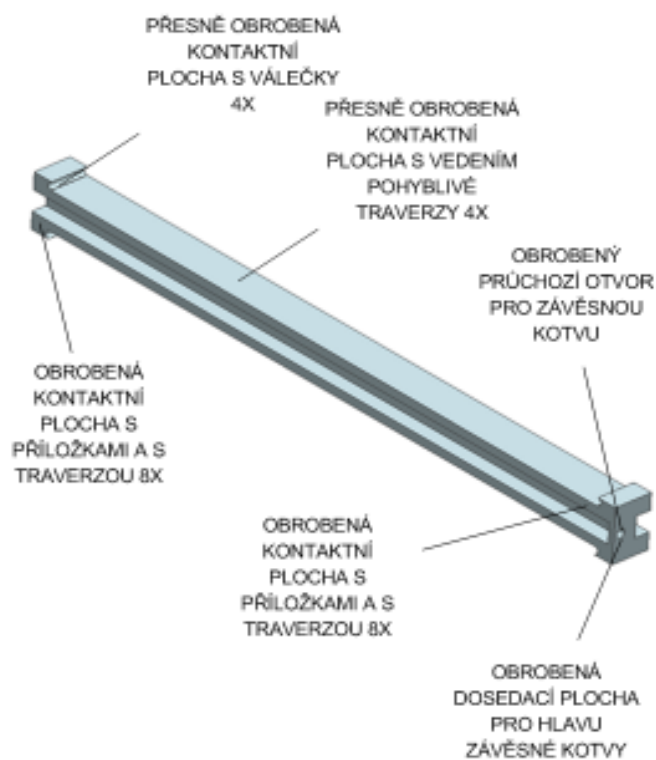


Obr. 10-17 Uložení závěsné kotvy a válečků umožňující natočení u nepředepnutých "H" sloupů

### ***Porovnání variant sloupů z technologického hlediska (předpokládaná potřebná opracování sloupů)***

#### **Nepředepnutý H sloup**

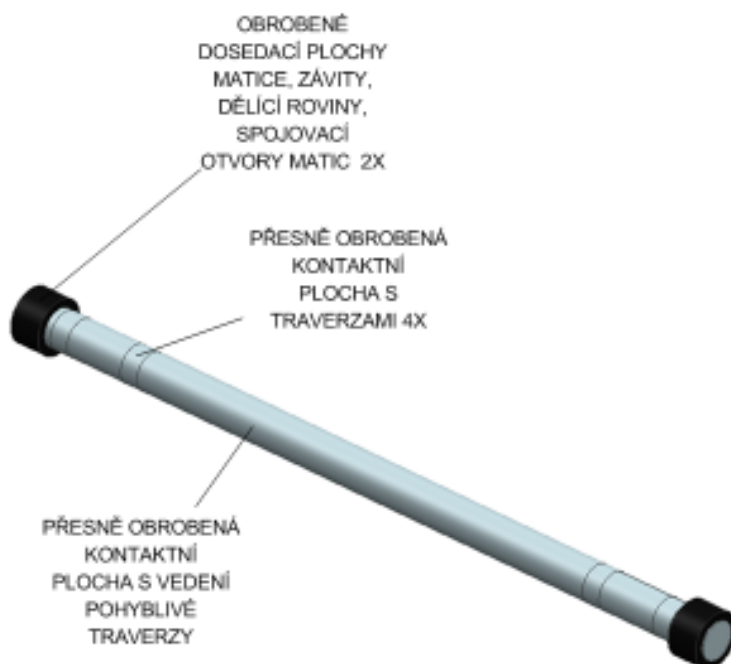
Je řešen jako odlitek s opracovanými plochami dle následujícího schématu a má celkem 26 samostatných opracovaných oblastí.



Obr. 10-18 Opracované plochy nepředeptného H sloupu

### Nepředeptný kruhový sloup

Je řešen jako odlitek nebo výkovek s opracovanými plochami dle následujícího schématu a má celkem 7 opracovaných oblastí, neuvažujeme-li v souhrnu matice.

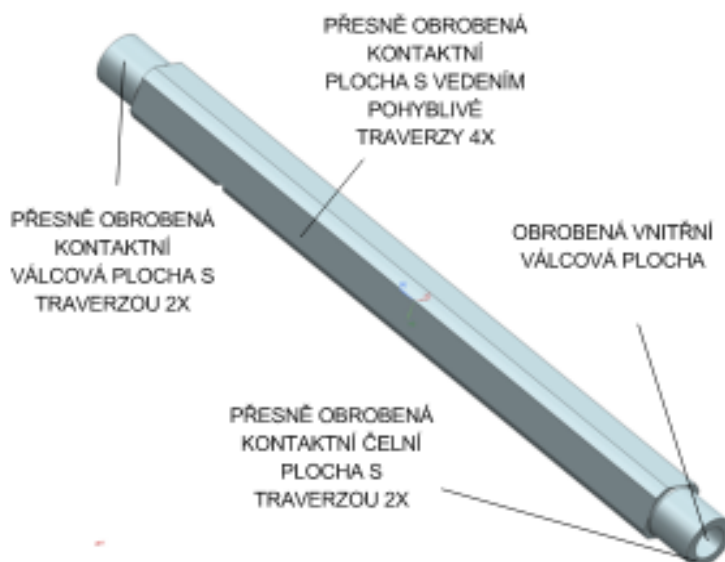


Obr. 10-19 Opracované plochy nepředeptného kruhového sloupu

## Předeprnutý sloup

### Sloup

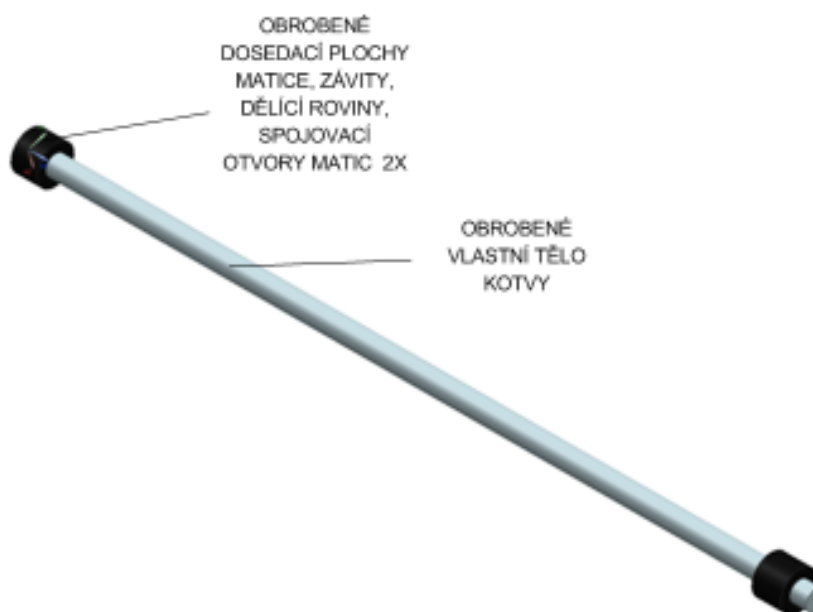
Je řešen jako výkovek s opracovanými plochami dle následujícího schématu a má celkem 9 samostatně opracovaných oblastí.



Obr. 10-20 Opracované plochy předeprnutého sloupu

### Kotva

Je řešena jako výkovek z vysoce kvalitního materiálu s celkem 3 samostatně opracovanými oblastmi.



Obr. 10-21 Opracované plochy kotvy



U H sloupu je nutno opracovat jen určité části ploch ve styku s ostatními funkčními díly. U kruhových sloupů je nutno opracovat celý povrch sloupu včetně vytvoření poměrně přesných závitů na obou koncích. Taky je třeba vzít v úvahu opracování matice, tj. obě čelní plochy, spojovací plochy, vytvoření otvorů pro spojovací šrouby a vnitřní závit.

U předepnutých sloupů je třeba opracovat celý povrch sloupů a přesně lícovat části zapouštění sloupů do traverz. Je třeba vytvořit vnitřní otvor pro kotvu. Předepínací kotvu je třeba opracovat po celé délce, matici a závit pak obdobně jako u nepředepnutého kruhového sloupu.

### Zhodnocení analýzy typů sloupů

- Lze říci, že vlastnosti porovnávaných sloupů ve směru jejich osy vedou ke stejným hodnotám, neboť průřezy všech jsou stejné, a proto i jejich natažení je stejné. Jinak je tomu v chování jednotlivých druhů sloupů v příčném nebo podélném směru. V tomto směru lze vlastnosti příznivě ovlivnit volbou průřezu sloupu.
- Jedním z důležitých parametrů pro volbu sloupů je moment setrvačnosti jednotlivých průřezů. Podle jeho velikosti se mění tuhost rámu ve směru bočního namáhání. Protože největší moment setrvačnosti má průřez H, znamená to logicky i jeho největší tuhost v ohybu. Cenou za to je mírně zvýšené napětí oproti ostatním nepředepnutým sloupům.
- Nejvíce namáhány jsou z hlediska napětí předepnuté sloupy v oblasti tuhého spojení s horní a spodní traverzou a to při excentrickém namáhání.
- Z hlediska konstrukčního je i z důvodu jednoduché montáže a možnosti skryt rozvody nejvhodnější sloup profilu H.
- Pro velké lisy je největší problém s výrobou kovaných sloupů nepředepnutých, neboť se jedná o velkou hmotnost pro kování a posléze velké rozměry pro to, aby mohl být výkovek tepelně zpracován.
- Aby mohl být vyroben sloup pro nepředepnutou variantu, je vhodné využít odlitků. Využití odlévaného materiálu je větší, než při kování z ingotu, a mohou se zhotovit vhodnější profily, které nelze efektivně kovat (H profil).
- Z technologického hlediska je výrobně nejnáročnější sloup předepnutý. Rozdíly mezi oběma variantami nepředepnutých sloupů jsou zanedbatelné.
- Zatím co na výrobu nepředepnutých sloupů lze použít levných uhlíkatých ocelí, na předepnutý sloup se musí použít značně kvalitnější a dražší legované zušlechtěné oceli.
- Závěrem je možno konstatovat, že výhody použití předepnutých sloupů nevykompenzují zvýšenou výrobní náročnost a vysoké výrobní náklady.
- Jako perspektivní, i když doposud neobvyklé, se jeví pro velké lisy CKV i CKW využití nepředepjatého odlévaného sloupu profilu H, který obecně nejlépe odpovídá požadavkům hodnocených kritérií.

## 10.4. Výsledky získané z morfologické matice

Pomocí morfologických matic byly stanoveny následující koncepce hydraulických lisů.

### 10.4.1. Varianta A (červená)

Hydraulický lis pro volné kování s horním pohonem třemi válci. Vedení pohyblivé traverzy je řešeno vedením na sloupech, tj. není zde vodící trn. Všechny válce lisu jsou stejného průměru a lis má tři pracovní stupně. Všechny válce jsou kované a uchycené za přírubu. Lis má čtyři zpětné válce umístěné nahoře.

Traverzy lisu jsou dělené odlitky. Jejich dělení je vertikální a podélné vzhledem k ose stolu. Takto jsou traverzy děleny na tři části. Přenos zatížení mezi jednotlivými částmi je pomocí vložených per a kotvami vedoucími skrz traverzy.

Vlastní rám lisu je čtyřsloupový s kovanými čtvercovými sloupy. Tyto sloupy jsou předepnuté a pracovní síla mezi traverzami a sloupy se přenáší pomocí matic. Je nutno vytvořit dvě vlastní části a to sloup a předepínací kotvu. Sloupy jsou vrtané, aby mohly být vnitřkem vedeny kotvy. Tlaková kapalina k pracovním válcům se přivádí pomocí trubek.

### 10.4.2. Varianta B (modrá)

Hydraulický lis pro volné kování s horním pohonem pěti válci. Vedení pohyblivé traverzy je řešeno vedením na sloupech, tj. není zde vodící trn. Pracovní válce jsou různého průměru, tak aby byl zajištěn maximální počet pracovních stupňů (sedm). Všechny válce jsou kované a uchycené za přírubu. Lis má čtyři zpětné válce umístěné nahoře.

Traverzy lisu jsou dělené odlitky. Jejich dělení je vertikální a napříč vzhledem k ose stolu. Takto jsou traverzy děleny na dvě části. Přenos zatížení mezi jednotlivými částmi je pomocí vložených per a kotvami vedoucími skrz traverzy.

Vlastní rám lisu čtyřsloupový s odlévanými H sloupy. Spojení mezi horní traverzou a sloupem je pomocí systému Loewy. Přenos zatížení mezi traverzou a sloupem je realizován pomocí vložených elementů. Sloupy jsou z jedné části, nejsou vrtané a tlaková kapalina se k válcům přivádí pomocí trubek.

### 10.4.3. Varianta C (zelená)

Hydraulický lis pro volné kování s horním pohonem dvěma válci. Vedení pohyblivé traverzy je řešeno pomocí vodícího trnu v horní traverze. Pracovní válce jsou stejného průměru a lis má jeden pracovní stupeň. Oba válce jsou kované a uchycené za přírubu. Lis má čtyři zpětné válce umístěné nahoře.

Traverzy lisu jsou řešené, jako odlitky, které nejsou dělené. Toto je podmíněno existencí slévárny s možností vyrobit odlitek dané tonáže. Jejich hmotnost ale musí vyhovovat z hlediska montáže a dopravy.

Vlastní rám lisu je čtyřsloupový s kovanými kruhovými sloupy. Spojení mezi horní traverzou a sloupem je pomocí systému Loewy. Přenos zatížení mezi traverzou a sloupem je

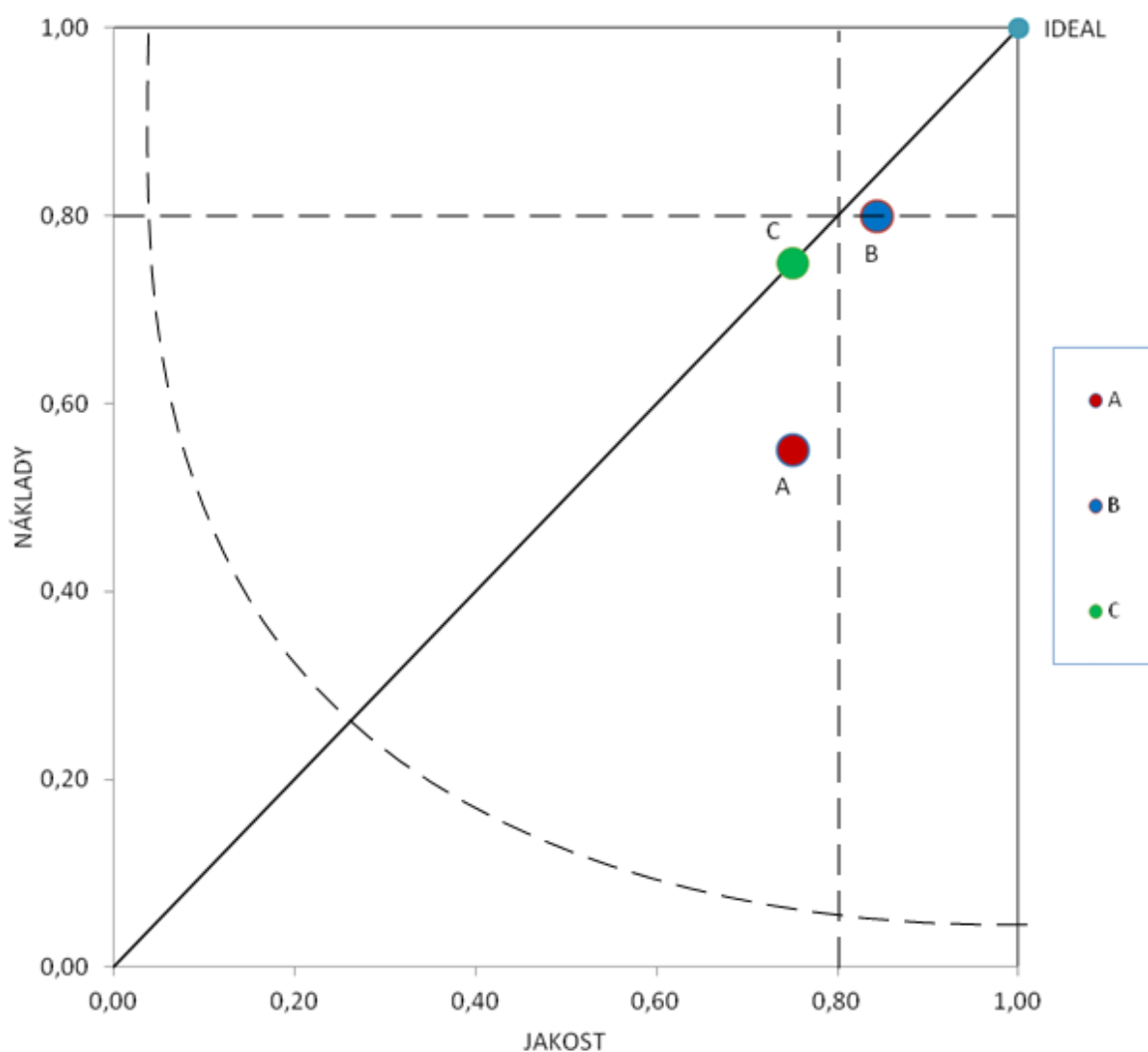
realizován pomocí matic. Sloupy jsou z jedné části, nejsou vrtané a tlaková kapalina se k válcům přivádí pomocí trubek.

## 10.5. Porovnání jednotlivých variant a výběr nejvhodnějšího řešení

V následující tabulce je provedeno bodové zhodnocení jednotlivých variant. Hodnoceny jsou dvě důležité oblasti, kterými jsou kritéria jakosti a náklady. Celkové bodové hodnocení každé varianty je srovnáno s ideálním řešením, které má maximální počet bodů.

VARIANTA / ALTERNATIVA		A	B	C	IDEAL
KRITÉRIA JAKOSTI Q	počet pracovních stupňů	3	4	1	4
	válce stejného průměru	4	3	4	4
	složitost výroby traverz	2	3	4	4
	modul průřezu sloupu v ohybu	3	4	3	4
	složitost výroby sloupů	2	3	4	4
	náročnost na údržbu	3	3	4	4
	vhodnost pro dopravu k zákazníkovi	4	3	1	4
	životnost rámu	3	4	3	4
	celk. souč. hod.	24	27	24	32
	celk. norm. hod.	0,75	0,84	0,75	1,0
NÁKLADY	výrobní náklady sloupy	2	3	4	4
	výrobní náklady traverzy	2	3	4	4
	výrobní náklady válce	2	2	3	4
	provozní náklady na energii	3	4	1	4
	náklady na údržbu	2	4	3	4
	celk. souč. hod.	11	16	15	20
	celk. norm. hod.	0,55	0,80	0,75	1,0

Obr. 10-22 Hodnocení jednotlivých variant návrh lisu



Obr. 10-23 Grafické vyjádření vhodnosti variant

Na základě zhodnocení kritérií jakosti a kvality (1 je minimum, 4 maximum) vyšlo jako nejvhodnější konstrukční řešení B. Jako jediné se pohybuje na nebo nad hranici 0,8 u obou hodnocených kritérií. Hyperbola v grafickém zobrazení ukazuje hranici, kdy varianty umístěné pod ní by byly uvažovány jako nepřijatelné.

Díky tomuto hodnocení je jako nejvhodnější konstrukce lisu pro kování kroužků vybrána varianta se 7-stupňovým pohonem, traverzami dělenými příčně a nepředepnutými H sloupy.

## 11 Návrh zařízení pro výrobu velkých kroužků

Je vhodné se zamyslet nad alternativami výroby velkých kroužků, taky aby bylo možno efektivně tyto díly vyrábět a uspokojit požadavky trhu. Pro současné reaktorové nádoby jsou dostatečné kroužky s vnějším průměrem kolem 5 metrů. Ty lze vyrobit pomocí zde navrženého lisu. V praxi ale nastane problém s výrobou kroužků, které mají průměr větší. Jejich uplatnění je také v energetice, ale i jiných oblastech průmyslu. Je jasné, že pro průměr kroužků 10 metrů již samotný lis není dostačující a je nutné ho doplnit o vhodné příslušenství.

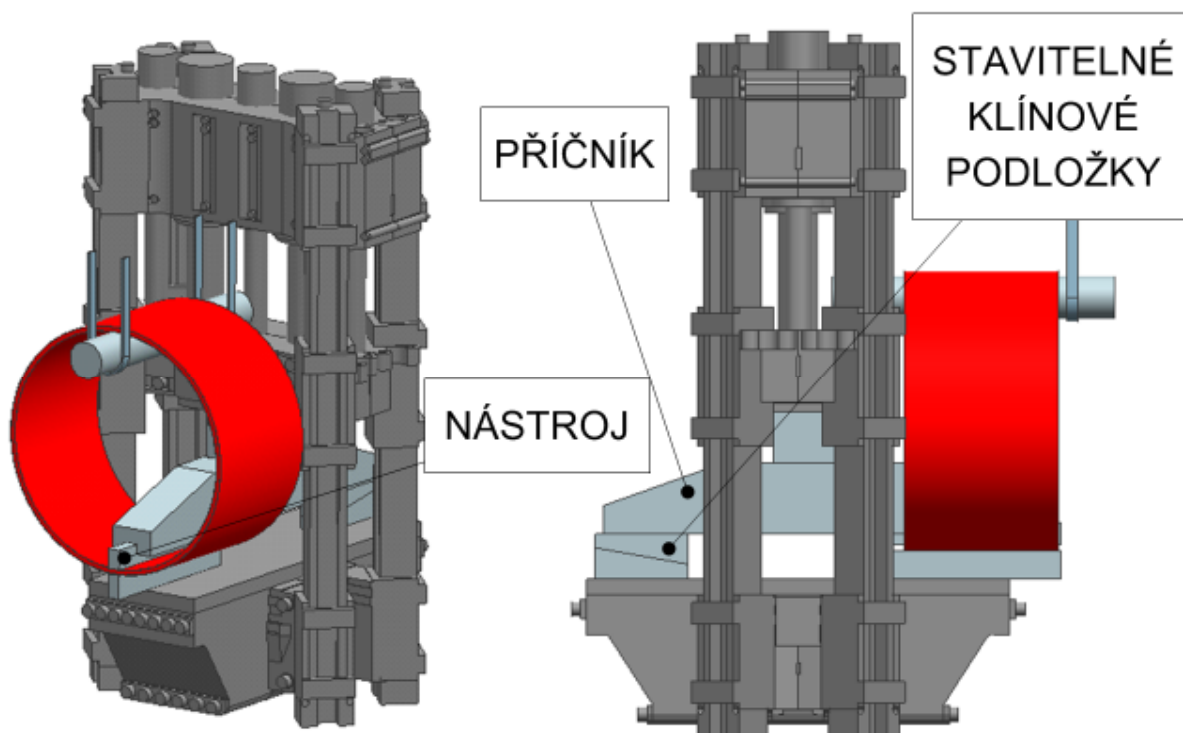
Cílem následující části práce je návrh variant zařízení pro výrobu velkých kroužků s využitím stroje, jehož princip a velikost jsou stanoveny v předchozích kapitolách. Tento návrh obsahuje zhodnocení různých variant a výběr optimálního řešení.

Tato kapitola vychází z publikovaného článku [Ráž&Čechura&Kubec 2012].

### 11.1. Možné varianty zařízení pro výrobu velkých kroužků

#### 11.1.1. Zařízení pro kování kroužků mimo vlastní lis- varianta 1

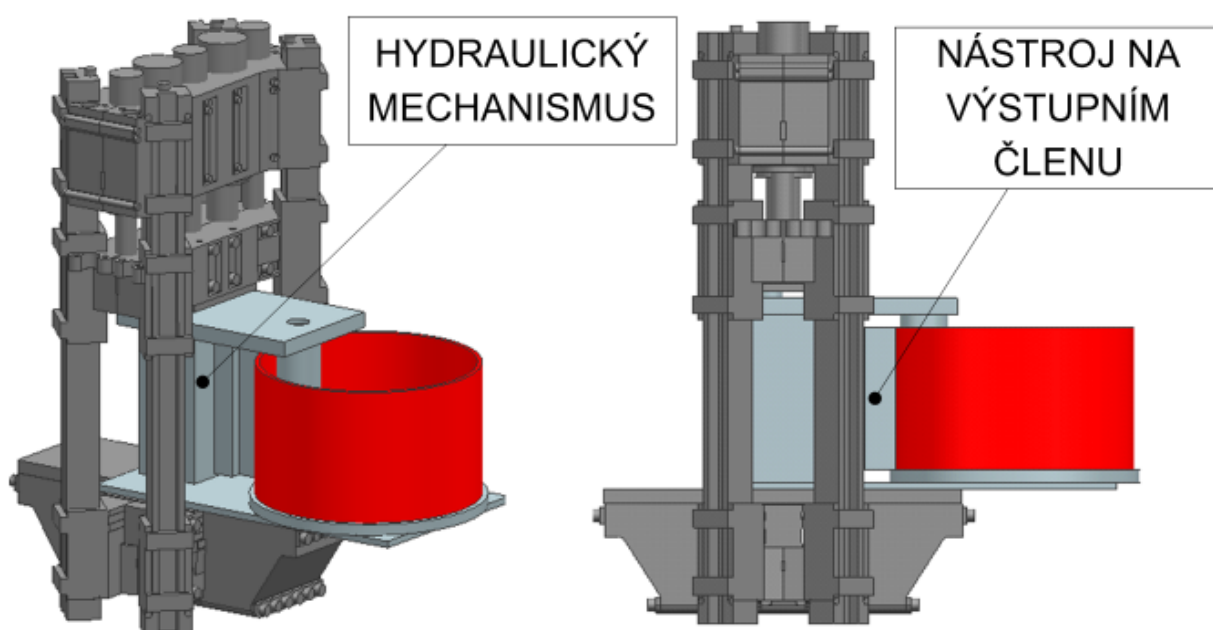
Principem řešení je přiřazení příčnicku, který je na jedné straně podepřen stavitelnými klínovými podložkami. Na druhé straně je nástroj. Druhý nástroj je přichycen ke stolu lisu. Mezi těmito nástroji je tvářen kroužek, zavěšený na trnu. Přenos síly na příčník je z pohyblivé traverzy přes spojením vloženým kusem. Klínové podložky lze přestavovat v závislosti na tloušťce kovaného kroužku, čímž je zajištěna minimální odchylka tloušťky stěny po celé délce. U této varianty není omezení maximálního průměru kroužku pracovním prostorem lisu.



Obr. 11-1 Zařízení pro kování kroužků spolu s hydraulickým lisem- varianta 1

### 11.1.2. Zařízení pro kování kroužků mimo vlastní lis- varianta 2

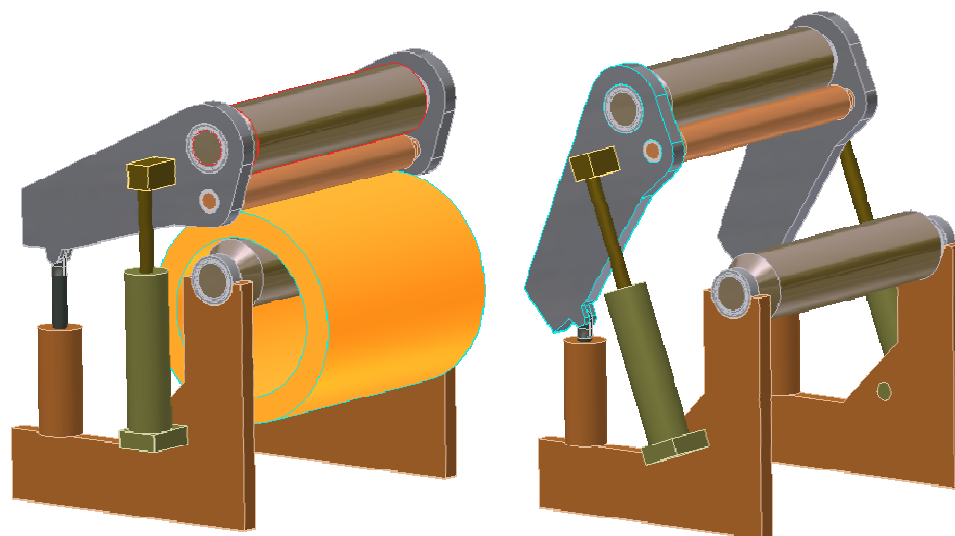
Funkční princip varianty 2 je v přenosu tvářecí síly pomocí vloženého hydraulického mechanismu. Při pracovním zdvihu se pohyblivá traverza pohybuje směrem dolů a zasouvá plunžr do hydraulického mechanismu (umístěného v pracovním prostoru stroje). Tento plunžr je uchycen na spodní straně pohyblivé traverzy v místě uchycení nástrojů. Tímto zasouváním roste tlak a do pohybu se dá výstupní člen. Výstupním členem je dvojice bočních plunžrů, na kterých je uchycen nástroj. Pohybem tohoto nástroje v horizontálním směru je tvářen kroužek, který je postaven na podpůrné desce a opřen o trn, který je pevně uchycen v tomto zařízení.



Obr. 11-2 Zařízení pro kování kroužků spolu s hydraulickým lisem- varianta 2

### 11.1.3. Zařízení pro doválcování kroužků mimo vlastní lis

Tato varianta je spojením kování pod lisem a válcování kroužků na jednoúčelovém zařízení. Velký kroužek se vyková na hydraulickém lisu dle jeho možností. Pak se na trnu přeneso do válcovacího zařízení. Trn, na kterém se kovalo, zde pracuje jako vnitřní válec. Konečný tvar kroužku tak vznikne doválcováním.



Obr. 11-3 Zařízení pro doválcování kroužků

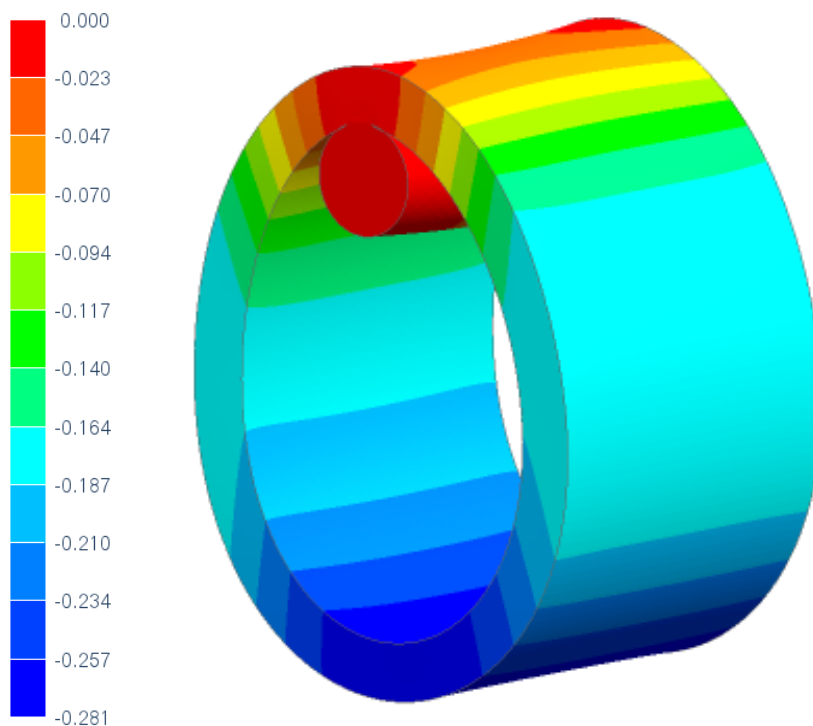
## 11.2. Výpočty týkající se výroby kroužků

Cílem této kapitoly je zanalyzovat základní specifika výroby velkých kroužků a to vzhledem ke stroji, na kterém budou vyráběny.

### 11.2.1. Výpočet deformace kroužku vlivem vlastní hmotnosti

Při návrhu stroje pro výrobu kroužků je nutno předem zvážit, zda u kroužku nedochází k nadměrné změně tvaru a vzniku ovality vlivem vlastní hmotnosti a také zda není překročena mez kluzu materiálu. Při teplotě 900 °C dosahují oceli meze kluzu přibližně na úrovni 10-20% meze kluzu při normální teplotě. Napětí vyvolané vlastní hmotností kroužku by nemělo tedy překročit 30-60 MPa. Simulace výroby kroužku byla provedena na zjednodušeném modelu, který uvažuje kroužek o vnějším průměru 4700mm, vnitřním průměru 3770 mm a délce 3440mm. Tento kroužek je zavěšen na trn o průměru 1000mm, který je na svých čelních plochách pevně vetknut a vše je zatíženo vlastní tíhou. Hmotnost vlastního kroužku je 186t.

Materiál je definován pro teplotu 900 °C, tj. modul pružnosti je přibližným výpočtem stanoven na  $E=136106$  MPa.



**Obr. 11-4 Průběh deformace kroužku ve svislém směru- protažení [mm]**

Vlivem vlastní hmotnosti dojde k bočnímu zploštění kroužku o 0,22mm a protažení ve svislém směru o 0,28mm.

Z napěťového hlediska je kritické místo v oblasti kolem trnu, kde napětí dosahuje 15 MPa, což však není nad mezi pevnosti materiálu, v ostatních částech kroužku je napětí do 5 MPa.

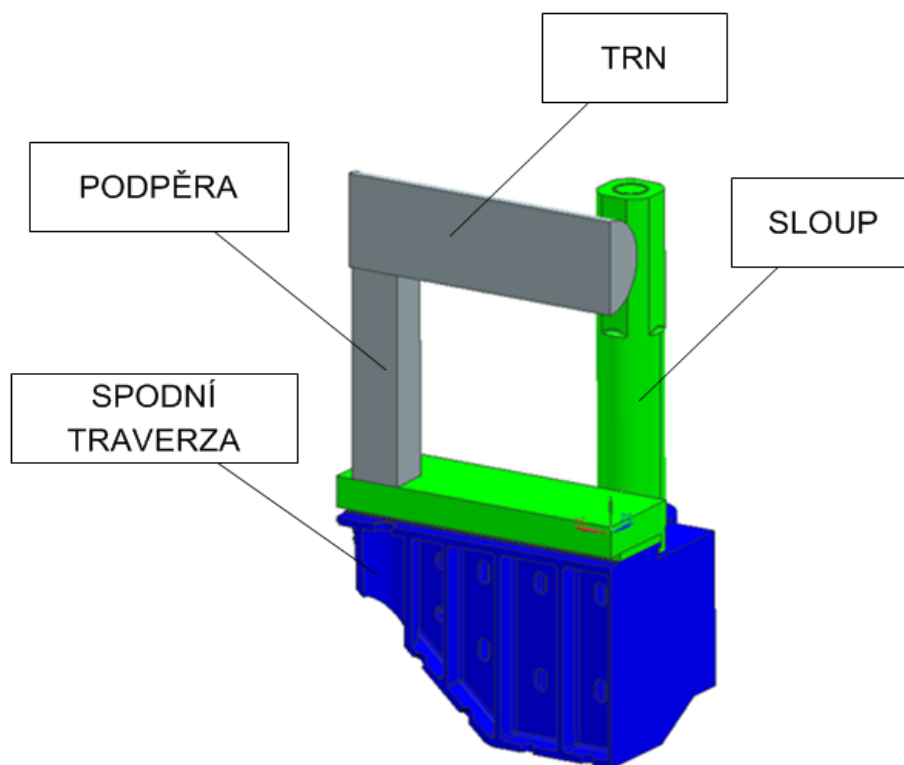
Tyto hodnoty jsou v pořádku a to hlavně z důvodu, že se jedná o silnostěnný kroužek. Pokud by byla nutnost kovat kroužky se slabou tloušťkou stěny, bylo by nutno připojit podpůrné boční válečky.

U zde navrhovaných zařízení není tedy nutno připojovat podpůrné elementy pro kroužek a lze jej vyrábět v poloze, kdy jeho osa je vodorovně.

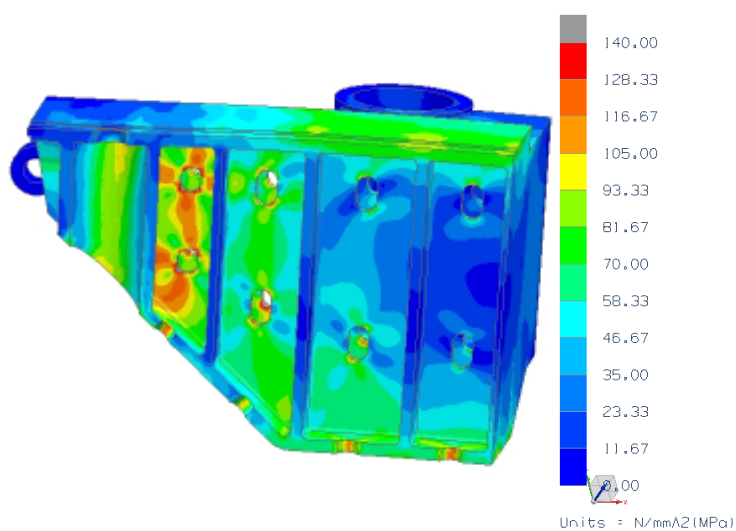
### **11.2.2. Výpočet namáhání spodní traverzy při kování kroužku na trnu**

Nejedná se o častou operaci na tvářecím stroji, ale o velmi specifickou technologii, z hlediska zatížení stroje. Kroužek visí na trnu, který je na podpěrách, umístěných na krajích stolu. Při návrhu je tedy nutno spodní traverzu navrhnout tak, aby unesla pracovní sílu s působištem v jejím středu, ale i rozloženou do krajů stolu.

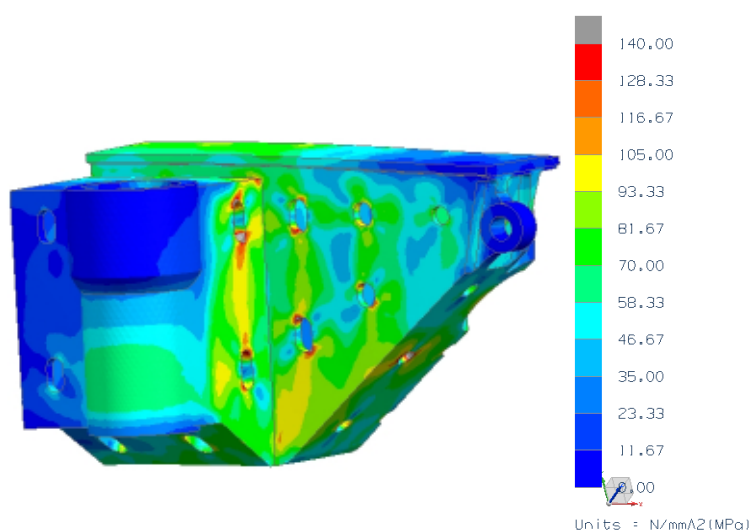




Obr. 11-5 Čtvrtinový výpočetní model pro analýzu zatížení spodní traverzy při kování kroužků na trnu



Obr. 11-6 Napětí Von Mises ve spodní traverze- pohled 1



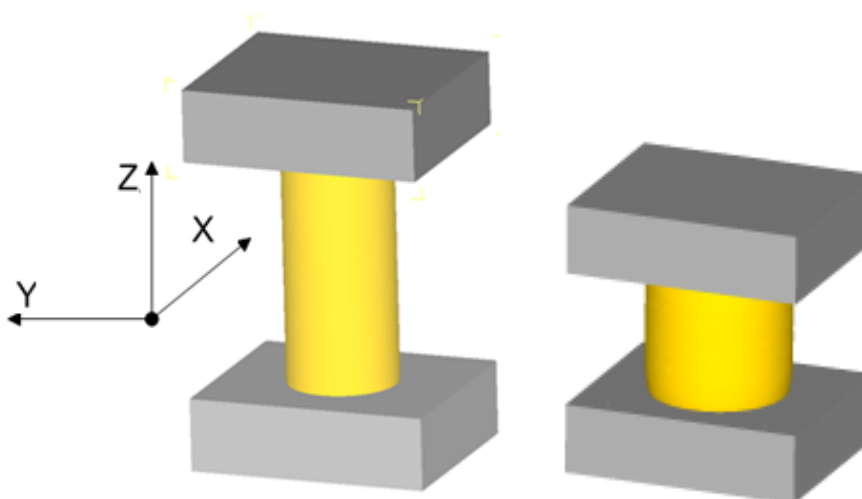
Obr. 11-7 Napětí Von Mises ve spodní traverze- pohled 2

Výsledkem této analýzy je zjištění, že napětí ve spodní traverze může při této technologii dosahovat až 120 MPa a je nutno toto při jejím návrhu zohlednit. Velkou roli zde hraje i správné umístění licích otvorů, které by neměly být v místech zvýšeného napětí.

### 11.2.3. Stanovení sil při tváření na hydraulickém lisu

Z důvodu přesného stanovení potřebných sil během tváření byla také provedena simulace tváření v programu DEFORM -3D. Simulován byl průběh tváření při pěchování a při kování kroužku.

#### *Pěchování*



Obr. 11-8 Simulace průběhu tváření při pěchování

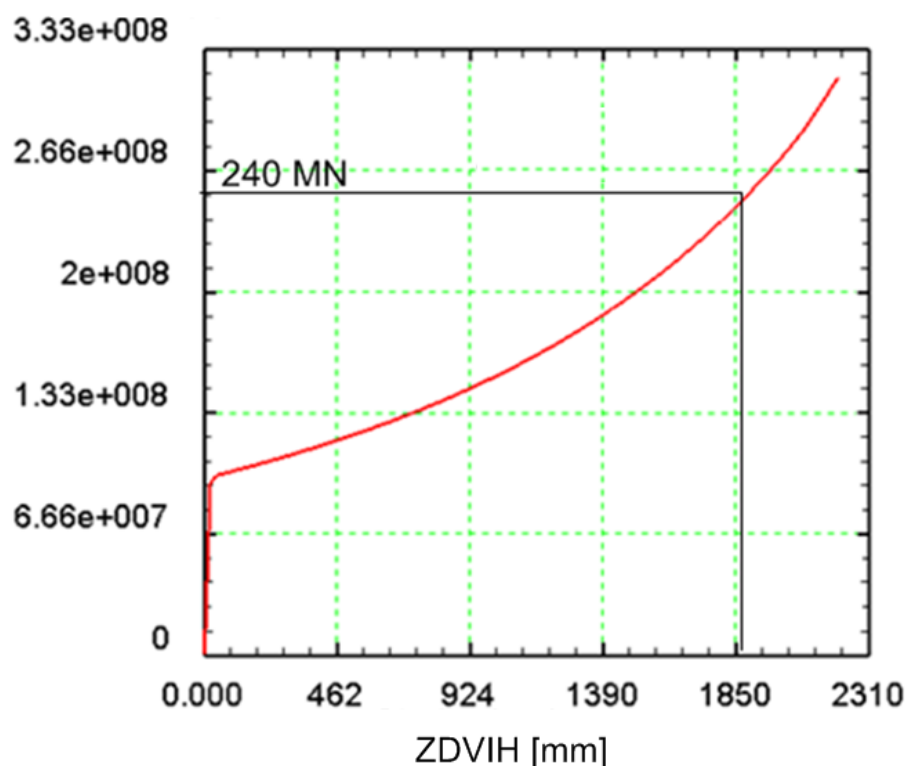
Zadané parametry:

Materiál: uhlíková ocel z knihovny výpočetního programu DEFORM -3D

rychlost nástroje: 20 mm/s

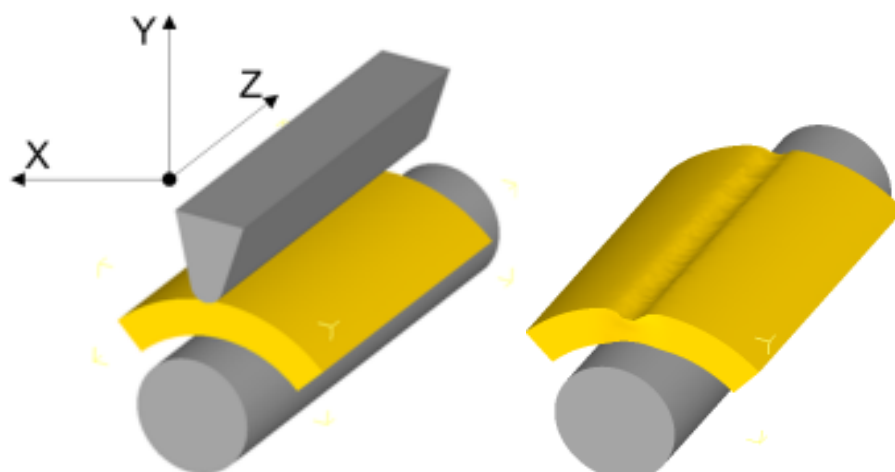
Při zvolené rychlosti 20 mm/s je pro daný ingot při pěchování z 5000mm na výšku 3150mm nutná síla 240MN. Průběh tvářecí síly je znázorněn na následujícím obrázku.

TVĚŘECÍ SÍLA [N]



Obr. 11-9 Průběh tvářecí síly při pěchování ingotu na lisu

### Kování kroužků



Obr. 11-10 Simulace průběhu tváření při kování kroužků na trnu

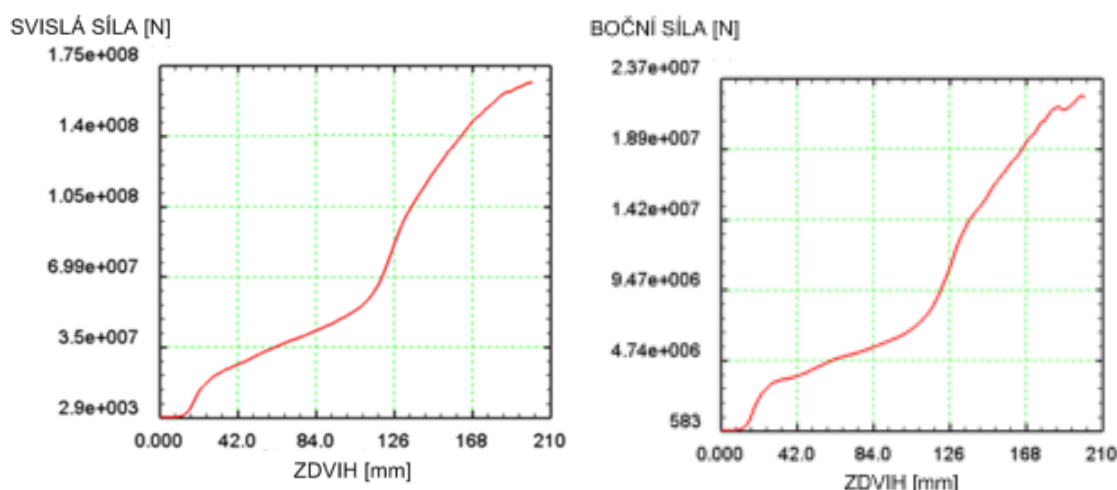
Zadané parametry:

Materiál: uhlíková ocel z knihovny výpočetního programu DEFORM -3D

rychlost nástroje: 2 mm/s

Simulace kování kroužků byla provedena proto, aby bylo možno stanovit vliv této technologie na namáhání lisu. Při tomto kování vzniká značné excentrické zatížení, které stroj namáhá. Vztah mezi velikostí pracovní síly ve svislém směru "y" a boční síly v příčném směru "x" je patrný z následujících grafů. Samotné kování probíhá díky hornímu kovadlu, které je přesazené o 200mm vůči trnu a tedy i ose lisu.

Stanovení boční (excentrické) síly ve vodorovném směru je nutné z důvodu dimenzování lisu na excentrické zatížení.



Obr. 11-11 Průběh tvářecí síly (vlevo) a excentrické (boční) síly při kování kroužků

Závěrem lze říci, že boční síla při kování na trnu dosahuje přibližně 10-15% svislé síly. Tato boční síla je zachycena sloupy lisu a způsobuje jeho naklopení.

#### 11.2.4. Výběr vhodného zařízení pro výrobu kroužků mimo pracovní prostor lisu

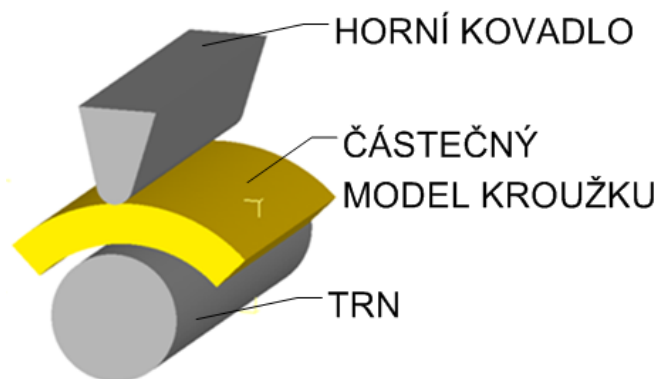
V předchozí části práce v kapitole 11.1 byla navržena tři zařízení pro výrobu velkých kroužků mimo vlastní prostor lisu. Tato zařízení využívají dvě technologie- kování a válcování. Aby byl navrhnut stroj pro výrobu velkých kroužků, je třeba exaktně stanovit, která z těchto technologií je výhodnější.

Porovnání kování a válcování je provedeno pomocí programu DEFORM -3D, kde je porovnávána energie potřebná pro vytvoření obdenného kroužku těmito technologiemi.

Pro srovnání obou technologií je zvoleno rozkování (rozválcování) z polotovaru o tloušťce stěny 475mm na tloušťku 430mm.

**Energie nutná na vykování kroužku na lisu**

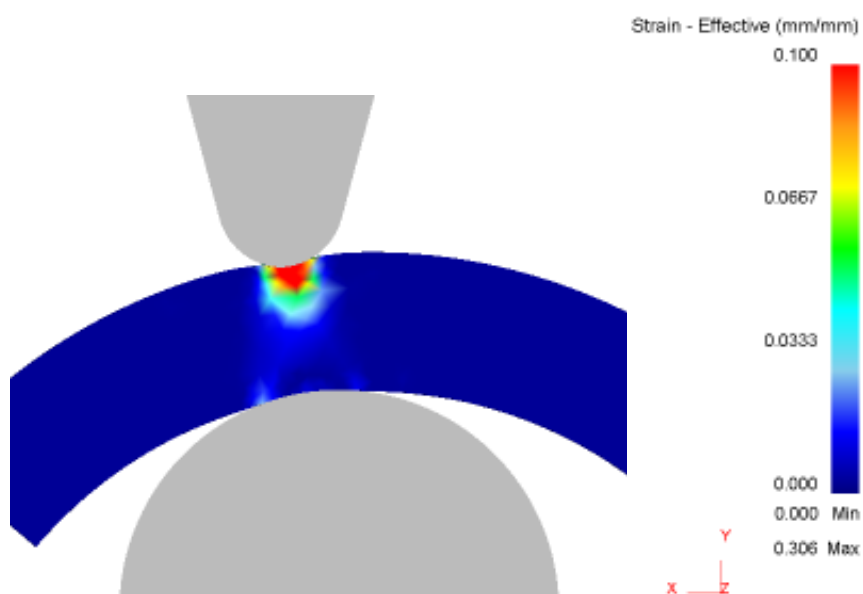
Výpočtový model pro stanovení potřebné energie:



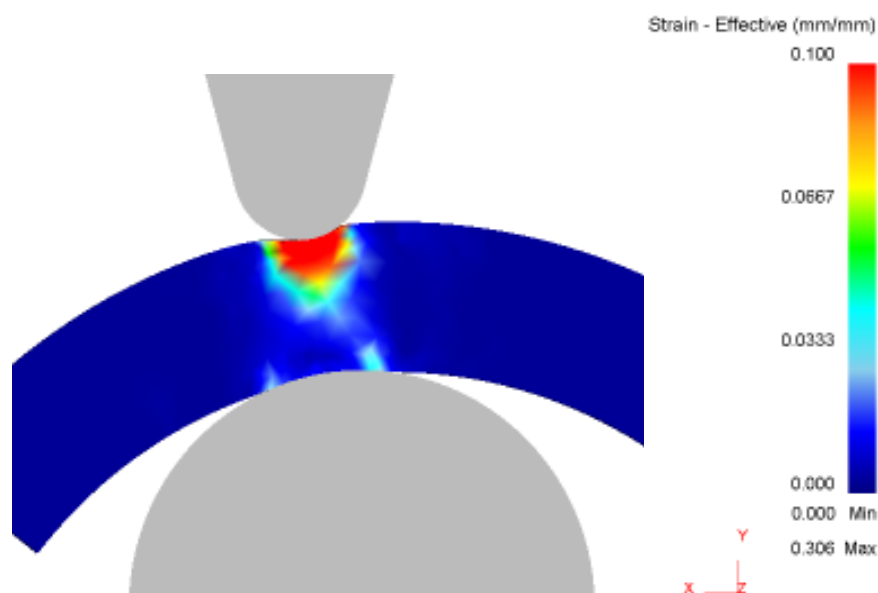
Obr. 11-12 Výpočtový model pro stanovení potřebné energie

Potřebná energie je stanovena na základě výpočtu pomocí metody konečných prvků. Je zjištěna energie potřebná na jedno zmačknutí kroužku na danou tloušťku. Výpočet probíhá ve dvou krocích. Nejprve je do plného materiálu kroužku zatlačeno horní kovadlo, kroužek je následně pootočen a kovadlo je zatlačeno znova. Výpočtový model uvažuje dokonale tuhé kovadlo i trn. Trn se nepohybuje a předem definovanou rychlostí 2mm/s se pohybuje kovadlo ve svislém směru.

Jak je materiál během kování na trnu protvářen je patrné z průběhu poměrného přetvoření při obou zdvizích (viz následující dva obrázky).



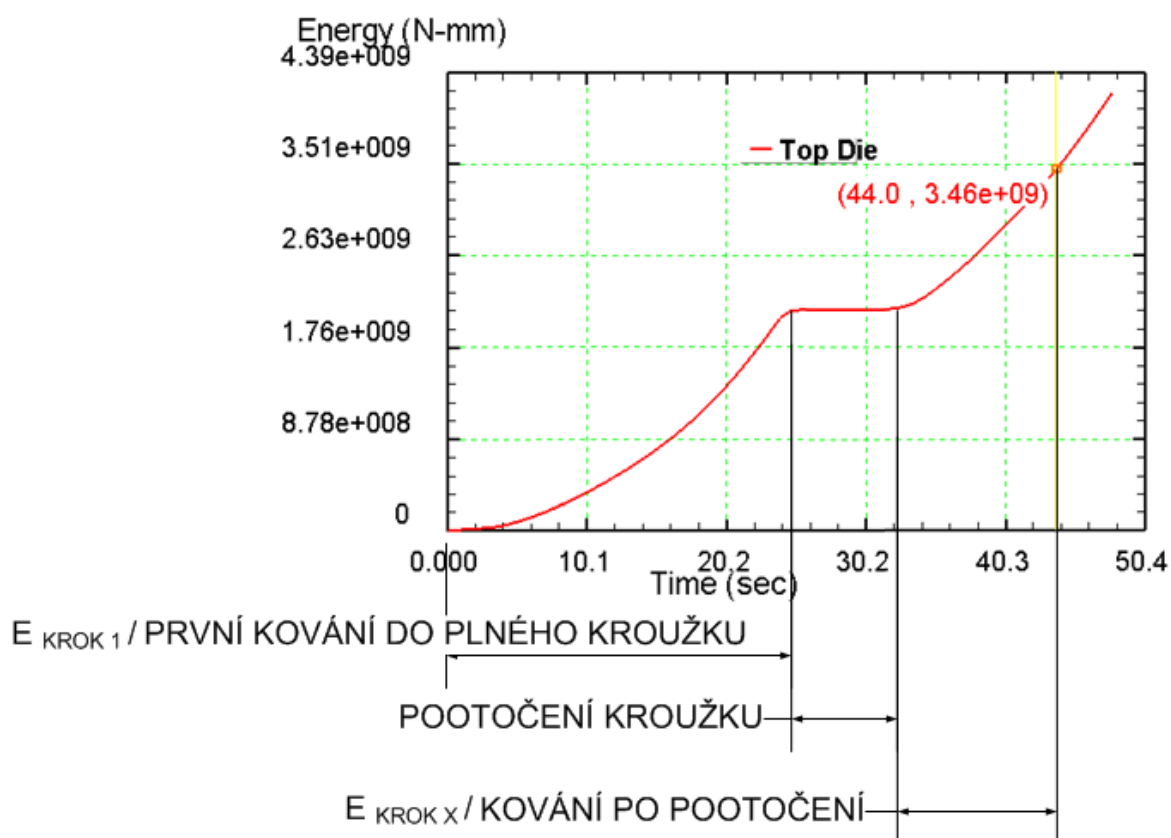
Obr. 11-13 Poměrné přetvoření kroužku v okamžiku prvního zdvihu a kování do plného materiálu



Obr. 11-14 Poměrné přetvoření kroužku v okamžiku každého dalšího zdvihu

Simulací bylo stanoveno:

- Energie  $E_{\text{KROK 1}}$  nutná pro tváření do plného materiálu (krok 1)
- Energie  $E_{\text{KROK X}}$  nutná pro tváření při každém dalším kroku (krok X)



Obr. 11-15 Energie nutná na první dva zdvihy na kovacím lisu

Celková energie je pak stanovena jako:

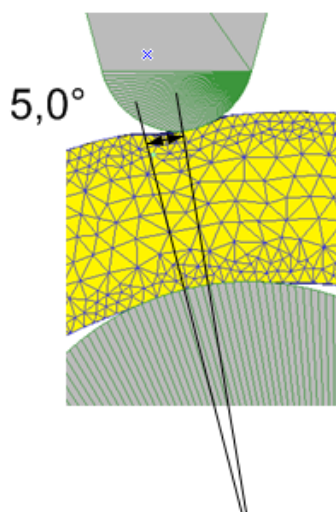
$$E_{c\text{ KOV}} = E_{\text{KROK 1}} + X \cdot E_{\text{KROK X}}$$

$$E_{\text{KROK 1}} = 2 \cdot 10^9 \text{ Nmm} = 2 \text{ MJ}$$

$$E_{\text{KROK X}} = 1,5 \cdot 10^9 \text{ Nmm} = 1,5 \text{ MJ}$$

X... počet pootočení

Po každé operaci je kroužek pootočen o  $5^\circ$ .



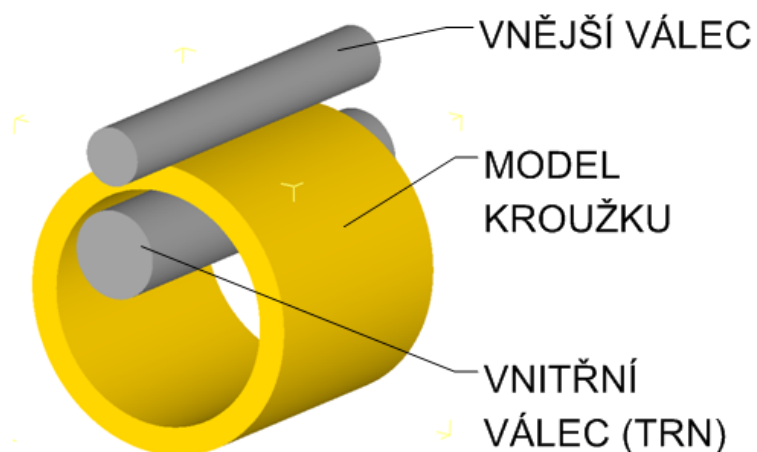
Obr. 11-16 Schéma pootočení výkovku při dvou po sobě následujících zdvizích

$$X = 360 / 5 = 72 \text{ pootočení}$$

$$E_{c\text{ KOV}} = E_{\text{KROK 1}} + X \cdot E_{\text{KROK X}} = 2 + 72 \cdot 1,5 = 110 \text{ MJ}$$

### Energie nutná na vyvácování kroužku

Výpočtový model pro stanovení potřebné energie:



Obr. 11-17 Výpočtový model pro stanovení potřebné energie

Potřebná energie je stanovena na základě výpočtu, kde je zjištěna energie, nutná na vytvoření válcovaného kroužku. Okrajové podmínky jsou definované tak, že oba pracovní válce jsou absolutně tuhé. Vnější válec má průměr 1000mm, vnitřní válec (trn) má průměr 1500mm. Je definován konstantní posuv (úběr) otáčejícího se vnějšího válce jako 15 mm/s.

Pro potřeby porovnání musí být vypočtena energie podle následujícího vztahu:

$$E_{c \text{ vÁL}} = F \cdot s + M_k \cdot \alpha$$

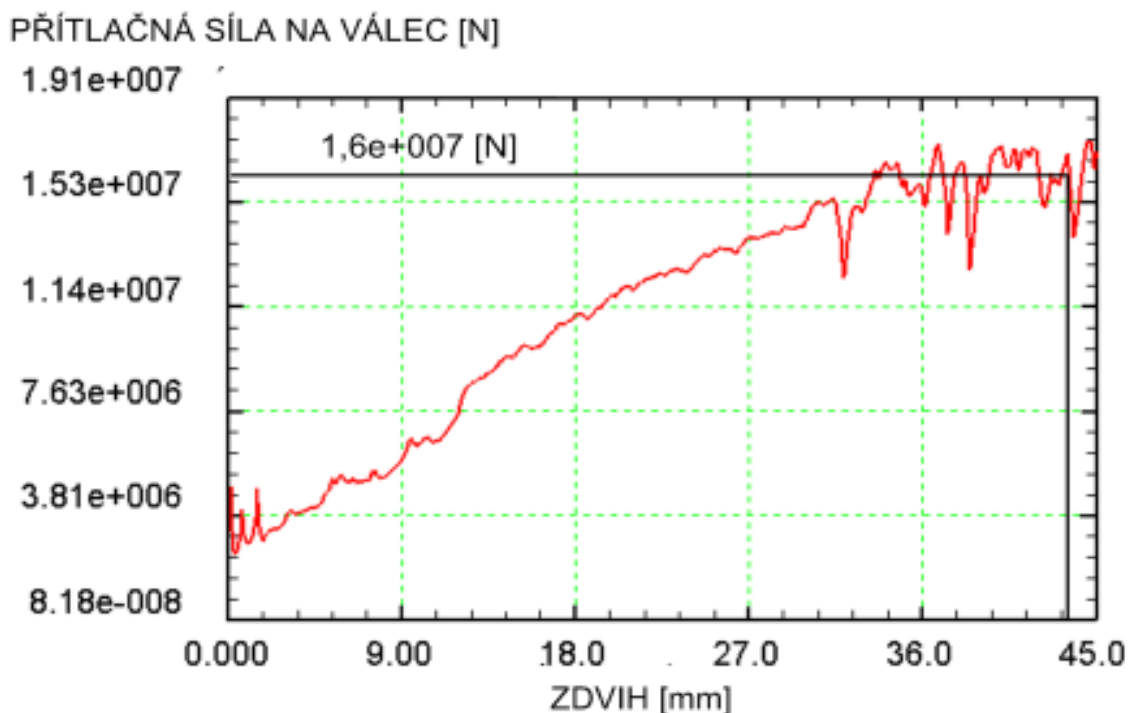
F... přítláčná síla na válec

s... zdvih válce

M<sub>k</sub>... krouticí moment na poháněném válci

α... úhel, o který se poháněný válec otočí

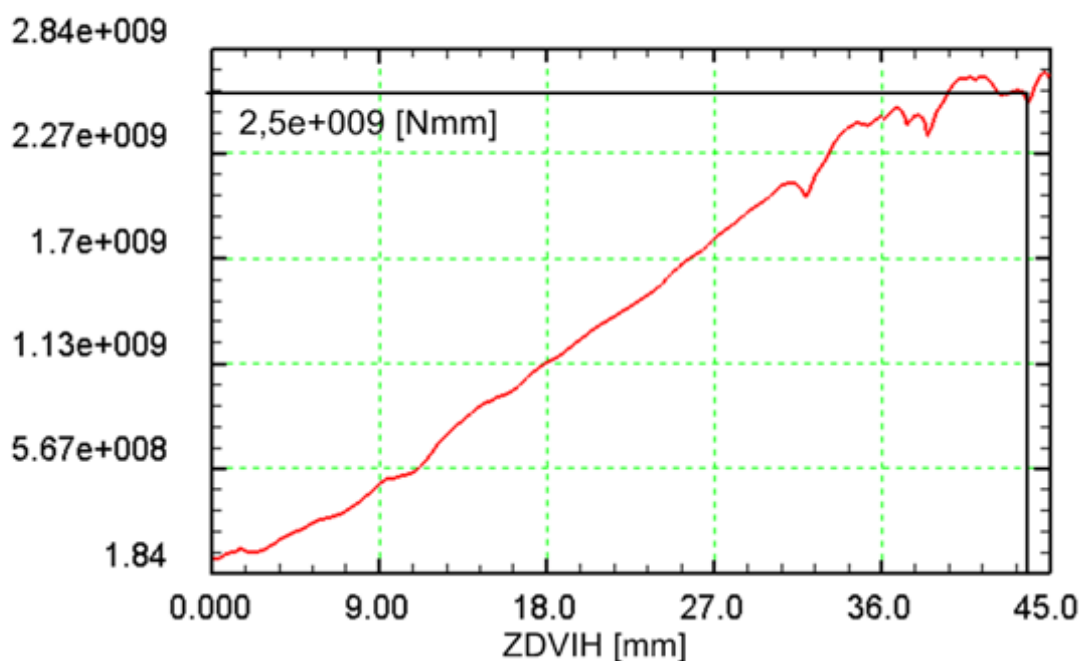
Z následujících grafů jsou po vyhlazení skoků způsobených výpočtem pomocí MKP (především přesíťováním) odečteny hodnoty přítláčné síly a krouticího momentu. Hodnota zdvihu válce je 45mm a úhel otočení poháněného válce po dobu simulace je 37 rad, tedy 5,9 otáčky. (Pro zjednodušení a zkrácení doby výpočtu je uvažována jen malá změna tloušťky kroužku (45mm) jak bylo již uvedeno dříve.



Obr. 11-18 Průběh přítláčné síly na válec



### KROUTÍCÍ MOMENT NA POHÁNĚNÉM VÁLCI [Nmm]



Obr. 11-19 Průběh kroučícího momentu na poháněném válci

Hodnota energie nutné na vyválnování kroužku:

$$E_{c \text{ VÁL}} = F \cdot s + M k \cdot \alpha$$

$$E_{c \text{ VÁL}} = 1,6 \cdot 10^7 \cdot 0,045 + 2,5 \cdot 10^6 \cdot 37$$

$$E_{c \text{ VÁL}} = 93,2 \text{ MJ}$$

### Zhodnocení energetické náročnosti jednotlivých variant

Z energetického hlediska jsou obě varianty srovnatelné. Rozdíl mezi kováním (110 MJ) a válčováním (93,2 MJ, rozdíl 18%) je dán odlišným průběhem tváření a jiným rozložením plastické deformace v materiálu.

Vhodnější je využití doválnování po kování, protože po této operaci má kroužek hladký povrch, na rozdíl od zvlněného povrchu po kování na lisu. Dalším důvodem je to, že při simulaci kování není během výpočtu uvažována energie nutná na zvedání pohyblivé traverzy po každém kovací zdvihu a energie na pootáčení kroužku. Započítáním této energie by se potřebná energie na kování kroužku zvýšila.

### 11.3. Shrnutí požadavků kladených na tvářecí stroj pro výrobu velkých kroužků získaných na základě rozboru technologie

- Dle simulace je ověřena nutná pěchovací síla lisu pro kroužky velkých průměrů, nebo pro kroužky reaktorových nádob. Hodnota této síly je 240 MN.
- Minimální světlost mezi sloupy lisu je 7000mm. Tak mohou být přímo v pracovním prostoru lisu vyráběny kroužky pro reaktorové nádoby VVER 1000.
- Zdvih lisu by měl dosahovat alespoň 6000mm, tak aby byla dosažena využitelnost navrhovaného zařízení.
- Aby mohla být modifikována konstrukce reaktorových nádob VVER 1000, je nutné využít ingoty co nejvyšší tonáže. Pro zmenšení počtu svarů v dosavadní konstrukci a odstranění kritického svaru v oblasti aktivní zóny reaktoru je vhodný ingot o hmotnosti 300 tun.
- Kroužky je vhodné vyrábět na lisu rozkováním na trnu až do maximálních možností lisu. Pokud bude nutno vyrábět kroužky větších průměrů, je možné doplnit stroj některým z navržených řešení pro kování mimo vlastní lis. Nejvhodnější je zařízení pro doválcování kroužků, které zaručí vyšší tvarovou přesnost a je energeticky výhodnější.

## 12 Vliv ostatních faktorů na nutnou energii pro stroj - pokles tuhosti v hydraulickém systému vlivem druhu kapaliny

Aby byl stroj maximálně konkurenceschopný, je nutno zajistit co nejmenší spotřebu energie. Jednou z oblastí, ve které je toto možné, je snížení ztrát v hydraulickém obvodu. Cílem následující analýzy je stanovit, jak ovlivňuje volba poháněcího media a jeho množství celkovou tuhost stroje. Při tomto výpočtu jsou využity vztahy z obecné pružnosti a pevnosti, uvedené v [Zajíček&Adámek 2012].

### 12.1. Jednotlivé vlivy působící na tuhost hydraulického systému

#### 1) Stlačení kapaliny vlivem pracovního tlaku

Objem, o který se kapalina stlačí, je závislý na Bulk modulu. Pomocí něj lze vyjádřit závislost mezi změnou tlaku a změnou objemu jako:

$$B = \frac{\Delta p}{\frac{\Delta V}{V}}$$

Hodnoty Bulk modulu převzaté z dostupné literatury [Engineeringtool 2012]:

voda -  $B_{\text{voda}}=0,022 \cdot 10^9$  Pa

olej -  $B_{\text{olej}}=0,015 \cdot 10^9$  Pa

Množství stlačené kapaliny se mění s polohou pohyblivé traverzy, protože s ní se také mění množství kapaliny v systému. Stlačitelnost kapaliny je hodnota závislá i na množství rozpuštěného vzduchu. Zde tento vliv neuvažujeme a řešíme problém pro hodnoty ideální kapaliny.

#### 2) Nafouknutí pracovního válce

Nafouknutí přírodních trubek i válce lze zjednodušeně stanovit podle vzorce:

$$\Delta V = V * \frac{2,6D_2^2 + 1,2D^2}{D_2^2 - D^2} * \frac{p}{E},$$

$D_2$ ... vnější průměr

$D$ ... vnitřní průměr,

$p$ ... tlak pracovní kapaliny

$E$ ... modul pružnosti.

Tato hodnota je pro všechny polohy pohyblivé traverzy stejná, protože tlak působí na vnitřní stěnu válce i v oblasti plunžru a je zachycen až u ucpávek.

### 3) Nafouknutí přívodních trubek.

Tato hodnota je závislá na délce přívodního potrubí a vzdálenosti akumulátorové stanice. Zde byla brána potrubí 159/28mm (vnější průměr/ tloušťka stěny) o délce 50m, které jde od každého válce k rozvaděči a dále pak potrubí 273/42mm o délce 150 m, což reprezentuje potrubí od rozvaděče k akumulátorové stanici.

Tato hodnota není závislá na aktuální poloze pohyblivé traverzy a počítá se stejným principem jako výše uvedené nafouknutí pracovního válce.

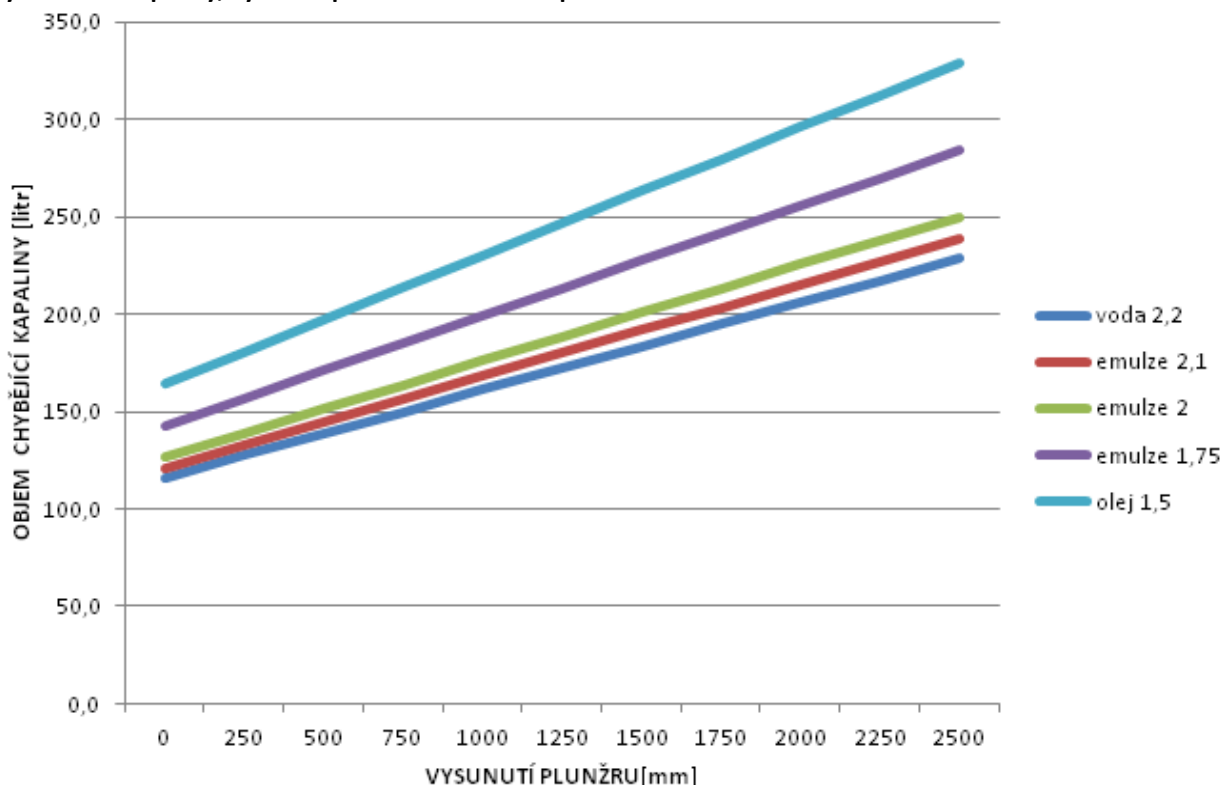
## 12.2. Zhodnocení jednotlivých vlivů s ohledem na stroj

Výsledkem analýzy je graf, znázorňující objem chybějící kapaliny v hydraulickém systému v závislosti na vysunutí plunžru. Tento pokles je v reálu doplněn čerpadly tak, aby k němu nedošlo, ale při navrhování systému je s ním třeba počítat.

Pro názornost je uvedeno více druhů hydraulických kapalin. Těmito kapalinami jsou olej, který je nejvíce stlačitelný, různé emulze, které jsou popsány svým Bulk modulem a voda, která je ze všech uvažovaných nejméně stlačitelná.

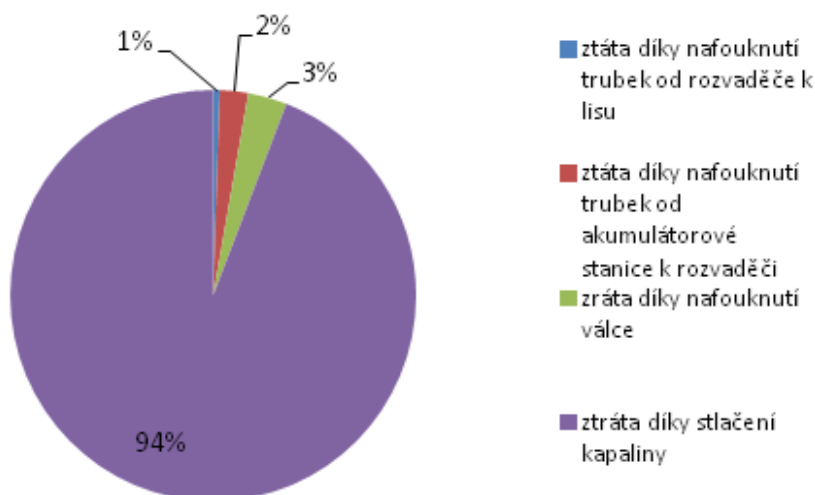
Pro správné pochopení vztahů je nutno znát původní objem kapaliny v uvažovaném systému, který je 11,3 m<sup>3</sup>.

**Graf 1** Objem kapaliny, který je nutno dodat do hydraulického systému na víc v závislosti na stlačení použité hydraulické kapaliny, vysunutí plunžru a deformaci přívodních trubek

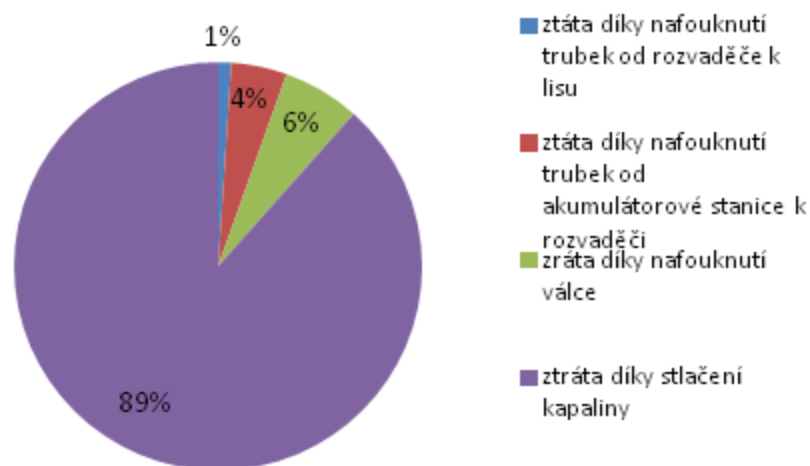


Na následujících diagramech Graf 2 a Graf 3 je vyjádřeno, jak se jednotlivé vlivy podílejí na celkovém poklesu tuhosti v hydraulickém systému.

**Graf 2** Vyjádření poměru ztrát v hydraulickém systému lisu při maximálním vysunutí plunžru (pracovní kapalina voda)



**Graf 3** Vyjádření poměru ztrát v hydraulickém systému lisu při minimálním vysunutí plunžru (pracovní kapalina voda)



Rozdíl mezi hodnotami ztrát v hydraulickém systému při maximálním a minimálním vysunutím plunžru je dán různým množstvím kapaliny v systému. Při maximálním vysunutí je v systému více kapaliny než při minimálním.

### 12.3. Shrnutí výsledků ztrátové analýzy pohonu hydraulického lisu

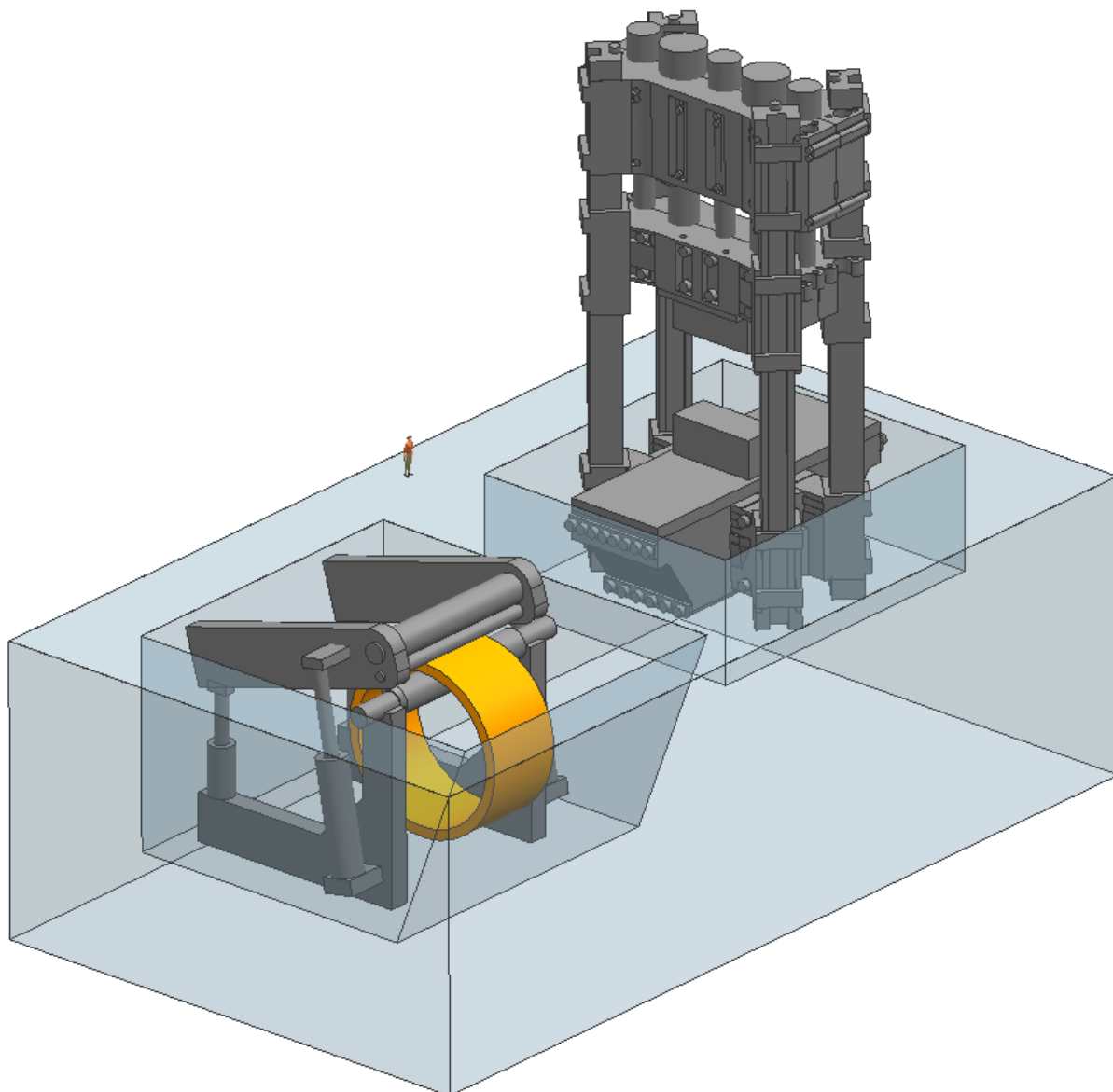
Na celkovou tuhost stroje působí mnoho faktorů. Jedním z nich je i samotný pohonný mechanismus. Z něj má největší vliv stlačitelnost kapaliny a pružnost prvků hydraulického obvodu. Obecně se kapaliny považují za ideální a nestlačitelné. Zde ale vzhledem k velkému

množství kapaliny se tento jindy zanedbatelný vliv stlačitelnosti projeví. Zajímavé je porovnání poklesu tuhosti vlivem stlačitelnosti kapaliny a poklesu tuhosti v ostatních částech hydraulického systému (trubky, válce). Z tohoto srovnání vyplývá, že stlačitelnost kapaliny tvoří přibližně 90% z celkové ztráty. Je možno ji ovlivnit vhodnou volbou pracovní kapaliny. Z tohoto hlediska jsou vhodnější kapaliny, které jsou málo stlačitelné.

Výhodné je umístit čerpadla co nejbližše lisu, tak aby bylo v hydraulickém okruhu co nejméně kapaliny.

## 13 Vizualizace návrhu stroje pro kování velkých kroužků

Na následujícím obrázku je vizualizace komplexního zařízení pro kování velkých kroužků. Lis o síle 240 MN, který je bez problémů schopen vyrábět velké kroužky pro reaktorové nádoby je doplněn zařízením pro doválcování kroužků, které je schopné vytvořit kroužky až do průměru 10 metrů. Pro názornost je obrázek doplněn o postavu člověka.



Obr. 13-1 Vizualizace ideového komplexního celku pro výrobu velkých kroužků (hydraulický lis a zařízení pro doválcování kroužků)

## 14 Doporučení pro návrh stroje na kování kroužků

### 14.1. Obecné zásady pro konstrukci tvářecích strojů

Mezi první a současně zásadní předpoklady nutné k návrhu tvářecího stroje patří podrobná znalost technologie, která se na daném stroji bude provádět. Dalšími, neméně důležitými parametry, které je nutno předem znát jsou rozměrová a tvarová přesnost výrobku.

Na základě charakteristiky tvářecího pochodu je nutno stanovit všechny klíčové parametry stroje, jako je tvářecí síla, požadovaná dráha nástroje, energetická náročnost stroje, rozměry pracovního prostoru a druh pohonu. Pomocí těchto parametrů lze určit síly působící na stroj. Tyto síly, spolu s požadovanou přesností výrobku stanovují vhodné rozměry částí stroje. Tyto rozměry je nutno dát do souvislosti s pružnými deformacemi a ostatními parametry návrhu, zejména požadovanou přesností výrobku.

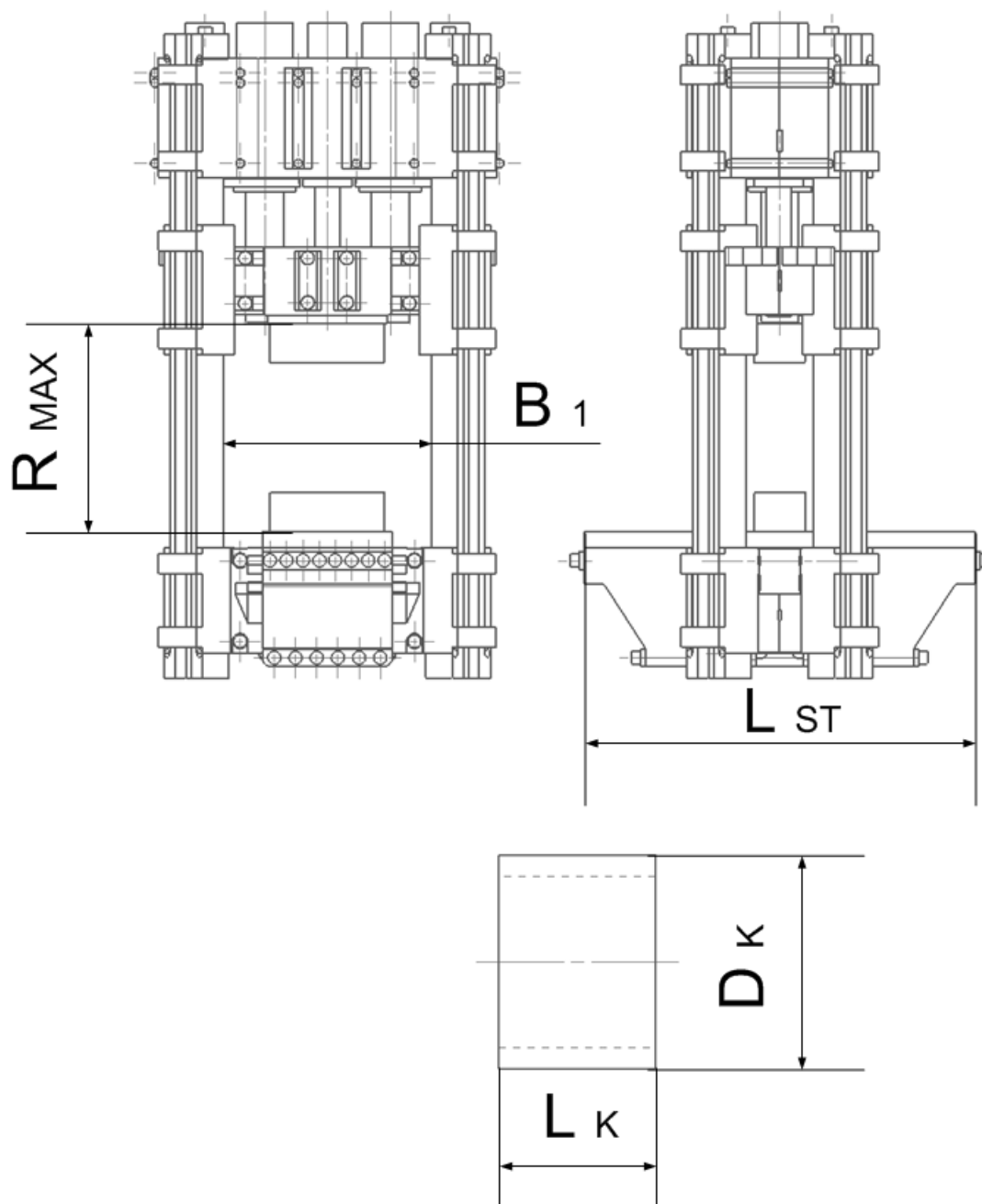
Cílem návrhu je takový stroj, který bude mít co největší účinnost přenosu energie a současně bude mít klidný chod. Z ekonomického hlediska je nutno zajistit maximální výkon stroje, tj. maximální počet výrobků za jednotku času. K docílení maximálního výkonu je třeba při konstrukci dbát na maximální spolehlivost a trvanlivost, tak aby byla minimalizována nutnost oprav a s tím spojených odstávek z provozu. Poruchy tvářecích strojů jsou často způsobeny únavovými lomy některých dílů. Těmto poruchám lze předejít díky správnému dimenzování jednotlivých součástí a zajištění těchto součástí proti přetížení.

V současnosti je důležitým aspektem návrhu stroje jeho snadná obsluha a zajištění bezpečnosti jeho provozu. Ochranná zařízení na takovýto stroj jsou předepsána a musí být v každém případě realizována.

### 14.2. Určení pracovní síly a základních rozměrů stroje

Z technologického určení lisu se stanoví pracovní síla [MN] a základní rozměry stroje. Mezi tyto rozměry patří světlost mezi sloupy, délka stolu a maximální rozevření lisu. Všechny tyto hodnoty přímo závisejí na maximálních rozměrech kroužku, který se bude v pracovním prostoru stroje kovat.





Obr. 14-1 Schéma rozměrů stroje ovlivněných nejvíce prováděnou technologií

Platí, že:

$$B_1 = D_K + 1500mm$$

$$L_{ST} \geq L_K + 2 \cdot B_{OP}$$

$$R_{MAX} = D_K + H_{HK} + 1000mm$$

$$F = k_D \cdot S$$

$B_1$ ... maximální průchod mezi sloupy ve směru osy stolu

$D_K$ ... maximální průměr kovaného kroužku v pracovním prostoru lisu

$L_{ST}$ ... délka stolu lisu

$L_K$ ... maximální délka kovaného kroužku v pracovním prostoru lisu

$B_{OP}$ ... šířka jedné opěry pro trn, které jsou postavené na stole lisu

$F$ ... pracovní síla lisu

$k_d$ ... přetvárný odpor

$S$ ... průmět dotykové plochy nástroje kolmé k ose tváření

$R_{MAX}$ ... maximální rozevření lisu (vzdálenost mezi upínacími deskami nástrojů)

$H_{HK}$ ... výška horního kovádla

### 14.3. Volba pracovního tlaku kapaliny

- Pro lis o pēchovací síle 240 MN se jako nejvhodnější jeví využití pracovního tlaku 35 MPa a pēchovacího 42 MPa (pomocí multiplikace znásobený pracovní tlak). Použití menších tlaků vyvolá nutnost použití velkých průměrů válců, což je z výrobního hlediska nevhodné.
- Obecně lze stanovit, že pēchovací tlak by měl být maximálně o 15 až 20% větší, než je vlastní pracovní tlak.

Doporučení: Z energetického hlediska je nutné umístit hydrogenerátory co nejbliže vlastnímu stroji. Tím lze minimalizovat ztráty způsobené deformacemi přírodního potrubí tlakové kapaliny. Je vhodné volit kapaliny, které jsou méně stlačitelné (voda, emulze). Využití oleje jako pracovní kapaliny má za následek větší energetické ztráty při provozu lisu.

### 14.4. Volba konstrukční varianty lisu

- Volba mezi variantou s horním nebo spodním pohonem je závislá hlavně na přání zákazníka. Lisy s horním pohonem nevyžadují tak hluboký základ, proto jsou menší problémy se spodní vodou, která může mnohdy znemožnit instalaci lisu se spodním pohonem. Na druhou stranu lis se spodním pohonem může být instalován v nižší hale. Jednodušší a v současnosti u velkých lisů častěji používaná je koncepce s horním pohonem.
- S ohledem na rozměry zařízení a jeho hmotnost je jasné, že bude nutno použít uzavřený dělený rám. Není výrobně možné vyrobit rám z jednoho kusu.
- Traverzy budou muset být také dělené, tak aby bylo možno je odlít. Pracovní válce musí být z obdobných důvodů vkládané.
- Umístění zpětných válců je vhodné nahoře, protože nepřekáží při vlastním kování a je nižší riziko jejich poškození.

### 14.5. Výpočet pracovních hydraulických válců a plunžrů

- Výpočet musí zahrnovat i návrh přírub, tloušťek stěn, rozměrů přírub a jejich šroubů. Výška pracovního válce je závislá na pracovním zdvihu lisu. Z energetického hlediska je výhodné uspořádání válců s různými průměry a větším počtem pracovních stupňů.
- Pro lis o pēchovací síle 240 MN je výhodné použít 5 válců. Při menším počtu válců by pak vycházely jejich průměry moc velké a takřka nevyrobitelné.

## 14.6. Stanovení skutečné pracovní a zpětné síly

- Pracovní síla se stanoví tak, aby byla dostačující k napěchování ingotu nutného pro výrobu kroužků.
- Výpočet zpětné síly v této práci není podrobněji uveden. Její velikost musí být dostatečná, aby stačila ke zvednutí pohyblivých částí lisu (pohyblivá traverza, plunžry, horní kovádko, horní deska kovádkla).
- Skutečná pracovní se nesmí příliš lišit od požadované síly. Odchyšky můžou vzniknout v souvislosti s volbou průměru pracovního válce. Obecně by mělo platit:

$$F_{SKUT} = 0,95 \text{ až } 1,1 F_{POŽ}$$

$F_{SKUT}$ ... skutečná pracovní síla lisu

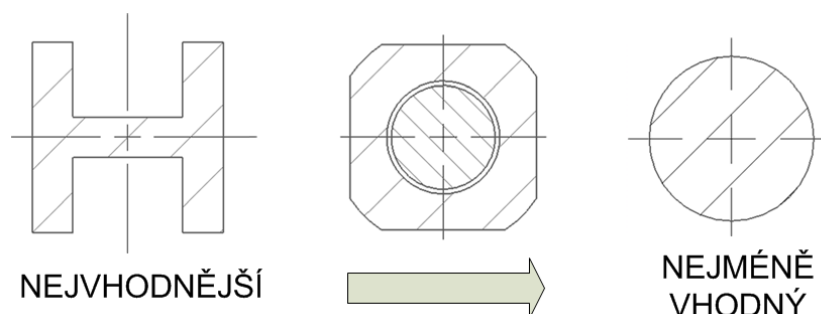
$F_{POŽ}$ ... požadovaná síla lisu

## 14.7. Stanovení rozměrů traverz a sloupů

- Stanovení rozměrů traverz a sloupů probíhá v závislosti na použitém materiálu, bezpečnosti a dovolenému napětí.
- Při samotném návrhu je bezpodmínečně nutné uvažovat od začátku montážní a manipulační kritéria, protože se jedná o díly s hmotnostmi dosahující několika set tun.

Doporučení: Pro zajištění vyšší ohybové odolnosti stroje je vhodné využít sloupy s jiným profilem, než je nejčastěji používaný kruhový. Jako vhodný se jeví profil "H". Pokud je to z výrobního a technologického hlediska možné, je vhodné traverzy dělat jako nedělené, které jsou při stejné tuhosti lehčí. Tento požadavek ale naráží na maximální hmotnost odlitku, která závisí na možnostech slévárny. Průměrně tato hodnota dosahuje 250 tun.

- Vhodnost využití různých profilů sloupů při zachování jejich stejné hmotnosti od nejvíce k nejméně vhodnému je znázorněna na následujícím obrázku:



Obr. 14-2 Vhodnost profilů sloupů pro kování velkých kroužků

## 14.8. Určení potřebných předepnutí kotev

- Určit potřebná předepnutí sloupů (pokud se jedná o předepnutou variantu) a jednotlivých dílů traverz (pokud jsou dělené).
- Je nutné, aby předepnutí dílů dělených traverz zajistilo neodlehnutí jednotlivých dílů. V praxi a po delším využívání lisu k částečnému odlehnutí dojít může. Maximální reálné odlehnutí mezi díly dělené traverzy by při zatížení nemělo lokálně přesáhnout 0,1mm.

## 14.9. Návrh vedení pohyblivé traverzy

- Návrh vedení probíhá v závislosti na tvaru sloupu. Výhodné jsou z hlediska vymezování vůlí sloupy s rovinnými kontaktními plochami.
- Vedení musí být provedeno s dostatečnou vůlí, protože nesmí dojít k zastavení (zaseknutí) traverzy vlivem vymezení vůlí. Toto je třeba kontrolovat při centrickém i excentrickém zatížení. Zvláště při centrickém zatížení musí být vůle větší, než hodnota prohnutí sloupů. Při návrhu je nutno zvážit míru a velikost tepelné dilatace materiálu vlivem umístění kovaného materiálu.

Doporučení: Hodnota vůle ve vedení pro lis o síle 200/240 MN by měla být přibližně 3mm.

## 14.10. Návrh zařízení pro dokončení kroužků mimo vlastní lis

- Výhodné je doplnit lis zařízením pro doválcování kroužků, které bude spolupracovat s vlastním lisem.

Doporučení: Z energetického hlediska je vhodné doplnit lis o zařízení pro doválcování kroužků, čímž vznikne kompaktní výrobní celek. Na vlastním lisu by vznikaly kroužky jako vstupní polotovary pro doválcování. Výhodou doválcování je nižší energetická náročnost a přesnější tvar.

## 14.11. Ostatní doporučení pro návrh lisu

U každé jednotlivé části je třeba zvážit jaký použít materiál. Vedle klasických ocelí je možno využít vysocepevné oceli, nebo nekonvenční materiály jako jsou vláknové kompozity nebo betony. V současnosti lze zaznamenat nárůst ve využívání nekonvenčních materiálů. Jejich využití v oblasti tvářecích strojů je velmi omezené a záleží na invenci konstruktéra. Využitím nekonvenčních materiálů se tato práce podrobně nezabývá.

Předběžné návrhové výpočty je vhodné provést analyticky, finální výpočet pak metodou konečných prvků, pomocí níž lze zjistit a kontrolovat nejkritičtější místa konstrukce.

## 15 Splnění cílů disertační práce

1. Provedení rozboru technologií zabývajících se kovááním velkých volných výkovků a výběr technologie pro podrobné zpracování v disertační práci.

V kapitole 5 je proveden rozbor několika technologií kováání velkých volných výkovků, které se v současnosti v praxi vyskytují. Výběr těchto technologií je zvolen s ohledem na jejich perspektivu v oblasti průmyslu a četnost jejich výskytu. Pro podrobné zpracování byla vybrána technologie kováání velkých kroužků, které jsou použity například u reaktorových nádob.

2. Rozbor vybrané technologie s ohledem na požadavky, které musí splnit tvářecí stroj.

V rámci kapitol 7 a 8 byl proveden rozbor technologie kováání kroužků a to z technologického hlediska i hlediska uplatnění těchto výrobků na trhu. Tento rozbor je využit ke stanovení minimálních parametrů stroje, který je nutný pro výrobu kroužků definovaných v této části.

3. Provedení rešerše a rozboru současného stavu v oblasti konstrukce velkých tvářecích strojů.

Rešerše byla provedena v kapitole 9. Její zaměření je na hydraulické lisy a buchary těch největších na světě se vyskytujících velikostí. Na závěr je provedeno zhodnocení stavu techniky v této oblasti a pro technologii kováání kroužků je jako využitelný stroj vybrán hydraulický lis.

4. Volba a rozbor funkčního principu stroje na základě morfologických matic a jejich zhodnocení.

S využitím znalostí a nástrojů Engineering Design Science je v kapitole 10 proveden rozbor možných funkčních principů jednotlivých konstrukčních uzlů hydraulického lisu. Pomocí tohoto rozboru jsou vytvořeny tři varianty stroje pro tvorbu velkých kroužků a z nich je vybrána ta nejvhodnější.

5. Vliv vybraných faktorů z oblasti hydraulických lisů na energetickou spotřebu stroje.

V kapitole 12 jsou popsány tři vlivy způsobující pokles tuhosti v hydraulickém obvodu lisu. Jedná se o stlačení kapaliny, nafouknutí pracovních válců a nafouknutí přívodních trubek. Výsledkem je porovnání těchto vlivů a určení jejich podílů na celkovém poklesu tuhosti.

6. Zpracování podkladů pro komplexní návrh stroje pro danou technologii ve formě doporučení, vzorců a virtuálních modelů.

Hlavním výsledkem práce jsou podklady sloužící k rámcovému návrhu stroje pro kování kroužků. Tyto podklady jsou obsaženy v kapitole 14.

7. Zhodnocení vytyčených cílů disertační práce.

Z jednotlivých částí této práce vyplývá, jakým způsobem postupovat při řešení problému, jakým je návrh nového stroje pro výrobu velkých kovaných kroužků.

Obecné zhodnocení získaných výsledků je provedeno v kapitole 16.

## 16 Závěr

Předložená práce představuje výsledky výzkumných prací v oblasti konstrukce tvářecích strojů pro specifickou a moderní výrobní technologii kování kroužků. Tento výzkum probíhal v rámci mého studia a opíral jsem se o znalosti získané během činností v Centru výzkumu konstrukce tvářecích strojů a Regionálním technologickém institutu. V rámci prací provedených při výzkumných činnostech byla navázána úzká spolupráce s praxí a na základě toho získány praktické zkušenosti využité při tvorbě práce.

Většina tvářecích strojů se navrhuje vzhledem k prováděné technologii. Konkurenční výhodou pro takový stroj ale je, pokud je schopen provádět i jiné technologie. Proto byl jako základ pro stroj na výrobu velkých kroužků vybrán hydraulický lis pro volné kování. Na něm je mimo vlastní výroby kroužků možno vyrábět i ostatní volně kované výrobky jako jsou třeba různé hřídele nebo prosazované díly.

Návrh takto velkého a komplikovaného lisu je velmi náročný a to z časového i znalostního hlediska. Je nutno velmi pečlivě uvažovat nad jednotlivými konstrukčními uzly a jejich variantami, protože chyba v návrhu by pro výrobce takto finančně náročného stroje měla fatální důsledky. Důležitým krokem, který nesmí být během návrhu opomíjen, je vyrobitelnost jednotlivých dílů vzhledem k jejich vysoké hmotnosti.

Výsledkem výzkumu je stanovení správného a uceleného postupu pro návrh stroje pro výrobu velkých kroužků a to v nejobecnějším měřítku. Tento postup, který sumarizuje získané poznatky, může použít uživatel, který chce vyrábět kroužky největších velikostí. Výsledkem provedení jednotlivých kroků procesu návrhu je zjištění, jaká technická specifika by měl mít stroj pro technologii kování velkých kroužků.

Lis může být případně doplněn o přídavné zařízení pro doválcování kroužků. Na konkrétních příkladech je provedeno zhodnocení technologických procesů na nově navrženém zařízení. Virtuálních simulací je použito pro výpočty statické, ale i technologické, týkající se volného kování a kování kroužků. Zvláště přínosné jsou analýzy nových koncepcí lisu, jakou je třeba použití různých profilů sloupů.

Přínosem práce je rozšíření znalostní základny v oblasti výroby velkých kroužků a návrhu tvářecích strojů. V jejím rámci jsem se zabýval různými variantami konstrukce a ty jsem pomocí moderních výpočetních metod mezi sebou porovnával.

## **17 Vyjádření nositele a řešitelů projektů**

Předložená disertační práce vznikla v rámci projektu FR-TI1/045 – Vývoj velkých kovacích lisů pro volné kování s lisovací silou 100 ÷ 200 MN. Plzeň, ZČU 2009 -2011. Student je autorem části uvedené v předložené Disertační práci z 80%, což činí 15% z celkového projektu.

.....

nositel/řešitel projektu



## 18 Seznam použité literatury

[Anyang 2011] Anyang. Dostupné na (<http://www.chinesehammers.com>) ke dni 15.12.2011.

[Boltex 2012] Boltex Forging lines- 1400kJ Counterblow Hammer. Dostupné na (<http://www.boltex.com/forginglines-forgings.html>) ke dni 20.11.2012.

[Čechura&Kubec&Ráž 2009] Čechura, M., Kubec, V., Ráž, K., Volena, J.: Analýza současného stavu v oblasti hydraulických lisů (nad 50 MN), Plzeň, 2019.

[Čechura&Ráž 2011] Čechura, M., Ráž, K.: Porovnání koncepčního uspořádání pohonu a uložení sloupů pro největší lisy z řady, Plzeň, 2011.

[Čermák&Jílek 2009] Čermák, J., Jílek, J.: Volné kovárny opět začínají s jadernou energetikou. Kovářenství. prosinec 2009, stránky 42-43.

[Drastík 1972] Drastík, F.: Výpočty z oboru kování a lisování. Praha, SNTL, 1972.

[Engineeringtool 2012] The Engineering ToolBox- Bulk Modulus and Fluid Elasticity. Dostupné na ([http://www.engineeringtoolbox.com/bulk-modulus-elasticity-d\\_585.html](http://www.engineeringtoolbox.com/bulk-modulus-elasticity-d_585.html)) ke dni 21. 1.2013.

[Forging Magazine 2011] Forging Magazine- Schuler Delivers World Largest Counterblow Forging Hammer. Dostupné na (<http://forgingmagazine.com/forming/schuler-delivers-worlds-largest-counterblow-forging-hammer>) ke dni 10.12.2011.

[Greger&Petržela 2011] Greger, M., Petržela, J., Lázlů, V., Cechel, T., Juhas, M.: Vývoj technologie kování den pro tlakové nádoby reaktoru. Kovářenství. 2011.

[Hlaváč&Ráž&Čechura 2011] Hlaváč, J., Ráž, K., Čechura, M., Kubec, V.: Virtuální modelování a optimalizace konstrukce tvářecích strojů, jejichž uzlů a komponent, Plzeň, 2012.

[Hosnedl 2010] Hosnedl, S.: Systémové navrhování technických produktů KKS/ZKM. Texty přednášek v Power Pointu, Plzeň, ZČU-KKS, 2010

[Kobelco 2010] Kobelco. dostupné na (<http://www.kobelco.co.jp/english/onlyone/004>) ke dni 10.12.2010.

[Lasco 2011] Lasco. dostupné na (<http://www.lasco.de>) ke dni 15.12.2011.

[NKMZ 2010] NKMZ. Dostupné na (<http://www.nkmz.com/English/index.html>) ke dni 14.8.2010.

[Ráž 2011] Ráž, K.: Doktorská práce ke státní doktorské zkoušce. Plzeň, ZČU, KKS, 2009.

[Ráž&Čechura 2012] Ráž, K., Čechura, M.: Současný stav ve výzkumu a vývoji velkých kovacíh lisů pro volné kování. Kovářenství. 2012.

[Ráž&Čechura&Kubec 2012] Ráž, K., Čechura, M., Kubec, V.: Možnosti kování velkých kroužků mimo lis. Kovářenství. 2012.

[Rudolf&Kopecký 1979] Rudolf, B., Kopecký, M.:Tvářecí stroje: základy výpočtů a konstrukce, Praha, 1979.

[Schuler 2011] Schuler. dostupné na (<http://www.schulergroup.com>) ke dni 10.12.2011.

[SMS Meer 2010] SMS Meer. Dostupné na (<http://www.sms-meer.com/en/portfolio/forging/hydraulic-presses/open-die-forging-presses.html>) ke dni 12.8.2010 .

[Staněk 2001] Staněk, J.: Základy stavby výrobních strojů- Tvářecí stroje. Plzeň, ZČU, 2001.

[TS Plzeň 2010] TS Plzeň. Dostupné na (<http://www.tsplzen.cz/cz/hydraulicke-lisy-ckv-tp.asp>) ke dni 12.8.2010.

[Uralmash JSC 2010] Uralmash JSC. Dostupné na (<http://www.uralmash.ru/eng/products/catalogue/aboutproduct.htm?prod=384>) ke dni 14.8.2010.

[Zajíček&Adámek 2012] Tlustostěnné rotačně symetrické válcové nádoby. Dostupné na (<http://www.kme.zcu.cz/kmet/pp2/valcove-nadoby/shrnuti.pdf>) ke dni 20.6.2012.

[Ždas 2010] Ždas. Dostupné na <http://www.zdas.cz/cs/content.aspx?id=17>) ke dni 12.8.2010.